МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЮ (РОСНЕДРА)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ИМ. Н.М. ФЕДОРОВСКОГО» (ФГБУ «ВИМС»)

Пятый международный симпозиум

УРАН: ГЕОЛОГИЯ, РЕСУРСЫ, ПРОИЗВОДСТВО



СБОРНИК ДОКЛАДОВ

23-24 ноября 2021 г.

Москва, 2021

УДК 553.495(063)
Т 78

Т 78 Труды Пятого Международного симпозиума «Уран: геология, ресурсы, производство». М.: ФГБУ «ВИМС», 2021, 409 с. ISBN 978-5-6046868-3-6

В сборнике представлены доклады участников симпозиума «УРАН: ГЕОЛОГИЯ, РЕСУРСЫ, ПРОИЗВОДСТВО», состоявшегося 23-24 ноября 2021 г. в ФГБУ «ВИМС». Темы симпозиума, по которым опубликованы доклады:

- Мировая минерально-сырьевая база урана и конъюнктура уранового сырья.
- Современные технологии прогноза, поисков и оценки месторождений урана.
- Основные направления геологоразведочных работ на уран.
- Инновационные технологии добычи, переработки урановых руд и сопутствующих компонентов. Современные методы изучения уранового сырья.

The collected volume presents the reports of the participants of the symposium "URANIUM: GEOLOGY, RESOURCES, PRODUCTION", held on November 23-24, 2021 at the Federal State Budgetary Institution "VIMS". Subject of the published symposium reports:

- The world mineral resource base of uranium and the conjuncture of uranium raw materials.
- Modern technologies of forecasting, prospecting and evaluation of uranium deposits.
- The main directions of geological exploration for uranium.
- Innovative technologies of extraction, processing of uranium ores and related components. Modern methods of studying uranium raw materials.

Организаторы симпозиума:
Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра),
Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского (ФГБУ «ВИМС»),
АО «Ураниум Уан Груп»,
АО «Атомредметзолото»,
АО «Урангеологоразведка»,
Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН),
Российское геологическое общество (РосГео).

Оргкомитет симпозиума:
Сопредседатели: Петров Е.И., Верховцев В.Н., Глико А.О., Шутов А.Н.
Заместители председателя: Казанов О.В., Корогодин В.И., Петров В.А., Святецкий С.В.
Члены оргкомитета: Арбузов С.И., Бойцов А.В., Верчеба А.А., Гладышев А.В., Игнатов П.А., Машковцев Г.А., Миронов Ю.Б., Печенкин И.Г., Полонянкина С.В., Руднев А.В., Солодов И.Н., Фаррахов Е.Г.

Редактор к.г.-м.н. Л.В. Спорыхина (ФГБУ «ВИМС»)

ISBN 978-5-6046868-3-6 **© ФГБУ «ВИМС», 2021 г.**

*Акционерное общество «Ведущий Научно-Исследовательский Институт Химической Технологии Госкорпорации «Росатом» (**АО «ВНИИХТ»**), г. Москва*

*Акционерное общество «Ведущий проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии» (**АО «ВНИПИпромтехнологии»**), г. Москва*

*Акционерное общество «Далур» (**АО «Далур»**), Курганская область, с. Уксянское*

*Акционерное общество «Росгеология» (**АО «Росгеология»**), г. Москва*

*Акционерное общество «РУСБУРМАШ» (**АО «РУСБУРМАШ»**), г. Москва*

*Акционерное общество «Техснабэкспорт» (**АО «Техснабэкспорт»**), г. Москва*

*Акционерное общество «Урангео» (**АО «Урангео»**), г. Иркутск*

АО «Уранредметгеология», г. Ташкент, Республика Узбекистан

Госкомгеологии РУз, г. Ташкент, Республика Узбекистан

ГП «Институт минеральных ресурсов» Госкомгеологии РУз, г. Ташкент, Республика Узбекистан

ГУ Институт «ГИДРОИНГЕО» Университета геологических наук, г. Ташкент, Республика Узбекистан

*Западно-Сибирский филиал Российской Академии Естественных Наук (**ЗСФ РАЕН**), г. Томск*

*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси (**Институт природопользования НАН Беларуси**), г. Минск, Республика Беларусь*

*ПАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение имени Е.П. Славского» (**ПАО «ППГХО»**), г. Краснокаменск*

*Северский технологический институт – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (**СТИ НИЯУ МИФИ**), г. Северск*

*Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова (**ТГТУ им. Ислама Каримова**), г. Ташкент, Республика Узбекистан*

*Урановый холдинг «АРМЗ» (**АО «Атомредметзолото»**), г. Москва*

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (**ТПУ**), г. Томск*

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский Государственный Геологоразведочный Университет имени Серго Орджоникидзе» (**МГРИ**), г. Москва*

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» (**СибГУ им. М.Ф. Решетнева**), г. Зеленогорск*

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (**РХТУ им. Д.И. Менделеева**), г. Москва*

*Федеральное государственное бюджетное учреждение «всероссийский научно-исследовательский геологический институт имени А.П. Карпинского» (**ФГБУ «ВСЕГЕИ»**), г. Санкт-Петербург*

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (**ИГЕМ РАН**), г. Москва*

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии Уральского отделения РАН (**ИМЕТ УрО РАН**), г. Екатеринбург*

*Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья имени Н.М. Федоровского» (**ФГБУ «ВИМС»**), г. Москва*

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ И МИРА *10*

Бойцов А.В. — *РАЗВИТИЕ МИРОВОЙ УРАНОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ – ВЫЗОВЫ ВРЕМЕНИ* *11*

Печенкин И.Г. — *РОЛЬ ВИМСа В СТАНОВЛЕНИИ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ УРАНОВОЙ ГЕОЛОГИИ* *23*

Тарханов А.В., Бугриева Е.П. — *СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МИРОВОЙ И РОССИЙСКОЙ УРАНОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ* *32*

МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВАЯ БАЗА УРАНА РФ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЕ РАЗВИТИЯ *41*

Афанасьева Е.Н., Миронов Ю.Б. — *ПОТЕНЦИАЛ ЗОЛОТО-УРАНОВОГО ОРУДЕНЕНИЯ БАЛТИЙСКОГО ЩИТА И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ* *42*

Дзядок С.А., Прохоров Д.А. — *ПЕРСПЕКТИВЫ ВЫЯВЛЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА ПЕСЧАНИКОВОГО ТИПА В ЗАБАЙКАЛЬЕ* *53*

Ежков Ю.Б., Рахимов Р.Р., Холиеров А.Т., Тошметов У.Х. — *МОДЕЛИ УРАНОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ – ОСНОВА ГЕОЛОГО-ПРОМЫШЛЕННОЙ ТИПИЗАЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА В УЗБЕКИСТАНЕ* *62*

Машковцев Г.А., Гребенкин Н.А., Петрин А.В., Прохоров Д.А. — *ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ НА УРАН* *71*

Миронов Ю.Б., Карпунин А.М., Фукс В.З. — *ТОРИЙ РОССИИ: ГЕОЛОГИЯ, РЕСУРСЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ* *91*

Миронов Ю.Б., Карпунин А.М., Фукс В.З. — *УРАНОВЫЕ ПРОВИНЦИИ МИРА* *98*

Томашев А.В., Молчанов А.В. — *ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ НА УРАН В УЧУРО-МАЙСКОМ РАЙОНЕ (ХАБАРОВСКИЙ КРАЙ)* 114

ГЕОЛОГИЯ И ГЕНЕЗИС УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ 135

Верчеба А.А., Игнатов П.А. — *ГЕОЛОГИЯ СТРАТЕГИЧЕСКИХ ВИДОВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ В ПРОГРАММЕ ПОДГОТОВКИ МАГИСТРАНТОВ* 136

Гребёнкин Н.А., Карманов Е.Н., Леденёва Н.В., Мельников С.И. — *ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СВЯЗЬ ПОЗДНЕДОКЕМБРИЙСКИХ УРАНОВОРУДНЫХ ОБЪЕКТОВ С БАЗИТОВЫМ МАГМАТИЗМОМ ЮЖНОЙ ГРАНИЦЫ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ* 139

Грибик Я.Г. — *УРАНОНОСНОСТЬ ПОРОД И ФЛЮИДОВ ПРИПЯТСКОГО ПРОГИБА (БЕЛАРУСЬ)* 163

Домаренко В.А. — *ПАРАДОКСЫ ПРИРОДНОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ОКЛО* 171

Жураев М.Н., Жураев М.М., Курбанова Г.И. — *РАДИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ В ПРЕДЕЛАХ ЗАПАДНО-ЗИАЭТДИНСКОЙ УРАНОВОРУДНОЙ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ* 176

Калина В.А., Макарьев Л.Б. — *МИНЕРАГЕНИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ И ГЛАВНЫЕ ЭПОХИ ЭНДОГЕННОГО РУДООБРАЗОВАНИЯ НЕЧЕРСКОГО ПОДНЯТИЯ (СЕВЕРНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)* 181

Масобиров М.У. — *ЭНДОГЕНЕЗ И БИОНАКОПЛЕНЕНИЯ УРАНА (обзор, анализ)* 198

Печенкин В.Г. — *УРАН И ЖИЗНЬ. 4,5 МИЛЛИАРДА ЛЕТ СОТРУДНИЧЕСТВА* 202

Полуэктов В.В., Петров В.А. — *МЕХАНИЗМЫ МИГРАЦИИ И СОРБЦИЯ УРАНА В ВУЛКАНИЧЕСКИХ СТЕКЛАХ И КИСЛЫХ ВУЛКАНИТАХ В РАЗЛИЧНЫХ РЕДОКС УСЛОВИЯХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВУЛКАНОГЕННОГО ТИПА (СТРЕЛЬЦОВСКАЯ КАЛЬДЕРА, ЮВ ЗАБАЙКАЛЬЕ)* 212

Сащенко А.В., Тюленева В.М. — *ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ УРАНОВОРУДНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ С ДЕФИЦИТОМ РАДИЯ В ПОЧВЕННО-ТОРФЯНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ВИТИМО-КАРЕНГСКОГО РАЙОНА (СЕВЕРНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)* *251*

Собиров С.С., Салихов В.А. — *СТРАТИГРАФИЧЕСКОЕ РАСЧЛЕНЕНИЕ МЕЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ И РАЗВИТИЕ ЗОН ПЛАСТОВОГО ОКИСЛЕНИЯ НА ЗАПАДНО-ЗИАЭТДИНСКОЙ ПЛОЩАДИ* *257*

Солодов И.Н. — *ВЛИЯНИЕ УГЛЕКИСЛЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА РУДОСОХРАНЕНИЕ И СПВ УРАНА (ХИАГДИНСКОЕ РУДНОЕ ПОЛЕ)* *262*

Турсунметов Р.А., Оловов Х.Х., Жураев Ш.И. — *ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГИДРОГЕННОГОТИПА И ИХ ПОИСКОВЫЕ ЗНАЧЕНИЯ* *274*

Шумилин М.В. — *НЕКОТОРЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ К ГЕНЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТИПА НЕСОГЛАСИЯ, ПРИНЯТОЙ ЗА РУБЕЖОМ* *287*

ТЕХНОЛОГИИ ПОИСКОВ И ОЦЕНКИ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ *292*

Аллабергенов Р.Д., Бимурзаев Г.А., Бакиев С.А., Ибрагимов А.С., Гафуров Т.А. — *ГИДРОМИНЕРАЛЬНОЕ СЫРЬЕ УЗБЕКИСТАНА КАК СЫРЬЕВОЙ РЕСУРС УРАНА: ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ* *293*

Бейсекеев Е.Ш., Язиков Е.Г. — *ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ДООЦЕНКИ ПРОДУКТИВНОСТИ УРАНОНОСНЫХ БЛОКОВ В УСЛОВИЯХ ОТРАБОТКИ МЕТОДОМ ПСВ НА ОБЪЕКТАХ ШУ-САРЫСУЙСКОЙ УРАНОВОРУДНОЙ ПРОВИНЦИИ* *305*

Красных С.А., Юренков Е.Г., Калинин И.В. — *ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СТРЕЛЬЦОВСКОЙ КАЛЬДЕРЫ В УСЛОВИЯХ МОКРОЙ КОНСЕРВАЦИИ* *313*

Майников Д.В., Толкачев В.А. — *ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ФИЛЬТРАЦИОННО-РЕПУЛЬПАЦИОННОЙ СХЕМЫ ПРОМЫВКИ ОСАДКОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПОСЛЕ АВТОКЛАВНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ КАРБОНАТНЫХ РУД РУДНИКА № 6 ПАО «ППГХО»* 320

Овсянникова Т.М., Несмеянова А.И., Гребенкин Н.А., Прохоров Д.А., Стародубов А.В., Машнин Д.М., Тубольцев И.С. — *ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСА ГЕОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ПОИСКАХ СКРЫТЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА* 325

Салихов В.А., Собиров С.С. — *РОЛЬ ВИЗУАЛЬНОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ПРИ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТАХ НА ПРИМЕРЕ ГОР БУКАНТАУ* 340

ТЕХНОЛОГИИ ОСВОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ 343

Васюта А.Е., Руденко А.А., Данилейко В.В., Гладышев А.В. — *ОПТИМИЗАЦИЯ СЕТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ОТРАБОТКИ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СКВАЖИННЫМ ПОДЗЕМНЫМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕМ* 344

Вацура Ф.Я., Головко В.В., Трошкина И.Д., Буланова Д.А., Барбашина С.И. — *СОРБЦИЯ УРАНА ИЗ СЕРНОКИСЛЫХ РАСТВОРОВ ГЕЛЕВЫМ АНИОНИТОМ С ПИРИДИНОВЫМИ ГРУППАМИ* 355

Гаврилов А.С., Ординарцев Д.П., Крашенинин А.Г., Петрова С.А. — *ИЗВЛЕЧЕНИЕ НИКЕЛЯ И КОБАЛЬТА ИЗ ПРОДУКЦИОННЫХ РАСТВОРОВ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ОКИСЛЕННЫХ НИКЕЛЕВЫХ РУД* 362

Данилейко В.В., Квакин М.Ю., Зонов С.А., Кузнецов В.В., Ежуров Д.О. — *ВНЕДРЕНИЕ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ СПВ УРАНА НА ДОБЫЧНЫХ БЛОКАХ АО «ДАЛУР»* 372

Данилейко В.В.,
Курашов И.А.,
Панков А.А.,
Романов С.В.,
Левашов А.О.
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА *380*

Карамушка В.П.,
Дунаева Е.В.,
Камнев Е.Н.
ОПЫТ СНЯТИЯ С ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ДОБЫЧИ И ПЕРЕРАБОТКИ УРАНОВЫХ РУД И РЕКУЛЬТИВАЦИЯ НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ ... *389*

Майников Д.В.,
Толкачев В.А.,
Радушинский С.М.
ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДВУХСТАДИЙНОГО ПРОТИВОТОЧНОГО СПОСОБА ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ В ГИДРОМЕТАЛЛУРГИИ УРАНА, РЕДКИХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ *397*

Носков М.Д.,
Кеслер А.Г.,
Теровская Т.С.,
Лаптев Ю.И.,
Авдонин Г.И.,
Сащенко А.В.
АВТООЧИСТКА ОСТАТОЧНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ РАСТВОРОВ ДВУХСКВАЖИННОГО ОПЫТА ПВ-89 НА ДОБРОВОЛЬНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ УРАНА *402*

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ И МИРА

РАЗВИТИЕ МИРОВОЙ УРАНОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ – ВЫЗОВЫ ВРЕМЕНИ

А.В. Бойцов
АО «Техснабэкспорт», г. Москва

Прогноз обеспечения сырьевых потребностей мировой атомной энергетики

Всемирная Ядерная Ассоциация (World Nuclear Association, WNA) в очередном аналитическом отчете по ядерному топливному циклу 2021 года [1] представила оптимистичные прогнозы по развитию мировой атомной энергетики. Базовый сценарий предполагает, что мощность АЭС во всем мире вырастет с нынешних 375 ГВт до 615 ГВт к 2040 году, то есть более чем в полтора раза. Наибольший рост атомной энергетики ожидается в Китае – более чем в четыре раза с 47 до 206 ГВт. Вместе с тем, прогнозируется снижение парка ядерных реакторов в США, странах Западной и Центральной Европы. Согласно высокому сценарию мощности вырастут уже до 776 ГВт к 2040 году.

По сравнению с предшествующим отчетом 2019 года в целом отмечается положительная динамика развития. Ожидается, что генерирующие мощности будут расти на 2,6% в год по сравнению с 2,0% в отчете за 2019 год. При этом до 2035 года происходит снижение мощностей в связи с пересмотром планов ряда стран, а после 2035 года значительный рост в связи со строительством АЭС в новых странах и развитием «зеленой» низкоуглеродной энергетики. Рост спроса на электроэнергию в целом обусловлен такими факторами, как рост населения, урбанизация, электрификация производств и быта. Кроме того, он напрямую коррелирует с неуклонным ростом населения Земли. Сейчас более миллиарда людей по всему миру не имеют доступа к электроэнергии, поэтому усилия крупных развивающихся стран в этом направлении в будущем станут важным драйвером роста спроса на электроэнергию.

Пропорционально мощностям на 80% должны увеличиться и потребности атомной энергетики в уране: с текущих 62,5 до 112,3 тыс. тонн в год в 2040 году (рис. 1).

В настоящее время значительная часть потребностей ядерного топливного цикла обеспечивается за счет так называемых вторичных источников. К вторичным источникам урана относятся государственные и коммерческие складские запасы различных урансодержащих продуктов, дообогащение отвалов обогатительных производств, высокообогащенный уран и регенерированный уран из отработавшего ядерного топлива. По оценкам WNA по состоянию на 2021 год вторичные источники обеспечивали около 10,5 тыс. тонн урана в год, а к 2040 году количество сократится до 6,6 тыс. т. Таким образом, основной рост должен быть

обеспечен первичной добычей природного урана, который не имеет альтернативы на этом горизонте. Добыча урана должна увеличиться с нынешних 53 до 92 тыс. т, причем на действующих рудниках она сократится более чем в 2 раза с 45,8 до 21,3 тыс. т, а планируемые новые рудники не смогут компенсировать выбывающие мощности. Это может привести к тому, что начиная с 2028 года спрос на уран будет превышать предложение из известных источников. Разрыв между выявленными источниками поставок и потребностями может составить около 55 тыс. тонн урана в 2040 году, что сопоставимо с текущей мировой добычей урана. Он должен быть заполнен поставками из неопределённых источников, которые включают коммерческие запасы, неучтенный потенциал существующих рудников, дополнительную добычу на простаивающих рудниках, разработки резервных или новых месторождений. Эти мощности сложно спрогнозировать из-за коммерческой чувствительности, политической неопределенности, нестабильности рынка.

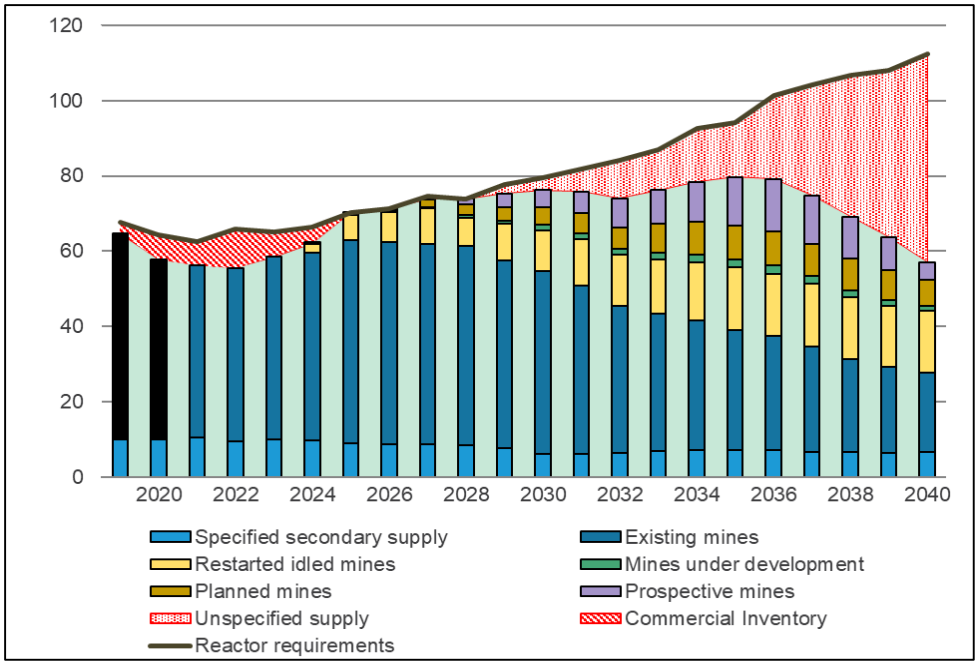


Рис. 1. Базовый сценарий обеспечения сырьевых потребностей АЭ до 2040 года [1]

Росту производства урана должна способствовать благоприятная рыночная конъюнктура. В последние пять лет спотовые цены на уран находились на рекордно низком уровне в пределах 25-30 долл. за фунт, лишь незначительно и кратковременно повышаясь в ответ на снижение объемов добычи или приостановку некоторых рудников (рис. 2). Определяющим фактором влияния на низкую цену являлось излишнее количество урана на спотовом рынке, вызывающее превышение предложения над спросом. Кроме того, на реализацию планов производителей урана влияли политические, социальные, экологические,

технические факторы. Снижение добычи в 2019 и особенно в 2020 году во многом обусловлено пандемией Covid-19, повлиявшей в той или иной степени почти на всех производителей.

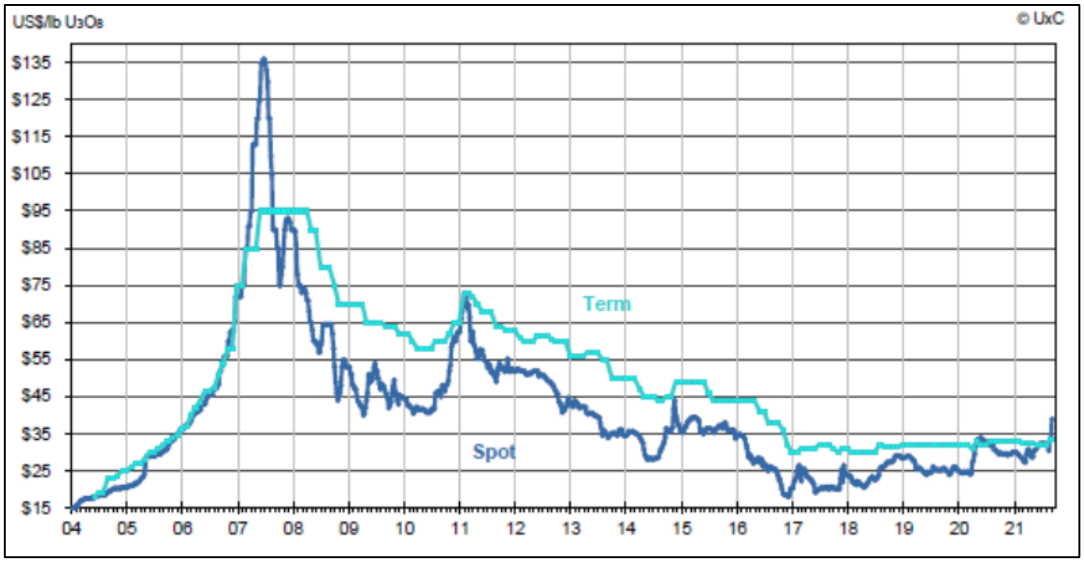


Рис. 2. Динамика мировых цен на уран (данные UxC Consulting, 2022 г.)

Рост спотовых цен на уран во второй половине 2021 года с 30 до 50 долларов за фунт дал положительный импульс для развития уранового бизнеса. Вместе с тем, он был вызван не фундаментальными факторами, а серией разовых закупок значительных количеств на споте трастовым фондом Sprott Physical Uranium Trust (SPUT).

Производство урана

Несмотря на глобальные вызовы, урановый рынок продолжает лихорадить, а низкие цены на уран долгое время не отвечали ожиданиям производителей, многие из которых сдерживали или вовсе останавливали некоторые рудники.

Неблагоприятные рыночные условия, усугубленные пандемией Covid-19, привели к снижению добычи урана на 25% за прошедшие пять лет – до 47,6 тыс. т в прошедшем 2020 году (рис. 3). Расходы на разведку и разработку месторождений сократились на 77%. Даже мировой лидер Казахстан, обладающий самой высокорентабельной сырьевой базой и продемонстрировавший шестикратный рост добычи урана за 10 лет, вынужден был сократить производство на 21% – с 24,7 до 19,5 тыс. т. Канада, державшая лидерство в 1990-х – 2000-х годах, снизила в этот период добычу на 72% с 14 до 4 тыс. т. Была приостановлена работа крупнейшего в мире канадского рудника Сигар Лейк, который совсем недавно производил 7 тыс. т. Одна из крупнейших горнодобывающих компаний мира Rio Tinto практически полностью вышла из уранового бизнеса. В 2019 году она продала свои акции в крупном намибийском руднике Россинг, который работал с 1976 года, китайской государственной

компании CNUC. Вслед за этим Rio Tinto в 2020 году остановила добычу, а в 2021 производство на крупном руднике Ranger в Австралии. Кроме того, в связи с исчерпанием запасов французская компания ORANO закрыла крупный урановый рудник Акута в Нигере, были остановлены два небольших рудника скважинного подземного выщелачивания (далее СПВ) в Казахстане. Производство урана в России с 2011 года поддерживалось на уровне 3000 тонн. За это время добыча урана методом СПВ увеличилась в два раза, составив в 2020 году 56% от общероссийской добычи.

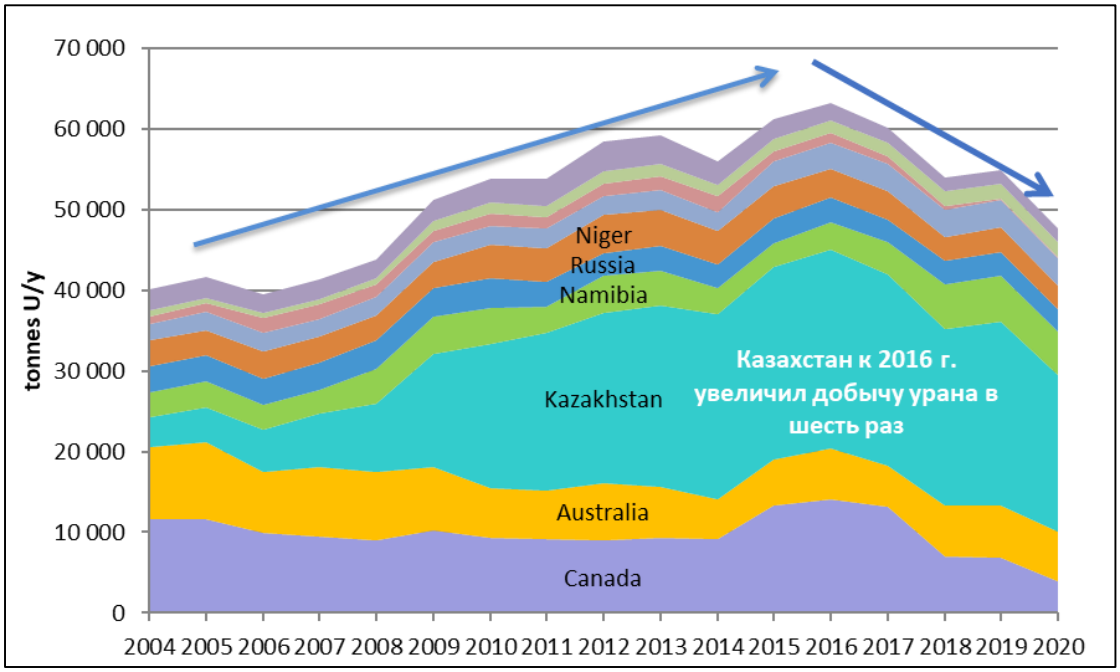


Рис. 3. Историческая добыча урана по странам

Только на руднике Хусаб в Намибии, принадлежащему китайской компании CGN, отмечался рост добычи урана.

В целом на урановом рынке сложилась нетипичная для добывающих проектов ситуация, когда главным резервом отрасли для будущего производства стали не разведанные и готовые к отработке месторождения, а остановленные законсервированные из-за низких цен предприятия. Всего с 2015 года законсервировано 15 урановых рудников суммарной мощностью 20 тыс. тонн [1].

Все это привело к тому, что после более чем десятилетнего периода избыточного предложения урана на рынке баланс начал выравниваться.

Вследствие неблагоприятного уранового рынка значительно сокращались инвестиции в геологоразведку как со стороны ведущих производителей, так и многочисленных компаний юниоров. Данные «Красной книги» [2] свидетельствуют об обвале расходов на урановую геологоразведку. В 2014 году общемировые затраты на геологоразведку и освоение новых рудников составляли более 2 млрд долларов. Уже в 2015 году они упали более чем вдвое, до 877 млн долларов. Падение

продолжилось, и в 2018 году они сократились до 500 млн долларов. При этом значительную долю в этом объеме занимали инвестиции китайской компаний CGN в освоение в 2015 и 2016 гг. рудника Хусаб в Намибии.

Лидером по инвестициям в геологоразведку остается Канада, а в ней бассейн Атабаска с давно известными сверхбогатыми по содержанию урана месторождениями типа несогласия. Затраты одной только Канады превышают совокупные затраты остальных пяти крупнейших стран-производителей. Канадские юниорные геологоразведочные компании, в отличие от других, продолжали активную геологоразведку в бассейне Атабаска.

В современных непростых условиях выживают компании с низкой себестоимостью добычи и с выгодными долгосрочными контрактами. Среди компаний – производителей урана Казатомпром прочно удерживает лидерство с 24% от общемировой добычи урана в последние годы. Росатом (Атомредметзолото и Uranium One) с 2019 года удерживает второе место с долей 14-15%, преследуемый китайскими компаниями CGN и CNNC (рис. 4).

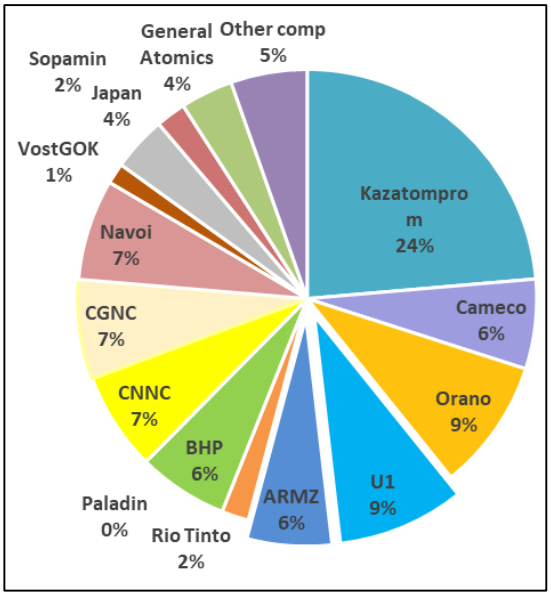


Рис. 4. Добыча урана компаниями в 2020 году (по доле владения)

С 2010 года скважинное подземное выщелачивание преобладает над другими способами добычи урана. Его доля в мировом производстве увеличилась с 20% в 2005 году до 56% в 2020, достигнув пика в 30 686 т урана в 2016 году (рис. 5).

Можно уверенно констатировать, что сегодня эра доминирования рудников скважинного подземного выщелачивания (СПВ) и Казахстана. В 2020 году из 32 действующих урановых рудников 20 добывали уран методом СПВ, причем 15 из них расположены в Казахстане [3]. Мощность рудников СПВ составляет половину от всех добывающих мощностей, а их запасы – 43% от общих разведанных запасов (табл. 1). Характерно, что в 2020 году лишь 20 рудников имели общую себестоимость производства ниже среднегодовой спотовой цены на уран; в их числе все казахстанские предприятия.

Если же заглянуть в будущее и проанализировать планируемые к освоению рудники, которые должны будут восполнять выбывающие добывающие мощности, то здесь уже преобладают крупные проекты в Канаде с месторождениями типа несогласия под традиционную подземную добычу и со значительно более высокой себестоимостью [3].

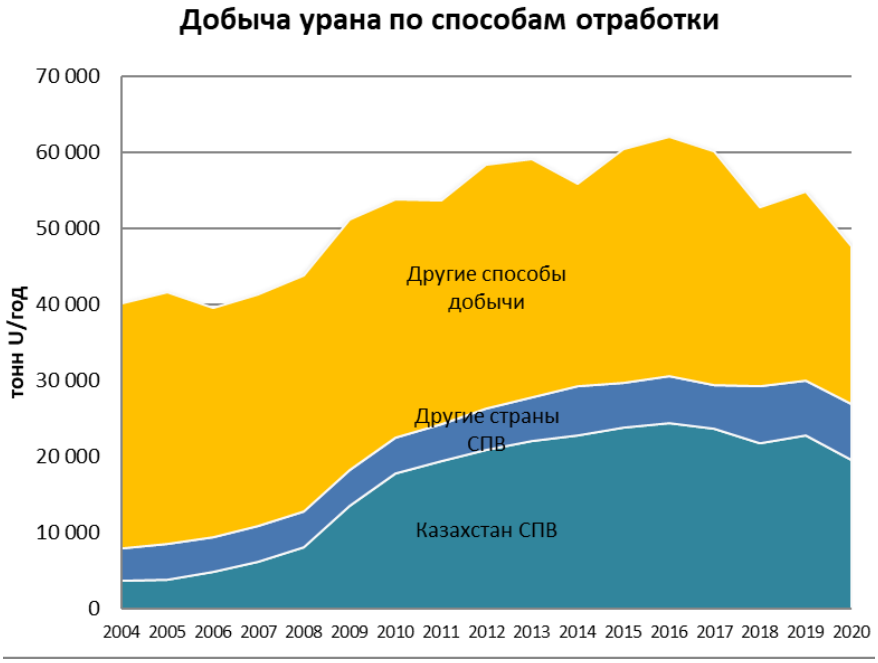


Рис. 5. Историческая добыча урана по способам отработки

Таблица 1

Характеристика действующих урановых рудников [2]

Способ добычи	Казахстан СПВ	Другие страны СПВ	Шахта, карьер	Всего
Себестоимость производства, долл./фунт U3O8	<22	19-40	25-82	
Количество рудников	15	5	12	32
Мощность, тыс. т	29,5	8,1	36,0	73,6
Запасы, тыс. т	449,5	243,5	720,7	1 632,2

Таблица 2

Характеристика планируемых новых урановых рудников [2]

Способ добычи	Канада шахта	Рудники СПВ	Прочие рудники	Всего
Себестоимость производства, долл./фунт U3O8	<45	21-54	35-82	
Количество рудников	6	15	19	40
Мощность, тыс. т	37,2	15,5	32,2	84,9
Запасы, тыс. т	347,8	185,5	557,9	1 091,2

Мировая сырьевая база урана

Срок отработки любого месторождения конечен, поэтому ключевым фактором устойчивого развития добычи урана является качественная сырьевая база. Согласно так называемой Красной Книге по урану МАГАТЭ-ОЭСР 2020 года [2], общий объем всех разведанных ресурсов составляет около 8 млн тонн и вполне достаточен для обеспечения будущих долгосрочных потребностей на следующие 50 лет. Вместе с тем, ресурсы низкой стоимостной категории менее 80 $/кг, являющиеся основой для планирования производства добывающих компаний, неуклонно сокращаются и составляют около четверти от всех ресурсов (рис. 6). За десять лет общие мировые запасы урана увеличились на 28%, а запасы категории <80 $/кг сократились на 44%. В категории <80 $/кг 90% запасов относятся к действующим и строящимся рудникам. Таким образом, значительная часть мировой ресурсной базы слабо разведана и относится к высоким стоимостным категориям. Это в полной мере относится и к России, которая занимает четвертое место в мире по количеству разведанных запасов, но в структуре сырьевой базы запасы категории <80 $/кг составляют только 8%.

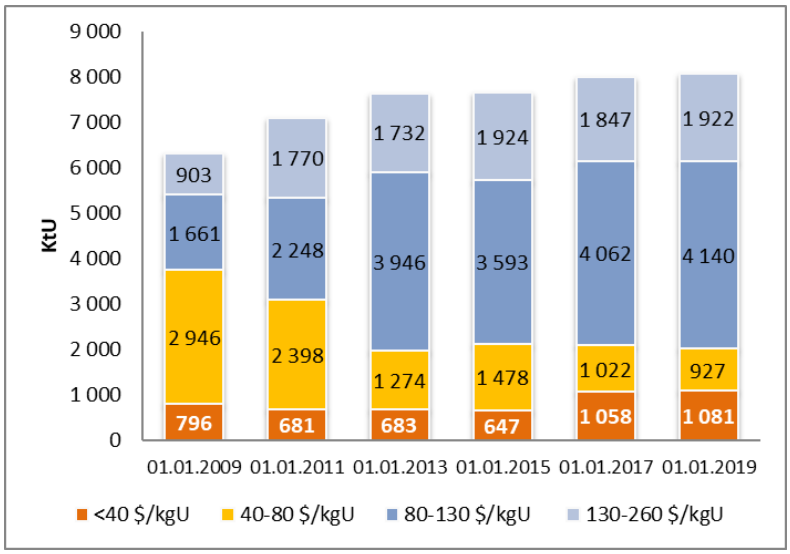


Рис. 6. Динамика изменения мировых запасов урана по ценовым категориям

Наибольший объем ресурсов (440 тыс. тонн) с себестоимостью до 80 долларов за килограмм урана связан с месторождениями песчаникового типа, пригодными для добычи методом скважинного подземного выщелачивания (СПВ). На втором месте в этой категории ресурсы месторождений типа несогласия для подземной добычи (403 тыс. тонн), а на третьем – полиметаллические месторождения брекчиевого комплекса, где уран добывают в качестве попутного к меди и золоту компонента (255 тыс. тонн). Все три метода добычи коррелируют с такими центрами добычи, как Казахстан, Канада и Австралия (конкретно – рудником Olympic Dam) соответственно.

Учитывая, что период от начала поисков до освоения месторождения составляет не менее 10 лет, чрезвычайно актуальной становится активизация урановой геологоразведки, нацеленной на открытие новых высококачественных месторождений.

Некоторые урановые открытия последней пятилетки

Большинство урановых открытий последних лет состоялись в пределах определившихся еще в 1970–80-е годы урановорудных районов. В последние двадцать лет поисковые работы не приводили к значимым открытиям новых месторождений песчаникового типа, связанных с региональными зонами пластового окисления для отработки СПВ. В основном осуществлялся перевод прогнозных ресурсов в разведанные запасы на ранее открытых месторождениях.

Вместе с тем, методика поисковых геологоразведочных работ на этот тип месторождений была успешно реализована советскими геологами и привела в свое время к великим открытиям крупнейших мировых урановорудных провинций в Казахстане и Узбекистане. Открытие новых месторождений данного типа можно ожидать также в Витимском районе (Россия), меловых впадинах Монголии и Китая, многочисленных осадочных бассейнах в Вайоминге и Техасе, бассейне Frome в Австралии. Результаты геологоразведки последнего десятилетия также позволяют положительно оценивать перспективы открытия новых урановорудных районов, связанными с отложениями системы Кару в странах центральной и южной Африки и бассейна Парана в Южной Америке.

Намибия

В 2010 году российские геологи АО Атомредметзолото и Всероссийского института минерального сырья в результате детального комплексного анализа геологической информации выделили в Намибии площади, перспективные на обнаружение месторождений казахстанского типа. Ранее эта часть страны на уран не изучалась и поисковые работы там не проводились.

В августе 2011 года созданной в Намибии компанией Headspring Investments Ltd. были получены лицензии на поиск цветных и редких металлов, так как в то время в Намибии существовал мораторий на выдачу новых геологоразведочных лицензий на уран. Принимая во внимание, что на начальной стадии комплекс поисковых работ на базовые и радиоактивные элементы во многом схож, компания приступила к поисковым работам. Уже в 2012 году редкой сетью разведочных скважин были вскрыты две перспективные на уран зоны, близкие по своим характеристикам к казахстанским. Несколько скважин вскрыли кондиционное урановое оруденение. Было не только доказано наличие уранообразующего процесса, но и выявлена руда, оценен сырьевой потенциал, а в северной части лицензионной площади удалось оконтурить перспективную площадь с прогнозными ресурсами.

Возобновление геологоразведочных работ на уран стало возможным в 2018 году после снятия правительством Намибии моратория на выдачу новых урановых лицензий. Проведенные в 2018-2020 годах лабораторные технологические испытания по выщелачиванию урана из руд подтвердили потенциальную возможность отработки месторождения методом скважинного подземного выщелачивания с использованием как кислоты, так и соды.

С 2019 года компания приступила к системной масштабной геологоразведке. По результатам оценены около 25 тыс. тонн ресурсов урана по категориям Indicated и Inferred и определен сырьевой потенциал порядка 40 тыс. тонн урана (рис. 7). Данные разведки 2021 года дают основания предположить, что выявленные ресурсы значительно увеличатся.

По геологическим характеристикам месторождения являются аналогами казахстанских пластово-инфильтрационных месторождений урана, контролируемых региональными зонами пластового окисления (рис. 8). По классификации МАГАТЭ это так называемые песчаниковые месторождения роллового типа. По сравнению с казахстанскими аналогами оно отличается неглубоким залеганием (до 150 метров) и крайне изменчивыми радиологическими характеристиками. Ключевым событием, подтверждающим технико-экономическую возможность применения метода СПВ, должен стать натурный опыт, который запланирован на 2022–2023 годы. Следует учитывать, что проект находится на ранней стадии геологоразведки и команде проекта предстоит решать сложные и нетривиальные задачи по разведке и подготовке к отработке месторождения.

Полученные результаты свидетельствуют о выявлении в Намибии крупного месторождения, потенциально пригодного для отработки методом скважинного подземного выщелачивания.

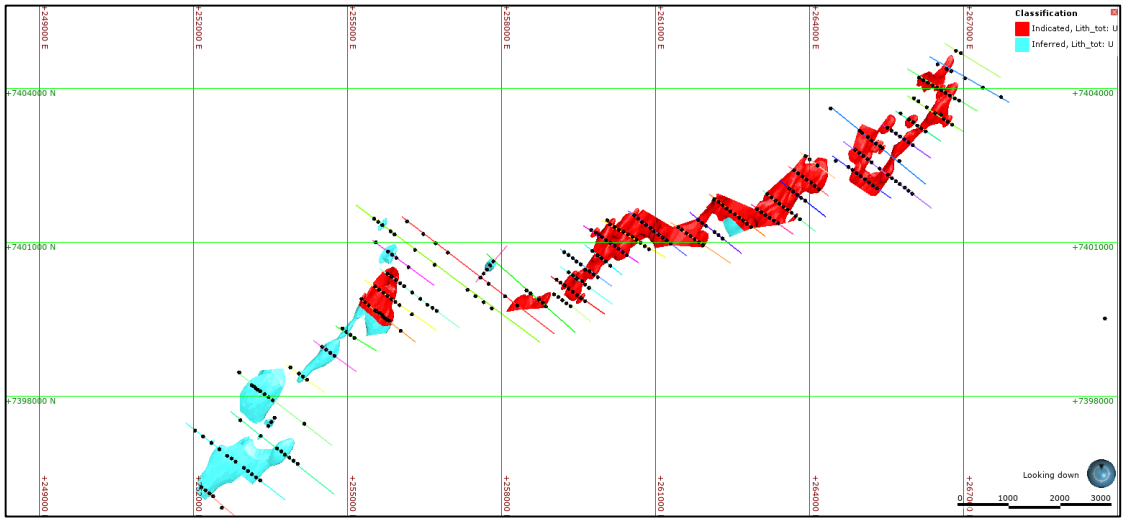


Рис. 7. План распределения ресурсов месторождения Крылья.
Красное – категория Indicated, голубое – Inferred

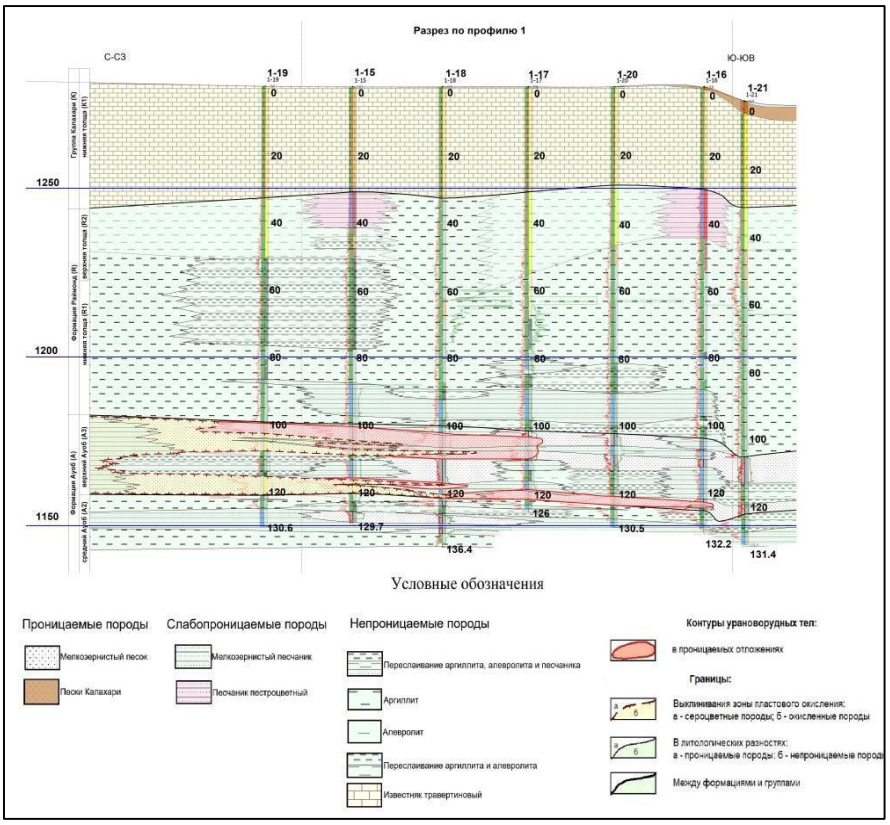


Рис. 8. Схематический геологический разрез через месторождение Крылья

Канада

Канадские месторождения типа несогласия со сверхбогатыми рудами отрабатываются уже более 40 лет как подземным, так и карьерным способами. Особенности геологического строения заключаются в локализации рудных залежей на контакте пород древнего архейского и протерозойского кристаллического фундамента и перекрывающих их протерозойских осадочных отложений. Подземная отработка некоторых наиболее крупных и богатых месторождений, таких, как McArthur River и Cigar Lake, осложнена сложными гидрогеологическими условиями и обильными водопритоками. Это вынуждало операторов внедрять сложные и дорогостоящие технологии, связанные с заморозкой околорудного пространства и последующим выбуриванием горнорудной массы.

Компания Denison Mines решила изучить возможность применения СПВ для отработки месторождения «типа несогласия» Феникс в Канаде со сверхбогатыми рудами [4]. Рудные залежи в проницаемых песчаниках на глубине 400 м содержат 27 тыс. т урана со средним содержанием 16,2% U. По данным опубликованного в 2018 году отчета уровня Pre Feasibilty Study планируется создание предприятия по СПВ урана производительностью 2300 т U/год со сроком отработки 10 лет. Начальные капитальные вложения оценивались в 323 млн долларов, общая себестоимость \$8,9lb U_3O_8, а операционная себестоимость \$3,3lb U_3O_8.

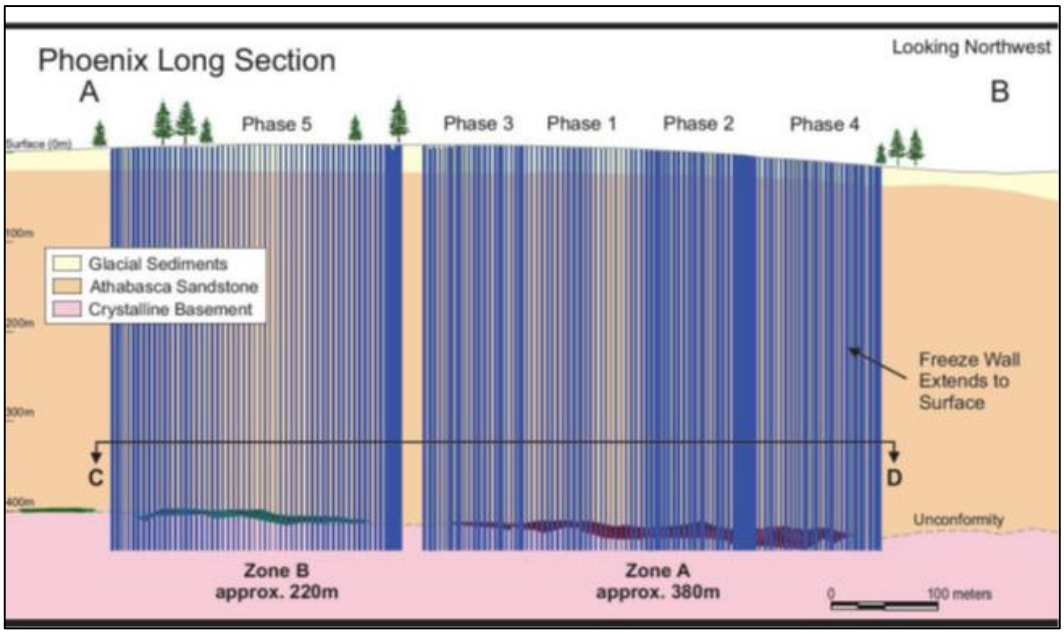


Рис. 9. Продольный разрез через месторождение Феникс.
Источник: https://www.denisonmines.com

Проведенные в 2019 году опытные гидрогеологические откачки подтвердили потенциал применения метода СПВ. По результатам лабораторных опытов по выщелачиванию урана в колонках получено извлечение урана свыше 90% при содержании урана в продуктивных растворах от 12 до 20 г/л.

Главной вехой, определяющей техническую осуществимость, оценку ключевых технико-экономических параметров, необходимых для успешной добычи, должен стать натурный опыт, который запланирован на 2022 год. Для гидроизоляции окружающей среды предусмотрено сооружение профилей вертикальных скважин, через которые будет осуществляться заморозка окружающую среды. Ожидается, что «…опытное выщелачивание станет ключевым этапом снижения рисков для проекта, поскольку оно предназначено на Phoenix», – отмечается в релизе компании.

Если компания докажет, что в бассейне Атабаска можно применять метод СПВ с себестоимостью производства, сопоставимой с казахстанскими рудниками, то это может привести к существенному росту потенциала освоения канадских месторождений.

Выводы

Эпоха «дешевого» урана на мировом рынке заканчивается. Спрос на природный уран уже через пять – семь лет может превысить предложение из известных источников.

Рост потребностей мировой атомной энергетики будет происходить на фоне выбытия крупных урановых проектов с низкой себестоимостью добычи и сокращения вторичных источников.

Мировые ресурсы урана низких стоимостных категорий недостаточны для обеспечения долгосрочных потребностей мировой атомной энергетики.

Существуют ограниченные возможностей по участию в новых зарубежных урановых проектах мирового уровня.

Приоритетными направлениями развития отечественной урановой промышленности следует считать открытие и ускоренное освоение новых высокорентабельных месторождений в России и за рубежом в определившихся странах–партнерах, обладающих благоприятным инвестиционным климатом.

Литература

1. The Nuclear Fuel Report. Global Scenarios for Demand and Supply Availability 2021-2040. World Nuclear Association, September 2021.

2. Uranium Production Cost Study. UxC special report, July 2021.

3. URANIUM 2020: Resources, Production and Demand. A joint report by the NEA and IAEA, OECD 2020.

4. Denison Mines web site (http://www.denisonmines.com). 2021 Presentations. Uranium development and exploration. October, 2021.

РОЛЬ ВИМСа В СТАНОВЛЕНИИ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ УРАНОВОЙ ГЕОЛОГИИ

И.Г. Печенкин
ФГБУ «ВИМС», г. Москва

Важным практическим шагом в решении проблемы отечественной сырьевой базы урана стало Распоряжение Государственного Комитета Обороны № 3834 сс от 30 июля 1943 г. «Об организации геологоразведочных работ, добычи урана и производства урановых солей». В этом документе, в частности, предписывалось создать при Всесоюзном институте минерального сырья специальный сектор, на который возлагалось обобщение материалов по поискам, разведке и изучению радиоактивного минерального сырья, научно-методическое руководство этими работами и детальное минералогическое и технологическое изучение руд урана и других радиоактивных элементов.

Для реализации этого задания ГКО в ВИМСе в августе 1943 г. был создан специальный сектор № 6 (начальник – М.Н. Альтгаузен, научный руководитель – Д.И. Щербаков). Сектору было предоставлено 15 штатных единиц, распределенных примерно поровну между его тремя отделами или кабинетами: геолого-минералогическим (рук. С.В. Культиясов), радиометрическим (рук. проф. В.И. Баранов) и технологическим (рук. проф. В.И. Спицин). Согласно тому же Распоряжению ГКО, сектор получил денежные средства, открытые ему по специальному счету. Тогда же при ВИМСе создается постоянно действующее консультативное бюро по вопросам сырьевой базы урана, в состав которого входят, в частности, академики В.И. Вернадский и С.С. Смирнов [1, 10].



Щербаков
Дмитрий Иванович



Альтгаузен
Михаил Николаевич

В этот начальный период ВИМС являлся единственной в Советском Союзе научно-исследовательской организацией, работавшей в области геологии, методики поисков и технологии переработки урановых руд. Деятельность института была весьма разноплановой: он создавал основы прогнозирования и поисков промышленных месторождений урана, изучал известные к тому времени и вновь открываемые месторождения,

разрабатывал радиометрическую аппаратуру и аналитические методы определения урана, проводил технологические исследования.

Задачи сектора № 6 не ограничивались научными разработками. При секторе впервые были созданы производственные геологоразведочные экспедиции, работавшие на уран. Поиски урана в середине 1940-х гг. начинались практически с чистого листа, и экспедиции ВИМСа стали настоящей кузницей кадров: через них прошло огромное количество геологов, геофизиков, гидрогеологов и других специалистов, создававших впоследствии минерально-сырьевую базу урана страны. Из их числа выросли крупные ученые, организаторы производства, первооткрыватели месторождений, лауреаты Ленинской и Государственной премий [10].

Почему именно ВИМС стал первым в славной плеяде научно-исследовательских и производственных организаций, создававших отечественную урановую минерально-сырьевую базу?

В 1907 г. в работу по изучению радиоактивности минералов включилась Академия наук. Было принято решение начать их систематическое изучение на территории России. В 1910 г. В.И. Вернадский представил в комиссию Академии документ «О необходимости исследования радиоактивных минералов Российской империи», которая положила начало Трудам радиевой экспедиции. В 1911–1916 гг. были организованы первые исследования радиоактивных минералов в Забайкалье, Закавказье, Фергане, на Урале, в которых приняли участие В.И. Вернадский, Я.В. Самойлов, К.А. Ненадкевич, В.А. Зильберминц, В.И. Крыжановский, А.Е. Ферсман, Н.М. Федоровский и др. В 1922 г. по инициативе и под руководством академика В.И. Вернадского путем объединения всех имевшихся к тому времени в Петрограде радиологических учреждений создан Государственный Радиевый институт. Он стал центром, в котором зародилась и проходила становление отечественная атомная наука и техника.

В январе 1923 г. в Государственном радиевом институте Верой Ильиничной Глебовой, курирующей от ВСНХ (Высший совет народного хозяйства) радиевую промышленность, было инициировано совещание, которое приняло решение об организации экспедиции в Туркестан для посещения месторождений радиоактивных металлов.

В годы НЭПа обсуждался вопрос об иностранных концессиях. В их числе могли оказаться и радиевые рудники в Фергане. В президиум ВСНХ в 1922 г. обратился Иван Яковлевич Башилов, заведующий действующим радиевым заводом. Он писал: «… в радии мы имеем ключ к внутриатомной энергии. Мы требуем, поэтому, отрицательного ответа». Его горячо поддержала В.И. Глебова. В итоге было принято постановление об объявлении радия и его руд государственной собственностью. И.Я. Башилов разработал и осуществил технологию переработки тюямуюнской руды до получения препаратов радия, урана и ванадия и это в тяжелейшие для страны 1920-е гг. [9].

Основная цель экспедиции – ознакомление с рудным полем месторождения Тюя-Муюн, а также с геологией и минералогией прилегающей части Южной Ферганы. В итоге предполагалось разработать общие направления научно-исследовательских и геологоразведочных работ в этом регионе, считавшимся многими специалистами малоперспективным. Тюя-Муюнский рудник, по словам Н.М. Федоровского, был под покровом некоторой таинственности в связи с тем, что запасы радия в Мире были ограничены (не более 500 г), а цена за один грамм составляла более 100 тыс. золотых рублей. Единственное крупное месторождение того времени в Иоахимстале (Чехословакия) было государственной собственностью, а новые объекты, открытые во время и после Первой Мировой войны, тщательно скрывались. Особенно оберегались способы извлечения радия. Поэтому месторождение Тюя-Муюн, являющееся до этого частной собственностью, было почти недоступно для геологов [11].

В состав экспедиции были включены от ВСНХ наблюдающая за радиевой промышленностью доктор естественных наук В.И. Глебова, от Радиевого института академик А.Е. Ферсман, член коллегии НТО ВСНХ профессор Н.М. Федоровский, хранитель Минералогического музея Российской Академии наук В.И. Крыжановский, заместитель директора ИПМ А.А. Мамуровский, научный сотрудник КЕПС при Российской Академии наук Д.И. Щербаков, уполномоченный представитель Бондюжских заводов по ведению радиевого рудника С.П. Александров.

И вот в апреле 1924 г. прибывшие в Ташкент посетили открытый в 1920 г. Среднеазиатский университет, ознакомились с коллекцией Горного музея, расположенной в бывшем доме генерал-губернатора («Белый дом»). Здесь они увидели прекрасные образцы фиолетово-синего флюорита, добываемого на недавно открытом месторождении близ селения Аурахмат, где работала одна из партий ИПМ. Сопровождал группу А.С. Уклонский, впоследствии академик АН Узбекистана, начинавший свою геологическую деятельность, после окончания в 1915 г. Московского университета, у В.В. Аршинова в «Литогеа».

Наконец экспедиция направилась к своей основной цели – месторождению Тюя-Муюн. Доехав на поезде до ст. Федченко, пересели на повозки и верховых лошадей. Едва прибыв на место, начали осмотр на поверхности добытой руды. Поразило обилие вторичной урановой минерализации. На следующий день, спустившись до главного забоя по древней шахте, вероятнее всего пройденной во времена арабского халифата для добычи меди, геологи приступили к изучению главной жилы. Была установлена приуроченность оруденения к прихотливым карстовым пустотам. Одновременно исследовались близлежащие пещеры, включая грандиозную Баритовую, которые выделялись широким распространением минералов бария.

В отчете, представленном Н.М. Федоровским по завершении работ, отмечалось, что был проведен осмотр рудного поля Тюя-Муюна,

осуществлено общее ознакомление с геологией и минералогией прилегающей части Южной Ферганы, и составлен план научно-исследовательской и поисково-разведочной деятельности. Экспедиция стала весомым вкладом ученых в развитие радиевой промышленности.



Тюя-Муюн (в «Баритовой» пещере, май 1924 г.).
Слева направо: В.И. Крыжановский, А.Е. Ферсман, А.С. Уклонский,
С.Р. Ивановский, Н.М. Федоровский, Д.И. Щербаков, С.П. Александров

Трудно переоценить деяния В.И. Глебовой (1885–1935) – выдающегося организатора отечественной науки и промышленности. К ним относятся: разработка и координация программы исследований в области редких элементов, решение проблем, связанных с организацией геологоразведочных экспедиций, созданием горнодобывающих и перерабатывающих предприятий, создание основ радиевой промышленности, участие в организации исследований по гелиевой проблеме и ряд других направлений, необходимых для растущих потребностей отечественной промышленности. Она сумела за короткий срок организовать научно-техническую базу по этим направлениям работ и привлекала к ним ученых, специалистов, отдельные лаборатории научно-исследовательских институтов и высших учебных учреждений [8].

Становление в 1920-х гг. в нашей стране производства радия, вольфрама, молибдена, селена, различных соединений редких элементов и препаратов на их основе целиком базировалось на исследованиях и технологических разработках, успешно выполненных отечественными учеными. На первом этапе работы были сосредоточены в Бюро по

исследованию и промышленному применению редких элементов при Научно-техническом отделе ВСНХ (БЮРЭЛ НТО ВСНХ) и в Отделе редких элементов Института прикладной минералогии.

В августе 1924 г. В. И. Глебова усиленно занималась созданием Отдела редких элементов в ИПМ, который позднее возглавила. Вере Ильиничне принадлежит создание программы исследований Отдела, ставшего одним из ведущих центров в области изучения редких элементов в нашей стране. Большинство исследований проводилось впервые в отечественной науке. Новый отдел взял на себя выполнение большого числа работ по договорам с промышленными предприятиями и ведомствами. Как руководитель Отдела редких элементов В. И. Глебова избирается членом коллегии Института прикладной минералогии и утверждается членом правления института.



Глебова Вера Ильинична

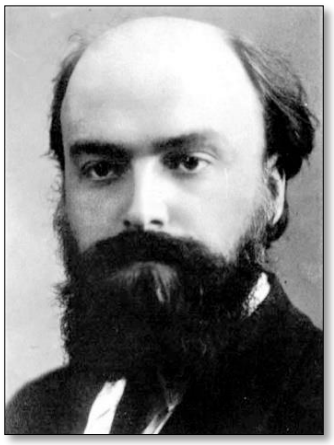
В процессе организации и самого развития научно-исследовательских работ в Институте прикладной минералогии формировался творческий коллектив ученых и специалистов. Лаборатория редких элементов стала активным центром, вокруг которого объединялись ученые, преподаватели ВУЗов, специалисты научно-исследовательских учреждений и промышленности. В.И. Глебова, А.Е. Ферсман и Н.М. Федоровский стали инициаторами созыва Первого Всесоюзного совещания по редким элементам, состоявшегося в апреле 1925 г. На нем была принята общая резолюция, рекомендации, которые легли в основу правительственных декретов и постановлений, положивших начало рождению и развитию отечественной редкометаллической промышленности. Отдельно на совещании обсуждалась проблема радия [8].

По предложению В.И. Глебовой в 1931 году был основан Государственный научно-исследовательский институт редких элементов Всесоюзного объединения редких элементов и тонкой металлургии ВСНХ СССР (Гиредмет); в 1931–1934 годах она была его директором.

Многогранная деятельность Веры Ильиничны оставила заметный след в годы становления отечественной промышленности. В это время неразрывна ее связь с ИПМ-ВИМСом, ведущим институтом в области изучения радиоактивного сырья, редких металлов, их поиска добычи и переработки. Многие талантливые исследователи прошли школу этого выдающегося организатора, неутомимого исследователя, умеющего доводить научные исследования до использования в промышленном производстве.

Как директор радиевой промышленности В.И. Глебова назвала отдельных ученых, научно-исследовательские учреждения и организации,

внесшие определяющий вклад в разработку технологии радиоактивных руд. Она особо выделяла В.Г. Хлопина, И.Я. Башилова и С.Л. Александрова.



Башилов Иван Яковлевич

Башилов Иван Яковлевич (1892–1953) – физикохимик и металлург, один из организаторов промышленного производства радия в СССР. Учился в Петроградском политехническом институте, но в 1919 г. по предложению В.Г. Хлопина прервал обучение в связи с необходимостью организовать работу экспериментального радиевого завода в г. Бондюга (ныне г. Менделеевск). В 1924 г. организовал и возглавлял до 1938 г. Лабораторию редких элементов в Институте прикладной минералогии. В 1929 г. экстерном защитил дипломную работу. В 1930 г. создал кафедру химии и технологии редких и рассеянных элементов в Московском институте тонкой химической технологии. Одновременно (с 1932 г.) научный руководитель Института редких металлов (Гиредмет). Основное направление работ – химия и химическая технология редких и радиоактивных элементов.

Еще в 1921 г. он предложил технологию извлечения радия, урана и ванадия из отечественного сырья. Занимался созданием методов получения редких металлов как легирующих компонентов. К началу 1922 г. И.Я. Башилов разработал и внедрил в заводском масштабе технологию переработки тюямуюнской руды до получения препаратов радия, урана и ванадия. Им была спроектирована и пущена на Бондюжском радиевом заводе установка, рассчитанная на производство 2 г радия-элемента в год [9].

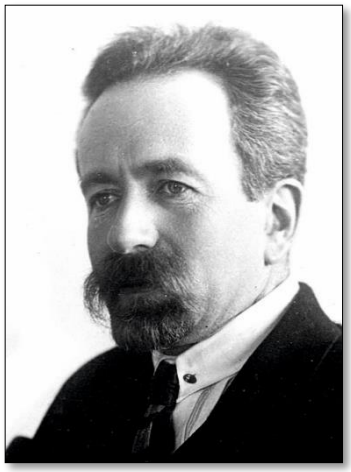
Иван Яковлевич – созидатель исключительного масштаба. В нем сочетались талант исследователя и инженера, организатора производства и выдающегося естествоиспытателя. Сегодня можно с уверенностью говорить о том, что без технологических экспериментов, осуществленных его коллективом в 1920–1930-х гг. в ИПМ и Гиредмете, вряд ли удалось бы быстро развернуть масштабное производство урана, которое, в конечном счете, десятилетия обеспечивало паритет нашей страны в окружающем мире.

В 1927 г. Иван Яковлевич был командирован в Германию и Чехословакию, где изучал опыт, накопленный этими странами в производстве редких металлов. В отчете о командировке отмечалось, что советских специалистов принимают как весьма серьезных конкурентов, стараясь показывать им производство лишь фрагментарно, чтобы они не могли составить себе цельную картину. Наша страна начинала всерьез выходить на мировой рынок со своей продукцией, со своей технической мыслью, и это внушало тревогу тем, кто привык владеть монополией на сложные отрасли производства [2].

И.Я. Башилов химию и технологию редких элементов характеризовал как область исключительной динамичности во всех отношениях. По его мнению, от соответствующего специалиста требуется умение разбираться в вопросе и переключаться с одних направлений технологии на другие, сильно от них отличающиеся и базирующиеся на нескольких иных физико-химических основаниях. Исследователь и технолог в этой области должны быть постоянно спаяны [3].

Совместно с И.Я. Башиловым у истоков работ по получению советского радия и урана стоял выдающийся геохимик, минералог, доктор геолого-минералогических наук, профессор В.А. Зильберминц (1887–1939). В 1923 г., по приглашению одного из организаторов Института Прикладной Минералогии Я.В. Самойлова, Вениамин Аркадьевич зачислен в институт штатным сотрудником для изучения осадочных пород. В ИПМ он продолжил исследования минералов урана, начатые им еще до революции в Радиевой экспедиции. Ведь еще будучи студентом летом 1910 г. он был направлен Императорским Санкт-Петербургским обществом естествоиспытателей (СПбОЕ) в Ферганскую область для сбора радиоактивных минералов.

С осени 1925 по 1930 годы В.А. Зильберминц – заведующий Геохимической лабораторией Института. Его научные интересы в 1930-е годы сосредоточились на минералогии и геохимии редких и рассеянных элементов, столь нужных тогда промышленности. Он исследует месторождения Урала, Таджикистана, Ферганы, Памира. Работая в 1933–1934 гг. в Таджикско-Памирской экспедиции, открывает под Самаркандом месторождение уран-ванадиевых руд – Агалык [4, 5].



Зильберминц Вениамин Аркадьевич

Зильберминц отмечал, что систематические поиски радиевых руд на территории СССР тогда еще не были организованы. Однако нахождение в Ферганской долине целой области урановых руд, предвиденных В.И. Вернадским еще в 1914 г., нашли подтверждение. Были установлены две точки с проявлением уранованадатов (Бель-Урюк и Кара-Чагыр), а позднее выявлена целая полоса сходных месторождений, получившая название «коловратитовой» (по названию преимущественно распространенного здесь минерала коловратита, представляющего ванадат никеля). Эта полоса протягивается от Бель-Урюка почти до Ходжента. На значительном пространстве Средней Азии ванадий вместе с ураном дает многочисленные месторождения минералов тюямуюнито-карнотитового ряда, которые представляют продукт выделения из растворов, проникших в самые разнообразные горные породы, иногда в карстовые полости известняков, в трещины сланцев и т.д. [6].

Как пример предвидения В.И. Вернадского, Вениамин Аркадьевич отмечал открытие им месторождения Агалык на контакте известняков и гранитов с широким развитием минерализации в трещиноватых палеозойских сланцах. И другое месторождение, открытое летом 1934 г. геологами Е.Я. Орловским и Ю.М. Голубковой в 70 км к северу от г. Андижан на р. Майли-Су. Он особо отметил, что это первая находка, приуроченная к известнякам третичных отложений. Во время посещения объекта (в октябре 1934 г.) им было установлено, что контрастное оруденение связано с трещиноватыми разностями известняков, а в более плотных разностях оруденение менее значительно. Он писал: «… условия залегания и характер образцов руды дают большое основание отнести месторождение к разряду промышленных». Направление дальнейших поисков уранованадиевых месторождений В.А. Зильберминц связывал с поисками аналогов месторождений Майли-Су, Тюя-Муюна, Агалыка, а также аналогов роскоэлитовых месторождений Колорадо [7].

По его мнению, интерес представляют также мезозойские и третичные отложения Предуралья, где выявлены значительные скопления хромового минерала – волконскоита, которые обязаны своим происхождением выносу с Уральского хребта. Он считал, что следует задуматься и над судьбой других редких элементов, которые также должны в немалых количествах выноситься оттуда же. «Открытым остается лишь вопрос об условиях отложения рудных масс. Существовала ли для этого благоприятная обстановка, в какое время и где, сохранились ли в дальнейшем эти отложения – вот вопросы, которые теперь предстоит поставить и попытаться разрешить» [7]. Эти процессы получили подтверждение в последующие годы [12].

В середине 1930-х гг. специалисты ИПМ продолжали изучение радиоактивных элементов в тесном сотрудничестве с Геолкомом, Гиредметом и АН СССР. В первую очередь это относится к исследованию технологических свойств комплексных урановых руд. Именно здесь были достигнуты значительные успехи.

В 1934 г. состоялась значимая поездка в Карамазарский рудный район [11]. Из Ташкента небольшая группа, в которую входили А.Е. Ферсман, Д.И. Щербаков и Н.М. Федоровский, на автомобиле добралась до г. Ходжент. Сопровождал приехавших крупнейший знаток Карамазарских месторождений, участник разведки многих из них – Б.Н. Наследов. Кроме Тюя-Муюнского рудника, экспедиция ознакомилась с Табошарским рудным полем, где была установлена радиоактивность ряда рудных интервалов. Шахтные воды Табошарского рудника были высокорадиоактивны, гораздо контрастнее всех известных в то время. После остановки Тюя-Муюнского рудника урановое оруденение Табошара стало приобретать промышленный интерес. Был построен опытный завод, на котором по методу Н.Я. Башилова успешно осуществлялось получение радия из местного сырья. Было посещено и значительное по тем временам месторождение

висмута – Адрасман. Построенный позднее рудник и обогатительная фабрика позволили наладить отечественное производство необходимого сырья и полностью освободиться от импорта. Отметим участие сотрудников ИПМ на отдельных месторождениях тех лет: на Табошаре совсем еще молодого В.Г. Мелкова, на Уйгурсае Я.Д. Готмана и др.

В дальнейшем, в середине 1940-х гг., этот регион становится одним из основных по добыче урана для создания отечественного ядерного оружия.

1920–1930-е гг. для ИПМ стали начальным этапом становления технологии извлечения радия, урана и ванадия из отечественного сырья. Это было время, когда участники первых радиевых экспедиций, сотрудники института (В.А. Зильберминц, Н.М. Федоровский) использовали свои знания по геологии и минералогии радиоактивных руд в практике научных исследований. Постепенно расширялся круг специалистов, привлекаемых к новому направлению геологических работ. Поэтому к началу 1940-х гг. именно в ВИМСе (ранее ИПМ) сложился коллектив, готовый начать решение сложнейшей задачи по созданию отечественной минерально-сырьевой базы урана.

Литература

1. *Бастриков Ю.Л., Печенкин И.Г.* Путь к отечественному урану (к истории геологоразведочных работ на уран) // АНРИ. № 2 (85). 2016. – С. 65-71.
2. *Башилов И.Я.* Технология радиоактивных руд. – Л.: Науч. химико-технич. изд-во: Науч.-технич. упр-ние В.С.Н.Х., 1927. – 96 с.
3. *Башилов И.Я.* Введение в технологию редких элементов. – М., Л.: Государственное химикотехнологическое издательство, 1932. – С. 243.
4. Вениамин Аркадьевич Зильберминц. Материалы к библиографии ученых ВИМСа. Вып. 2 / Науч. ред. И.Г. Печенкин. – М.: РИС ВИМС, 2017. – 217 с.
5. *Зильберминц В.А.* Урано-ванадиевое месторождение близ Самарканда // Таджикско-Памирская экспедиция 1934 г. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1935. – С. 197-207.
6. *Зильберминц В.А.* Руды радия // Социалистическая реконструкция и наука. 1935. Вып. 4. С. 117–121.
7. *Зильберминц В.А.* Руды ванадия // Социалистическая реконструкция и наука. 1936. № 8. С. 33-42.
8. *Ламан Н.К.* Вера Ильинична Глебова: выдающийся организатор советской науки и промышленности. АН СССР. – М.: Наука, 1987. – 190 с.
9. *Погодин С.А., Либман Э.П.* Как добыли советский радий / 2-е изд., испр. и доп. – М.: Атомиздат, 1977. – 248 с.
10. Урановой геологии ВИМСа – 70 лет / Гл. ред. Г.А. Машковцев. – М.: РИС ВИМС, 2013. – 160 с.
11. *Федоровский Н.М.* По горам и пустыням Средней Азии. – М.; Л.: Онти. Глав. ред. науч.-попул. и юношеской лит-ры, 1937. – 183 с.
12. *Халезов А.Б.* Уран и медь верхнепермской красноцветной формации Предуралья: (парагенетические связи) // Минеральное сырье. Вып. 37. – М.: ВИМС, 2019. – 141 с.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МИРОВОЙ И РОССИЙСКОЙ УРАНОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

А.В. Тарханов[1], Е.П. Бугриева[2]
1 – АО «ВНИИХТ», г. Москва,
2 – АО «ВНИПИпромтехнологии», г. Москва

В 2020 г. мировое производство урана снизилось на 25 % по сравнению с 2016 г. Глобальными причинами являются падение цен на уран, не устраивающее основных производителей, снижение спроса на электроэнергию в условиях экономического кризиса и пандемии, затруднившей перемещение массы сотрудников, работающих вахтовым методом на крупных урановых рудниках (табл. 1).

Таблица 1

Причины снижения производства урана [1]

Основные производители, снизившие производство	Производство, тыс. т U			Приостановленные месторождения	Локальные причины	Возможность МСБ для годового производства
	2016	2018	2020			
Казахстан	24,7	21,7	19,5		Постановление о снижении производства	2020 – 25 2030 – 12 2040 – 5
Канада	14,0	7,0	4,0	Сигар Лейк РэббитЛейк Мак Артур Ки Лейк	Низкие цены на уран, пандемия	20
Намибия	3,6	5,5	3,4	ЛангерХейнрих	Низкие цены, нехватка воды, пандемия	10
Нигер	3,5	2,9	2,5	Азелик	Низкие цены, терроризм, пандемия	10
Украина	1,0	0,8	0,6	Ватутинское Мичуринское	Забастовки, исчерпание запасов	3
США	1,0	0,8	0,07	5 м-ний СПВ	Низкие цены	5
Всего	63,0	53,5	47,5	13 месторождений		>100

Снижение производства не связано с состоянием МСБ урана, и в благоприятных экономических условиях производство может быстро восстановиться. Тем более, что главное препятствие устранено: в сентябре 2021 года цены на уран повысились до 130 USD/кг U. Возобновление работ на 12 месторождениях Канады, Австралии, Намибии, Нигера, Малави и США добавит к текущему производству 27,4 тыс. т урана.

Потребности в уране стали трудно предсказуемыми из-за колебаний спроса на электроэнергию, неопределенности по срокам внедрения замкнутого цикла, конкурентоспособности АЭС с другими источниками энергии и отношения общественности к ЯЭ.

На 01.01.2019 в мире работало 450 реакторов установленной мощностью 396,3 ГВт. Потребности в уране – 59,2 тыс. т. Строилось 55 реакторов. На МОХ-топливе работало 29 реакторов. Наибольшие мощности реакторов сосредоточены в США, Франции, Китае и России (табл. 2).

Таблица 2

Мощность реакторов и потребности в уране

Страна	Количество реакторов	Установленная мощность, ГВт	Потребность в уране, т U
США	98	99	19300
Франция	58	63	7370
Китай	46	43	6865
Россия	36	29	5000

По прогнозу Всемирной ядерной ассоциации (WNA) потребности в уране к 2040 г. достигнут 100 тыс. т.

Цены на уран спотовые и долгосрочные в течение пяти лет (2017-2021) находились на низком уровне, не устраивающем крупных производителей (52-88 USD/кг U). Они вынуждены были демонстративно сократить производство урана.

Если в 1988-2012 гг. отмечалась закономерная зависимость цен на уран от соотношения объемов производства и потребностей, то, начиная с 2013 г., эта зависимость была нарушена и, несмотря на дефицит урана, цены на это никак не реагировали [2] (табл. 3, рис. 1).

Таблица 3

Соотношение потребностей, производства (тыс. т U) и цены на уран (USD/кг)

Показатели	2012-2020								
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Потребность	60	59,3	55	57	60	60	59,2	65	68
Производство	58,3	59,3	55,9	60,1	63	60	53,5	54	47,5
Дефицит/избыт.	-1,7	0	+0,9	+3,1	+3	0	-5,7	-11	-20,5
Цена	116	118	109	105	96	91	87	80	77

Показатели	2025-2040 (прогноз)			
	2025	2030	2035	2040
Потребность	67,4	79,7	90,8	100,3
Производство	81,6	80,3	83,5	73,2
Дефицит/избыт.	+14,2	+0,6	-7,3	-27,1
Цена	?	?	?	?

Все специалисты знали, что цены на уран должны повыситься, но когда и на сколько – никто не пытался предсказать, так как все предыдущие прогнозы не оправдывались. К середине 2021 г. дефицит урана вырос до 13,9 тыс. т (производство 53,4 тыс. т, потребность 67,3 тыс. т). В это время в Торонто (Канада) был создан инновационный фонд «Sprott Physical Uranium Trust» (SPUT) с суммой инвестиций 1 млрд USD, скупавший уран, что

привело к резкому повышению спотовых цен. С середины августа до 22 сентября 2021 г. спотовые цены на уран выросли с 88 до 131,3 USD/кг.

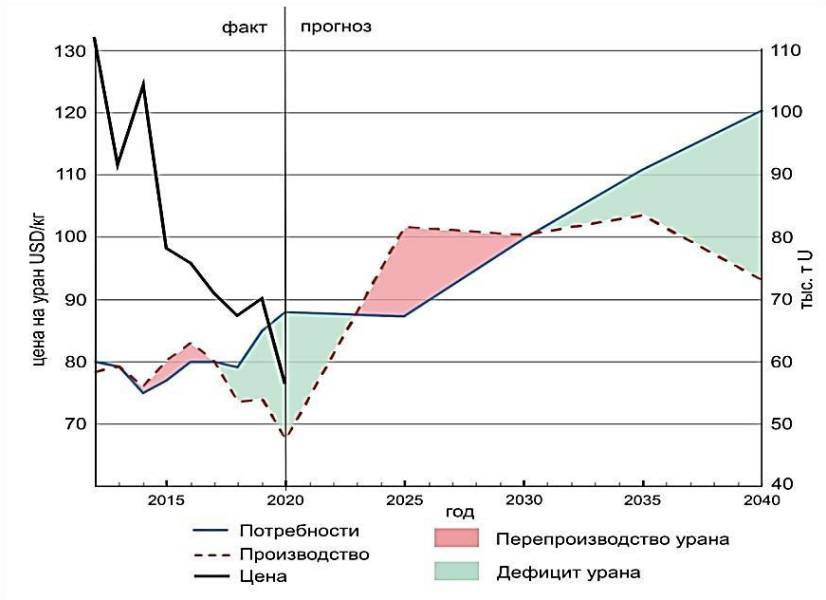


Рис. 1. Соотношение потребностей, производства и цены на уран в 2012-2040 гг.

Все эти годы основные потребители урана продержались за счет накопленных складских запасов и диверсификации источников снабжения [1, 2].

К 2019 г. складские запасы урана ЕС достигли 49 912 т, США – 50 200 т, Китая – 139 000 т. ЕС имеет контракты на поставку урана с 11 странами, США – с 7 странами. В обоих случаях ведущую роль по поставкам урана играет Россия.

На последних экологических форумах принималось решение довести выбросы CO_2 до нуля. Решение этой проблемы поддержали США, ЕС, Китай и Россия, включившие ядерную энергетику в плане финансирования борьбы за экологическую безопасность. Благодаря этому отношение к ЯЭ общественности значительно улучшилось (табл. 4).

АЭС немного дешевле ТЭС на органическом топливе, но занимают значительно меньшую площадь и не выбрасывают газы в атмосферу. Улучшившееся отношение крупных государств и общественности будет способствовать успешному развитию ядерной энергетики.

В России все сегменты ядерной энергетики характеризуются неопределенностью и непредсказуемостью. Все ранее сделанные прогнозы о производстве и потребностях в уране не подтвердились. Нет ясности об объемах вторичных ресурсов. А без знания объемов вторичных ресурсов трудно определить необходимый объем производства.

По классификации МАГАТЭ Россия относится к группе стран крупных производителей и потребителей урана, для которых главной задачей является обеспеченность ураном своей ядерной энергетики и выполнение взятых на себя обязательств по снабжению ураном других стран, имеющих реакторы, построенные российскими и советскими специалистами. При наличии

запасов только высоких ценовых категорий (более 80 USD/кгU) Россия будет вынуждена разрабатывать даже нерентабельные месторождения. Обеспеченность важнее цены. Цена природного урана составляет всего 10-12 % от общих затрат на электроэнергию.

Таблица 4

Преимущества АЭС перед другими источниками энергии

Сравнительные показатели	АЭС	ТЭС на органическом топливе			Электростанции с возобновляемым источником энергии		
	U, Th	уголь	нефть	газ	ГЭС	ВЭС	СЭС
Стоимость электроэнергии	2,2	2,8	2,3	2,3	1,0	4,9	0
Продолжительность надежного снабжения, лет	55	270	45	60	не огранич.	не огранич.	не огранич.
Занимаемая площадь, км^2/1 ГВт	0,6	2,4	0,9	1,9	270	170	100
Выброс CO_2 при производстве 1кВт/час	0	1290	940	1234	410	75	279
Годовой выброс диоксида серы, т	0	165000	13000	13000	0	0	0
Годовой выброс оксидов азота, т	0	21	22	0,01	0	0	0

Отношение к урановой отрасли неоднократно изменялось. Минатом планировал в 2001 г. довести мощность реакторов до 90 ГВт и добычу урана до 18 тыс. т [4]. В 2006 г. был утвержден план совместных действий МПР и Росатома [5]. К 2009 г. был достигнут максимум ассигнований на поисково-разведочные работы на уран – 294 млн USD. Были взяты лицензии на разведку и отработку золото-урановых месторождений Эльконского рудного района и нескольких месторождений Забайкалья. Но к 2013 г. политика Росатома резко изменилась, и бюджетные ассигнования снизились к 2019 г. до 9,4 млн USD. В марте 2018 г. руководство ГК «Росатом» заявило, что добытого урана хватит на тысячи лет («Страна Росатом», № 8 (328)). В этих условиях производство урана в России уже многие годы находится на низком уровне (3 тыс. т), недостаточном даже для снабжения собственной ядерной энергетики (табл. 5).

Таблица 5

Производство урана в России (2014-2019) [6]

Организация	Способ добычи	2014	2015	2016	2017	2018	2019
ПАО «ППГХО»	Горный, КВ	1970	1977	1883	1631	1456	1300
АО «Далур»	СПВ	578	590	592	592	590	600
АО «Хиагда»	СПВ	443	488	540	694	858	1000
Всего		2981	3055	3005	2917	2904	2900

В 2018 г. от СП с Казатомпромом (КАП) в Россию поступило 4386 т, вместе с собственным это составило 7290 т урана.

Производство урана в России может увеличиться за счет освоения резервных месторождений Эльконского района и Забайкалья (Оловское, Горное, Березовое). Кроме того, в России известно 159 урановых месторождений, из которых по оценке АО «ВНИИХТ» и АО «ВНИПИпромтехнологии» можно выбрать около двух десятков месторождений, рентабельных для отработки, с которых можно получить 2,5-3 тыс. т урана [2]. По оценке ВИМС [7] на малых месторождениях реально можно производить до 2000 т урана.

На действующих месторождениях прогноз производства урана сделан С.В. Полонянкиной [8].

Казатомпром объявил о постепенном снижении добычи уран (табл. 6).

Таблица 6

Прогноз КАП по производству урана в Казахстане и поставкам урана с СП в Россию, тыс. т U [1]

Страна	2020	2025	2030	2035	2040
Казахстан	26,0	25,0	22,0	12,0	5,0
СП с Россией	5,2	5,0	4,4	2,4	1,0

Казахстан в Россию поставляет 20 % от производимого в Казахстане урана. Такую пропорцию предполагается сохранить до 2040 г. Всего в Россию в 2035-2040 гг. может поступить до 15 тыс. т (табл. 7).

Таблица 7

Прогноз производства урана в 2035-2040 гг.

Предприятие	Годовая производительность, т
ПАО «ППГХО» АО «Далур» АО «Хиагда» ЗАО «Оловский ГОК» АО «Горное» АО «Эльконский ГМК» Частные предприятия (разработка малых месторождений)	2000 500 1000 700 800 6000 2000
Всего	13000
СП с КАП	2000
Итого	15000

Дефицит урана при недостаточном производстве должен компенсироваться вторичными ресурсами. Заявления руководства Росатома о неограниченности вторичных ресурсов («добытого урана хватит на тысячи лет») объясняется преувеличением сроков введения реакторов на быстрых нейтронах. Но, по мнению крупного специалиста, главного технолога проектного офиса «Новая платформа» В. Тролинова: «Реальное внедрение реакторов на быстрых нейтронах, если начнем сегодня, состоится

только в середине века» (Атомный эксперт, 2017, 3 8 (591)). Это утверждение подтверждено недавним постановлением правительства о строительстве опытного образца реактора на быстрых нейтронах к 2030 г. К настоящему времени, когда исчерпаны складские запасы урана, реальным остается получение из вторичных ресурсов урана при переработке ОЯТ (RepU) – 1300 т и из ОГФУ – порядка 2-3 тыс. т урана в год.

Трудности прогноза потребностей ЯЭ России связаны с неопределенностью электропотребления, конкуренцией с другими источниками энергии и ограничениями избыточных мощностей реакторов, удорожающих тарифы на электроэнергию АЭС. Потребности в уране для ЯЭ в 2018 г. составили 5000 т. Работало 35 реакторов установленной мощностью 29,1 ГВт, строилось 6 реакторов.

В России в 2019 г. отмечался избыток мощностей на всех видах электростанций, в том числе и на АЭС, в 48 ГВт. Новая инновационная программа предусматривает рост цен на избыточную мощность до 1 млн рублей на 1 МВт в месяц. Например, ввод двух блоков на Курской АЭС приведет к росту тарифов на электричество на 4%. Поэтому главной задачей является не ввод новых мощностей, а модернизация действующих. На АЭС концерна «Росэнергоатом» работает 35 блоков: 20 блоков с реакторами ВВЭР, 13 канальных блоков РБМК и 2 блока на быстрых нейтронах. Планируется снять с эксплуатации канальные реакторы и часть блоков ВВЭР и заменить их реакторами нового поколения ВВЭРIII+. Когда это произойдет, точно неизвестно. Предполагается, что потребность в уране в 2035-2040 гг. не превышает 6-7 тыс. т в год. В обязанности России по старым контрактам входит снабжение ТВС реакторов, построенных российскими (советскими) специалистами (табл. 8).

Таблица 8

Общие потребности России в уране, тыс. т

Статьи расходов	2018-2021	2035-2040
АЭС России	5,0	6-7
АЭС стран с российскими (советскими) реакторами (Украина, Армения, Болгария, Венгрия, Румыния, Словакия, Чехия, Финляндия, Иран)	5,1	5-12
Всего	10,1	11-19
Строящиеся АЭС в Иране, Китае, Индии, Белоруссии, Бангладеш, Турции общей мощностью 17,2 ГВт	3,3	3,3
Экспорт природного урана и НОУ в США, ЕС и другие страны	6,0	2-4
Всего	19,4	24,3-26,3
АЭС, планируемые за рубежом по «Стратегии-2018», мощностью более 100 ГВт		20

Соотношение потребности и производства урана показывает большой дефицит урана, который невозможно компенсировать вторичными ресурсами (табл. 9).

Таблица 9

Соотношение потребностей и производства урана, тыс. т

Показатели	2018-2021	2035-2040
Потребности АЭС России и стран с российскими (советскими) реакторами	10	11-19
Производство	7	5,5-15
Дефицит	3	13,5-4
Потребности АЭС России и стран с российскими (советскими) реакторами с учетом экспорта - на АЭС за рубежом -экспорт в США, ЕС и другие страны	19,3 3,3 6,0	26,6-24,6 3,3 2-4
Дефицит	12,3	11,6-9,6

Даже если производство урана вырастет до 15 тыс. т, дефицит урана без учета экспорта снизится до 4 тыс. т, а с учетом экспорта до 11,6-9,6 тысяч тонн. Следовательно, без освоения резервных месторождений, прежде всего Эльконского района, преодоление дефицита не представляется возможным.

В 1960-70-х годах АО «ВНИИХТ» разработал базовую технологию переработки трудновскрываемых золото-урановых руд Эльконского рудного района, которая была принята при утверждении запасов ГКЗ СССР в 1980 г. На новом этапе (2000-2015 гг.) в задачу института входило совершенствование технологии с целью снижения себестоимости. На пробах весом 1-2 т, отобранных из рудных отвалов, было разработано несколько вариантов технологических схем, но работы не были завершены из-за прекращения финансирования. Параллельно в сырьевых отделах разрабатывалась альтернативная технология переработки руд (Ю.А. Меньшиков, О.К. Крылова, И.Г. Балакина, А.В. Заварзин, А.В. Тарханов, А.С. Шульгин), основанная на радиометрическом обогащении, окислительном обжиге и кучном выщелачивании огарков. Она включает в себя все звенья освоения месторождений от нового подсчета запасов, добычи, обогащения и переработки руд.

1. Выбор участков, благоприятных для первоначальной отработки [9, 10].

В зонах Южная и Северная выделено 5 участков, расположенных выше отметки -100 м, с относительно богатыми рудами (ОБР) (табл. 10).

В 5 км юго-западнее месторождения Элькон расположен участок площадью 24,7 км^2, названный Надеждинским рудным полем (НРП). 70% запасов расположено выше штольневых горизонтов, среднее содержание урана в рудах в 1,5 раза выше, чем в Южной зоне. Запасы урана составляют 17,7 тыс. т (табл. 11).

На месторождениях НРП можно добывать 600 т урана в год, а всего на месторождениях Эльконского района до 6000 т в год.

Таблица 10

Запасы и среднее содержание урана в рудах пяти участков

Участки	Запасы, тыс. т	Среднее содержание урана, %	Планируемая годовая производительность, т
Элькон	19,8	0,196	1000
Эльконское плато	17,7	0,174	900
Курунг	14,0	0,186	700
Дружное	15,9	0,172	800
Всего по зоне Южной	67,4	0,182	3400
Центральный зоны Северной	24,0	0,180	1000
Всего	91,4	0,182	4400

Таблица 11

Запасы и среднее содержание урана в рудах НРП

Месторождение	Руда, тыс. т	Уран, т	Среднее содержание урана, %
Надеждинское	2873	5639	0,196
Интересное	944	4476	0,474
Зона 510	2221	3620	0,163
Зона 511-565	461	1272	0,276
Зона 517	350	808	0,231
Зона 566	977	1856	0,190
Всего	7826	17671	0,226

2. Технологическая схема переработки окисленных приповерхностных руд [11]. Схема включает радиометрическое обогащение ураносодержащих руд и раздельное кучное выщелачивание золотых и золото-урановых руд (последовательное цианирование Au и Ag и кислотное выщелачивание U).

3. Технология переработки упорных браннеритовых руд [9, 10] с предварительным окислительным обжигом и кучным выщелачиванием огарков.

В США окислительному обжигу подвергаются миллионы тонн малосульфидных золотых руд с содержанием золота 1-2 г/т. Из огарков золото цианируется способом КВ. В АО «ВНИИХТ» производился обжиг на воздухе в течение 1 часа при t 600°С. Способом КВ из огарков извлекают 85% урана и 80% золота. Расход H_2SO_4 – 60 кг/т, цианида натрия – 1,5 кг/т.

Привлекательной особенностью новой технологии является быстрое получение урана. В богатый концентрат (БК) с содержанием 0,7% урана переходит 40% от всего добытого урана. БК можно сразу направлять на действующий завод «ППГХО». Преимуществом является и то, что нет необходимости строить на месте огромный ГМЗ и гигантское хвостохранилище.

Литература

1. Uranium 2020: Resources, Production and Demand // A Joint Report by the Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency. – OECD, 2020.

2. Тарханов А.В., Бугриева Е.П. Урановая промышленность в годы глобального экономического кризиса и пандемии // Минеральное сырье. Серия геолого-экономическая. – № 38. – М.: ВИМС, 2021.

3. Нигматулин Б.И. Атомная энергия между прошлым и будущим. http:/proatom.ru 16.05.2017.

4. Стратегия развития атомной энергии России в первой половине XXI века. – М.: Минатом, 2001.

5. План совместных действий МПР России, Роснедр и Росатома по формированию минерально-сырьевой базы и освоения месторождений урана на среднесрочную перспективу. – М., 2006.

6. Бойцов А.В. Состояние и перспективы развития добычи урана за рубежом. Доклад на НТС-3 ГК «Росатом». – М., 2019.

7. Машковцев Г.А., Мигута А.К., Тарханов А.В., Щеточкин В.Н. Урановый потенциал России 2015-2035 г. // Минеральное сырье. – № 33. – 2015.

8. Полонянкина С.В. Состояние и перспективы развития уранодобывающей отрасли Российской Федерации / Доклад на КНТС. – 2019.

9. Тарханов А.В. Новая концепция освоения золото-урановых месторождений Эльконского урановорудного района / ВНИИХТ-65 лет: Сборник научных трудов. – М.: ООО «Винпресс», 2016. – 368 с.

10. Тарханов А.В., Егоров А.В. Современное состояние и развитие мировой и российской ядерной энергетики и обеспеченность ее ураном // Минеральное сырье. Серия геолого-экономическая. – № 34. – М.: ВИМС, 2015.

11. Тарханов А.В., Колпаков Г.А., Смагин А.П., Казанцев В.В., Бугриева Е.П. Балакина И.Г. Новый тип золото-урановых месторождений в линейных корах выветривания на древних щитах на примере месторождения Северное (Алданский щит, Республика Саха-Якутия) // Разведка и охрана недр. – № 1. – 2020.

МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВАЯ БАЗА УРАНА РФ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЕ РАЗВИТИЯ

ПОТЕНЦИАЛ ЗОЛОТО-УРАНОВОГО ОРУДЕНЕНИЯ БАЛТИЙСКОГО ЩИТА И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ

Е.Н. Афанасьева, Ю.Б. Миронов
ФГБУ «ВСЕГЕИ», г. Санкт-Петербург

В связи с изменением инфраструктуры минерально-сырьевой базы урана в России после распада СССР возникла необходимость поиска новых типов урановых месторождений. В последние годы появляется все больше данных, указывающих на наличие золота на урановых месторождениях докембрийских щитов, в том числе Балтийского.

Балтийский щит прошел длительную эволюцию от заложения и осадконакопления на архейском и раннепротерозойском этапах развития до свекофеннской орогении с интенсивно проявленной тектонической переработкой пород, метасоматозом, реализовавшихся в образовании уранового и золото-уранового оруденения. Большая часть золото-урановых месторождений Балтийского щита связана с тремя типами структур, выступающих в качестве рудоносных: 1) раннепротерозойскими рифтогенными поясами, 2) раннепротерозойскими наложенными впадинами, 3) зонами тектономагматической активизации.

Первый тип структур представлен Восточно-Карельским и Печенга-Имандра-Варзугским рифтогенными поясами (рис. 1). Восточно-Карельский пояс, разделяющий крупные мегаблоки Балтийского щита (Кольско-Беломорский и Лапландско-Карельский), трассируется цепочкой раннепротерозойских прогибов – Ветреного Пояса, Лехтинского, Шомбозерского, Куусамо-Пана-Куолаярвинского, на зарубежной части щита – Кителя-Карасьек. Рифтогенный пояс характеризуется высокой рудонасыщенностью; при этом каждая из структур обладает спецификой геологического строения, что отразилось в различной металлогенической специализации отдельных частей пояса.

Лехтинская структура характеризуется наличием структурно-вещественных обстановок, благоприятных для локализации уранового, золото-уранового оруденения. Проявления золотой, урановой и золото-урановой минерализации размещаются на разных стратиграфических уровнях, среди метасоматически измененных конгломератов и гравелитов ятулия (Риговарака, Железные Ворота, Лобаш-1 и др.), вулканитов среднего состава сариолия (Колгевара, Хохлозеро-1 и др.), вулканитов кислого состава сумия (Чуруж, Пайозеро), интрузивных пород основного состава (Хохлозеро-2, Шуезеро и др.).

По совокупности проявленных критериев и признаков оруденения в пределах Лехтинской структуры выделены участки, перспективные на выявление золотого, золото-уранового оруденения – Хохлозерский, Колгеварский, Риговаракский, Пайозерский (рис. 2).

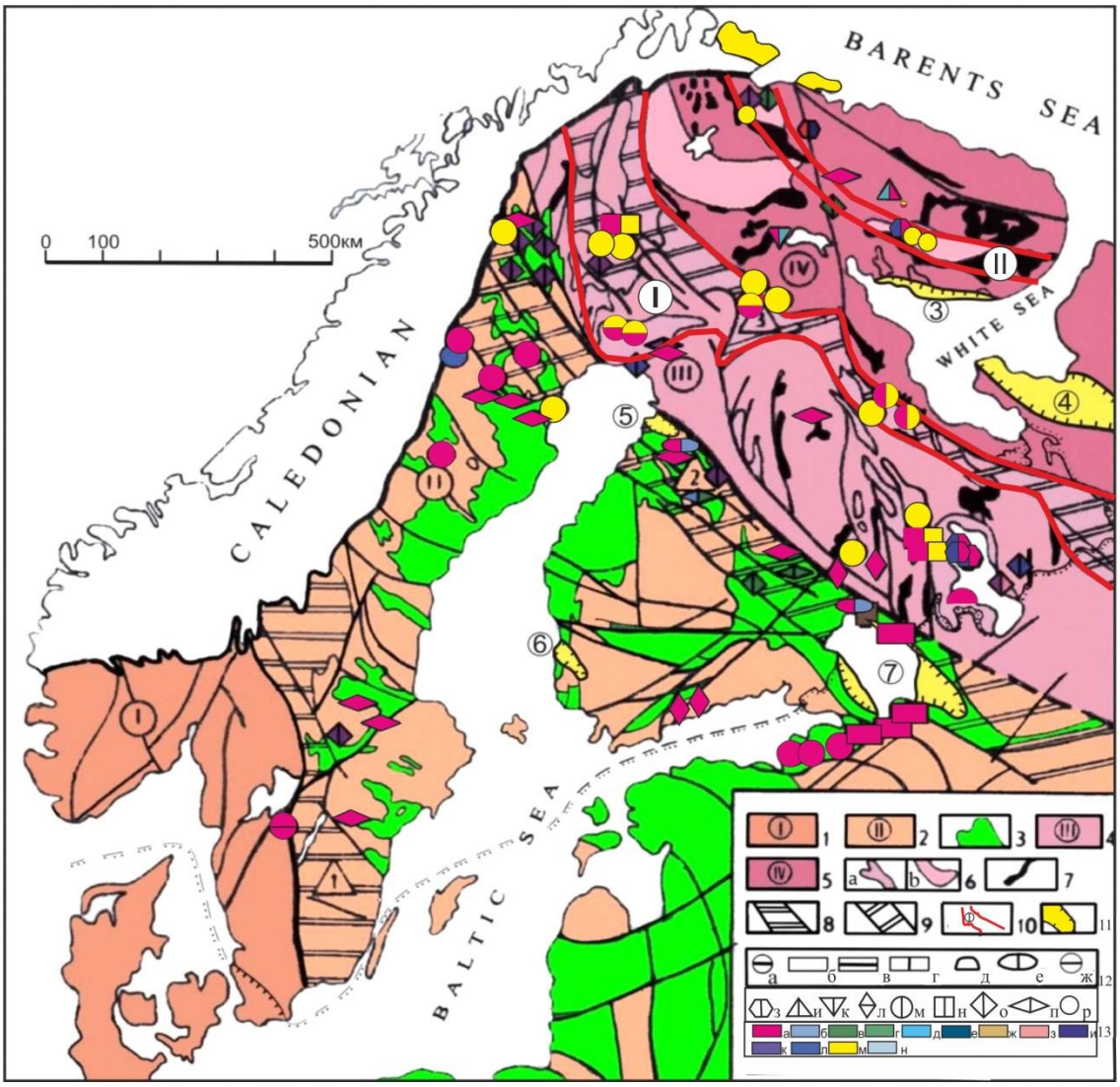


Рис. 1. Тектоническая схема Балтийского щита.

1 – Дальсландский мегаблок, 2-3 – Свекофеннский мегаблок: 2 – гранитоиды, 3 – вулканические породы; 4 – Лапландско-Карельский мегаблок; 5 – Кольско-Беломорский мегаблок; 6 – раннепротерозойские породы в пределах Лапландско-Карельского (а) и Кольско-Беломорского (б) мегаблоков; 7 – архейские зеленокаменные пояса; 8-9 – межблоковые тектонические зоны: 8 – Трансскандинавская, 9 – Раахе-Ладожская (2), Восточно-Карельская; 10 – рифтогенные пояса: Восточно-Карельский (I), Печенга-Имандра-Варзугский (II); 11 – рифейские авлакогены; 12 – типы урановых, урансодержащих, золото-урановых месторождений и рудопроявлений (в соответствии с классификацией МАГАТЭ): в черных сланцах (а), в зонах предвендского структурно-стратиграфического несогласия – ССН (б), в зонах предрифейского ССН (в), в зонах предраннепротерозойского ССН (г), песчаникового типа (д); в фосфоритах (е), жильного типа (ж), метасоматитического (з), интрузивного субщелочного (и), интрузивного карбонатитового (к), ультраметаморфического (л), кварцево-конгломератого (м); «рядовая» минерализация: олово-полиметаллическая в скарнах (н), медная, медно-никелевая, железо-титановая, хромитовая в интрузиях базитов и ультрабазитов (о), медная, медная медно-никелевая, железорудная в кристаллических сланцах, кварцитах, лептитах (п), золоторудная в кварцевых, сульфидно-кварцевых жилах, свинцово-цинковая в карбонатных, барит-карбонатных жилах; 13 – минеральный состав: уран (а), редкие металлы, редкие земли (б), медь (в), никель (г), цинк (д), свинец (е), олово (ж), титан (з), ванадий (и), железо (к, хром (л), золото (м), фосфор (н)

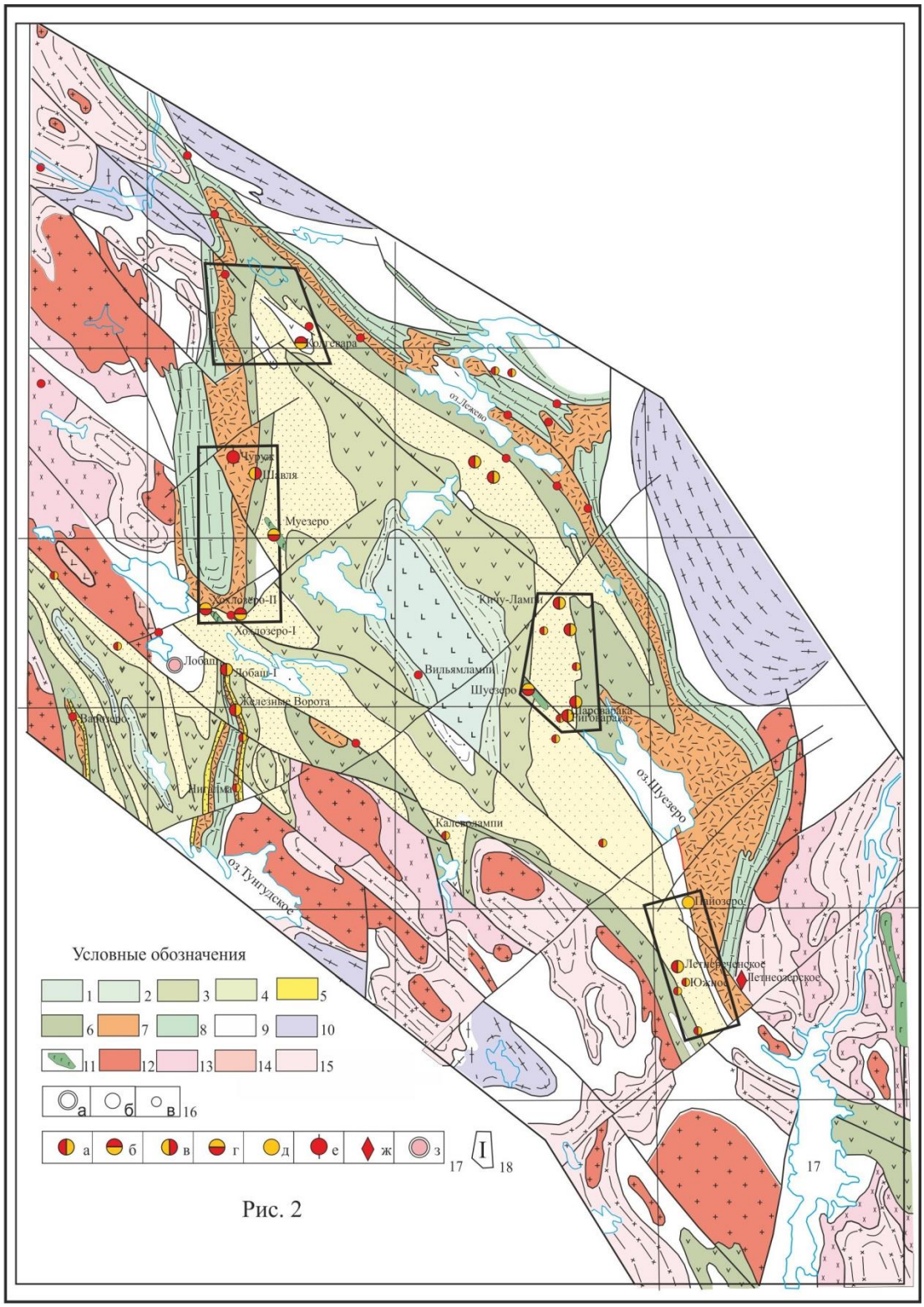


Рис. 2. Лехтинская структура. Схема геологического строения с контурами перспективных участков.

1-10 – *осадочные, вулканогенно-осадочные и метаморфические образования*: 1-5 – *ятулийский надгоризонт*: 1 – метабазальты, агломератовые туфы черноваракской свиты; 2 – метаалевролиты,метааргиллиты, метапесчаники, доломиты, доломитовые брекчии вильямлампинской свиты; 3 – метадиабазы, диабазовые порфириты, миндалекаменные метадиабазы, шаровые лавы, туфолавы, метатуфы основного состава юляозерской свиты; 4 – метапесчаники аркозовые, кварцито-песчаники, доломиты,

алевролиты, пестроцветные аргиллиты, конгломераты летнеозерской свиты; 5 – метапесчаники, кварцито-песчаники, гравелиты, кварцевые конгломераты окуневской свиты; 6 – *сариолийский надгоризонт*: метадиабазы, метамандельштейны, туфобрекчии, туфоконгломераты, туфолавы, туфопесчаники, туфоалевролиты ватулминской свиты; 7-8 – *сумийский надгоризонт*: кварцевые порфиры, кератофиры и их туфы, туфобрекчии, туфоконгломератобрекчии кислого состава; 8 – туфобрекчии, туфолавы, амфиболиты амфиболовые, биотит-амфиболовые сланцы, амфиболиты тунгудской свиты; 9 – метабиабазы амфиболитизированные, пара- и ортоамфиболиты, амфиболовые, гранат-амфиболовые, гранат-биотитовые гнейсы и сланцы пебозерской серии лопия; 10 – биотитовые, амфибол-биотитовые гранат-биотитовые гнейсы, амфиболиты беломорской серии; 11-15 – *интрузивные и ультраметаморфические образования*: 11 – диабазы, габбро-диабазы; 12 – граниты микроклиновые, плагиомикроклиновые порфировидные, лейкократовые, аплиты ватулминско-варбинского комплекса; 13 – диориты, гранодиориты, кварцевые диориты, гранодиорит-порфиры, кварцевые порфиры надвоицкого комплекса; 14 – плагиограниты, плагиогранито-гнейсы, плагиомигматиты; 15 – гнейсо-граниты, мигматит-граниты; 16-17 – рудные объекты: 16 – размер рудных объектов: месторождения (а), рудопроявления (б), проявления (в); 17 – тип рудных объектов: золото-урановые в кварцевых конгломератах и гравелитах (а), золото-урановые в вулканитах среднего состава сариолия (б), золото-урановые в кислых вулканитах сумия (в), золото-урановые в интрузиях основного состава (г), золоторудные в вулканитах кислого состава (д), урановые в кислых вулканитах сумия (е), урановые в кварц-полевошпатовых метасоматитах и пегматитах (ж), молибденовые в метавулканитах основного и среднего состава лопия (з); 18 – перспективные площади и их номера: Колгеварский (I), Хохлозерский (II), Риговаракский (III), Пайозерский (IV)

Рудные объекты в пределах Колгеварского и Хохлозерского участков приурочены к ядерным частям антиклинальных складок, осложненных зонами рассланцевания и брекчирования и размещаются среди вулканитов среднего состава сариолия на контакте с песчаниками ятулия (рудопроявление Колгевара) или с кварцевыми порфирами и кератофирами сумия (рудопроявление Хохлозеро). Содержания золота в метасоматически измененных вулканитах достигают 2-2,5 г/т, в жилах сульфидно-кварцевого состава, составляющих центральные части рудоносных зон, – 4-4,5 г/т. Золото-урановые проявления Риговаракского участка локализованы в зонах катаклаза и милонитизации, прослеживающихся по простиранию на 50-100 м при мощности от 0,5 до 1,5 м и развитых среди кварцевых конгломератов и гравелитов ятулия. Рудная минерализация представлена самородным золотом и уранититом. Содержания золота колеблются от 0,2-0,4 до 2-2,5 г/т, достигая в единичных пробах 16-17 г/т; содержания урана составляют 0,007 % на мощность 0,4-0,6 м. Золотопроявления Пайозерского участка размещаются среди вулканитов кислого состава сумия и локализованы преимущественно в приконтактовых частях субвулканических интрузий. Содержания золота в метасоматически измененных вулканитах кислого состава достигают 4-6 г/т, в кварцевых, сульфидно-кварцевых жилах – 43 г/т.

Оцененные прогнозные ресурсы золота по категории P_2 составляют: 18,8 т (Хохлозерский участок), 15,7 т (Колгеварский участок), 10,1 т

(Риговаракский участок), 7,2 т (Пайозерский участок) [1]; прогнозные ресурсы урана для Лехтинской структуры по данным ГП «Невскгеология» оцениваются по категории P_3 в 15 тыс. т (Титов В.В., 1999). Полученная количественная оценка ресурсов золота на золотых и золото-урановых объектах требует уточнения в ходе дальнейших исследований.

Наибольший интерес с точки зрения уранового и золото-уранового оруденения представляет Куусамо-Пана-Куолаярвинский прогиб – центральное звено Восточно-Карельской структурной зоны, который входит в состав одноименного рудного района. В восточной части рудного района известно большое число урановых рудопроявлений, размещающихся на разных стратиграфических уровнях (Лагерное, Озерное, Алим-Курсуярви и т.д.). Как показали исследования геологической службы Финляндии, практически со всеми рудопроявлениями урана, локализованными в пределах сопредельного раннепротерозойского прогиба Куусамо (Коуверваара, Контиахо, Юомасуо и др.), связаны рудные концентрации золота [5]. Золото-урановые объекты Куусамо-Пана-Куолаярвинского рудного района локализованы в альбититах и альбит-карбонатных метасоматитах. Урановая минерализация в альбит-карбонатных метасоматитах ассоциирована с альбит-кальцитовыми прожилками выполнения, золотая минерализация связана с проявлением наложенных анкеритовых, кварц-анкеритовых изменений.

Урановая минерализация представлена уранинитом, реже браннеритом. На рудопроявлении Алакуртти был установлен коффинит, развивающийся по микротрещинам в уранините. Зерна уранинита разбиты сетью разноориентированных трещин, по которым развиваются прожилки, состоящие из самородного золота и алтаита [2]. Зерна самородного золота установлены также в карбонатных брекчиях, в ассоциации с уранинитом, алтаитом, теллуридами висмута и никеля и молибденитом. Содержания урана на рудопроявлении Озерное – 0,1 % на 0,5 м, Лагерное – 0,3 % на 0,5 м, Алакуртти – до 3 % на 0,1 м. Содержания золота в штуфных пробах из альбит-карбонатных брекчий достигают 5,5 г/т, в бороздовых пробах – 0,5 г/т на 0,5 м. На рудопроявлениях Озерное, Лагерное, Алакуртти выявлены также кварцевые с сульфидами жилы, аналогичные по составу, формам выделения сульфидов и условиям формирования кварцевым жилам месторождения золота Майское. Содержания золота в штуфных пробах из сульфидно-кварцевых жил рудоносных зон достигает 20 г/т, в бороздовых пробах Алакуртти 0,7 г/т на 1 м.

Таким образом, золоторудные концентрации на рудных объектах Куусамо-Пана-Куолаярвинского рудного района могут быть связаны как с урановосными альбит-карбонатными метасоматитами, так и с кварц-сульфидными жилами. Есть основание предполагать, что формирование урановых и связанных с ними золоторудных концентраций является результатом проявления единого многостадийного рудоформирующего

процесса, обусловленного переносом и концентрацией рудного вещества в единых рудоносных зонах [2].

Прогнозные ресурсы урана Куолаярвинского рудного узла по данным ГП «Невскгеология» составляют по категории P_3 39 тыс. т (Титов В.В., 1999), золота – 18 т (Михайлов, 2021); прогнозные ресурсы Панаярвинского узла – 30 тыс. т (Титов В.В., 1999).

В пределах структуры Куусамо, расположенной на территории Финляндии и составляющей западную часть Куусамо-Пана-Куолаярвинского рудного района, выявлено большое количество рудопроявлений урана, с которыми также связана золоторудная минерализация. Наибольший интерес представляют Fe-Co-Au-U рудные объекты, типичными представителями которых являются месторождения Юомасуо, Конттиахо и Сиваккахари [5]. Рудные тела контролируются shear-зонами и размещаются среди кварц-серицитовых, кварц-серицит-хлоритовых метасоматитов, окруженных широкими зонами альбитизации (месторождение Юомасуо) или альбитовых, альбит-карбонатных брекчий (месторождение Конттиахо) [5]. Рудная минерализация представлена уранинитом, кобальтином, молибденитом, пирротином, пиритом, самородным золотом. Микротрещины уранинита заполнены вторичными урановыми минералами и галенитом. Золото наблюдается в виде микровключений в пирите, пирротине, а также в кобальтине и молибдените. Зерна самородного золота заключительной стадии или стадии мобилизации локализуются в микротрещинах в уранините совместно с теллуридами свинца. Кроме того, в рудных зонах были выявлены такие минералы теллура и висмута, как алтаит, образующий ксеноморфные зерна в трещинах в уранините, а также теллуро-висмутит, мелонит и др. Содержания урана в рудных телах колеблются от 0,004-0,1 до 1,5-3 %, золота от 1-3 до 10-15 г/т, кобальта – от 0,15 до 1 %, молибдена – от 0,04 до 0,8 %. Запасы на месторождении Юомасуо составляют 11,1 т Au при среднем содержании 4,7 г/т Au (Dragon Mining Company, 2015).

К западу от Куусамо-Пана-Куолаярвинского прогиба расположен раннепротерозойский сланцевый пояс Перапохиа, вмещающий золото-урановые проявления группы Ромпас, которые были приняты за модель прогнозируемого оруденения в пределах Куолаярвинского рудного узла. Золото-урановые объекты размещаются в зоне влияния позднеорогенных гранитов, характеризующихся повышенной радиоактивностью. Золоторудная минерализация на проявлениях группы Ромпас имеет отчетливую связь с урановой. Золото локализуется в микротрещинах в уранините, а также заполняет интерстиции между мелкозернистыми агрегатами рыхлых зерен уранинита.

Рудная ассоциация представлена самородным золотом, уранинитом, теллуридами и висмутидами свинца, а также асфальтенами. На основе данных, приведенных в отчете компании Mawson Resources Ltd [9],

прогнозные ресурсы золота на проявлениях группы Ромпас оцениваются в российских категориях в 60 т Au и 1 500 т U (категория P_2) и в 11 т Au и 400 U (категория P_1). (Петров С.В., 2014).

На северо-западном продолжении Куусамо-Пана-Куолаярвинского прогиба на территории Финляндии размещается ряд золоторудных месторождений (Саатапора, Пахтаваара, Суурикуусико с запасами золота в 70 т) и рудопроявлений урана (Пахтавуома), локализованных в метасоматически измененных вулканогенных и осадочно-вулканогенных образованиях зеленокаменного пояса Киттеля (рис. 1).

Имандра-Варзугско-Печенгский рифтогенный пояс протягивается на сотни километров в северо-западном направлении до границы с Норвегией (рис. 1). Выделенная Имандра-Варзугская золото-урановая металлогеническая зона охватывает Имандра-Варзугскую раннепротерозойскую структуру и расположенный к югу от нее Терский позднеархейский зеленокаменный пояс.

Работами ГП «Невскгеология» в северной части зоны был выделен Имандра-Варзугский потенциальный урановорудный район с рудопроявлением Соленое, рядом проявлений, локализованных в зонах складчато-разрывных дислокаций северо-западного простирания среди раннепротерозойских углеродистых и углеродсодержащих образований. Прогнозные ресурсы урана по категории P_3 оцениваются для Имандра-Варзугского потенциально урановорудного района в 59 тыс. т (Титов В.В., 1999).

Кроме того, в пределах Имандра-Варзугской металлогенической зоны выделяются Сергозерский потенциальный золоторудный район и Стрельниковско-Пулоньгский потенциальный золоторудный узел (рис. 3). Первый объединяет породы лопийского зеленокаменного пояса с большим количеством золоторудных объектов с содержаниями золота от 0,1 до 4,6 г/т [7], а также фрагменты раннепротерозойского пояса с проявлением Ворговый, локализованным в зоне складчато-разрывных нарушений среди углеродистых пород на контакте лопийских и карельских образований с оцененными прогнозными ресурсами золота по категории P_2 в 28 т [8]. По структурно-вещественной позиции это проявление сопоставимо с рудопроявлением урана Соленое. Оцененные ресурсы золота по категории P_3 Сергозерского потенциального золоторудного района составляют 57 т [6]. Оцененные прогнозные ресурсы Стрельнинско-Пулонгского потенциального золоторудного узла по категории P_3 по методу аналогий с зеленокаменным поясом Иломантси составляют 30,5 т золота [6].

Второй тип структур, с которыми связаны золото-урановые рудные объекты, представлен наложенными раннепротерозойскими прогибами, широко развитыми в пределах Кольско-Беломорского и Лапландско-Карельского мегаблоков (Онежский, Янгозерский, Коли и др.). Их заложение сопровождалось образованием золото-урановых

конгломератов в основании прогибов, с которыми связаны мелкие золото-урановые объекты (Кесанки, Ятулий, Ипати и др.).

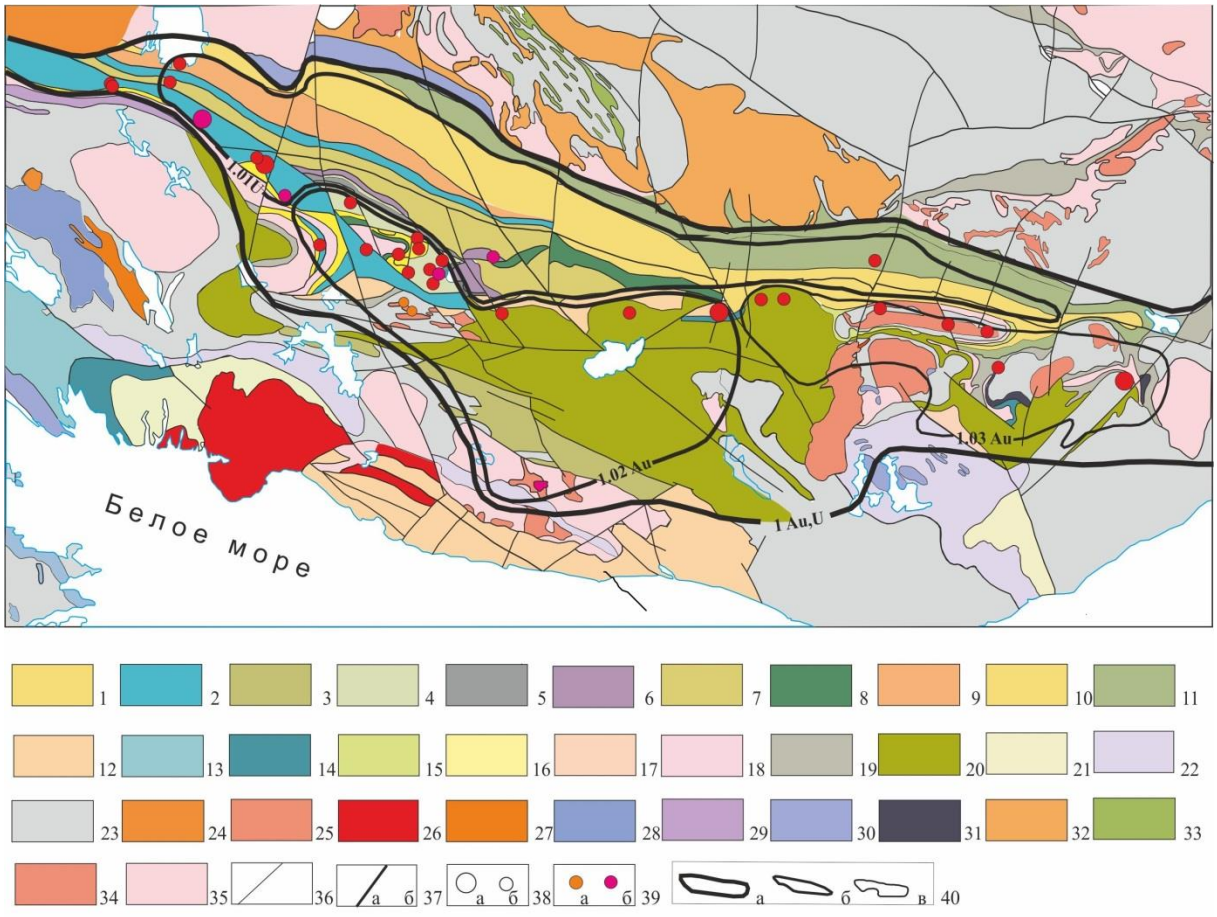


Рис. 3. Схема геологического строения Имандра-Варзугского прогиба и его обрамления (геологическая основа составлена на основе Геологической карты Кольского полуострова, ред. Митрофанов Ф.П. 2001 г.).

1-23 – Осадочные, вулканогенно-осадочные, метаморфические образования 1 – рифей нерасчлененный: конгломераты полимиктовые, песчаники, алевролиты; 2 – базальтовые и андезитовые порфириты, туфы, алевропелитовые сланцы, углеродистые сланцы калевия нерасчлененные; 3 – риолиты, дацитовые, андезито-дацитовые порфириты, туфы, туфобрекчии людиковия; 4-6 – ятулий: 4 – диабазы, туфы, туфобрекчии; 5 – песчаники, известняки, доломиты; 6 – алевролитовые сланцы, филлитовидные углеродсодержащие сланцы; 7 – диабазы, базальтовые, андезитовые порфириты, туфы, кварциты, песчаники, сланцы нерасчлененные; 8 – пикритовые, базальтовые порфириты, риолиты, дациты, с полимиктовыми конгломератами, песчаниками в основании (сариолий); 9-11 – сумий: 9 – риолиты, дациты, риодациты; 10 – базальтовые порфириты, мандельштейны; 11 – андезито-базальтф, амфиболиты, туфы, туфобрекчии, аркозовые песчаники, известняки, конгломераты нерасчлененные; 12-14 – геологические образования неопределенного возраста: 12 – слюдяные, углеродистые, хлорит-амфиболовые сланцы; 13 – основные гранулиты; 14 – гранулиты среднего состава, эндербиты; 15 – 20: поздний архей (лопий): 15 – метагравелиты, метапесчаники аркозовые; 16 – сланцы мусковит-кварцевые, плагио-кианит-ставролитовые, кианитовые, ставролит-кианитовые, силлиманитовые с гранатом, графитистые сланцы; 17 – слюдяные, гранат-слюдяные парагнейсы и сланцы; 18 – метавулканиты кислого и среднего состава; 19 – метавулканиты основного, среднего и кислого состава,

конгломераты в основании разреза; 20 – слюдяные, гранат-слюдяные парагнейсы и сланцы, конгломераты, кварциты; 21-23 – раннеархейские образования: 21 – слюдяные, гранат-слюдяные гнейсы с кианитом и ставролитом; 22 – гнейсы разного состава, амфиболиты, кальцифиры; 23 – биотитовые, амфибол-биотитовые гнейсы, мигматиты, тоналито-гнейсы, амфиболиты; 24 – Интрузивные образования: 24 – сиениты, нефелиновые сиениты, карбонатиты; 25 – граниты, лейкограниты, гранодиориты; 26 – плагиограниты, порфировые граниты, диориты, кварцевые диориты; 27 – граниты, щелочные граниты, сиениты, 28 – клинопироксениты, верлиты; 29 – перидотиты, пироксениты; 30 – габбро, габбро-анортозиты; 31 – нориты, габбро-нориты, габбро-амфиболиты; 32 – субщелочные граниты; 33 – габбро, габбро-диориты, габбро-лабрадориты; 34 – граниты, лейкограниты, диориты, гранодиориты; 35 – тоналиты, плагиограниты, гранодиориты; 36 – стратиграфические границы; 37 – разрывные нарушения; 38 – рудные объекты: месторождения и рудопроявления (а), проявления (б); 39 – золоторудные объекты (а), урановые рудные объекты (б); 40 – металлогеническое районирование (в разрыве контура металлогенического таксона обозначена специализация и номер): а – Имандра-Варзугская золото-урановорудная металлогеническая зона, б – потенциальные рудные районы: Имандра-Варзугский потенциальный урановорудный (1.01.U), Сергиевский потенциальный золоторудный район (1.01. Au); в – Стрельниковско-Пулонгский потенциальный рудный узел (1.03 Au)

В ходе развития прогибов режим погружения сменялся воздыманием, что сопровождалось эпигенетическими преобразованиями пород, а также дополнительным привносом урана и золота из пород фундамента, в результате чего возникали новые золото-урановые рудные концентрации, локализованные в зонах предраннепротерозойского структурно-стратиграфического несогласия (рудопроявления Пауккаянваара, Кухонки, Ристимонти, Пальеозерское-1, 2 и др.). Эта структурно-вещественная ситуация хорошо изучена на рудных объектах краевых частей Онежского и Янгозерского раннепротерозойских прогибов с большим количеством золото-урановых рудных объектов, локализованных в базальных конгломератах ятулия и в зоне предраннепротерозойского несогласия. Содержание золота на рудных объектах типа несогласия колеблются от 1-2 г/т на мощность 0,7-0,8 м до 4-5 г/т на мощность 2 м (рудопроявление Пальеозерское-1, 2).

Предраннепротерозойский уровень структурно-стратиграфического несогласия представляет интерес как на уран, что обусловлено наличием в породах фундамента специализированных на уран гранитоидов, так и на золото, поскольку подстилающие рудовмещающие вулканогенные и осадочно-вулканогенные породы лопия, а также вулканиты сумия и сариолия характеризуются высокой золотоносностью, что делает их потенциальным источником золота. Прогнозные ресурсы урана наложенных прогибов оцениваются в 93 тыс. т урана, в том числе площадей развития урановосных конгломератов, по данным ГП «Невскгеология», – 15 тыс. т [3].

Третий тип структур, вмещающих золото-урановые рудные объекты на территории Балтийского щита, представлен зонами тектоно-магматической активизации свекофеннского этапа рудообразования (1,95–

1,65 млрд лет). Наиболее отчетливо формирование объектов этого типа проявлено в пределах Онежского прогиба, где в это время происходило заложение зон складчато-разрывных дислокаций (СРД). Зоны СРД представляют собой системы узких антиклиналей северо-западного простирания протяженностью от 30 до 100 км при ширине 2-4 км, осложненных продольными разрывными нарушениями. Рудоносные зоны, контролирующие пространственное размещение комплексного уран-благороднометалльно-ванадиевого (с молибденом и медью) оруденения, имеют протяженность 0,5-2,7 км при ширине 80-120 м. Работами ГП «Невскгеология» в 1977-90 гг. в пределах Онежского прогиба было выявлено 5 месторождений и 9 рудопроявлений этого типа [3]. Основными компонентами комплексных руд являются V, U, Mo, Cu, Pd, а также Au, Ag, Bi, As и другие. Оруденение размещается на крутопадающих или опрокинутых юго-западных крыльях антиклиналей в полях развития слюдистых и карбонатно-слюдистых метасоматитов. Ванадиевое оруденение представлено ванадийсодержащим флогопитом; урановая минерализация представлена уранинитом, настураном и коффинитом. Содержание урана от следов до 6-8 %, ванадия от 0,14 до 8 % (максимальное – 5 %), золота – от 0,01 до 6 г/т (максимальное – 66 г/т), платины – 0,04 г/т. Суммарные запасы урана месторождений «падминской» группы оценены 8,1 тыс. т; учтенные прогнозные ресурсы категории P_3 составляют 10 тыс. т [4]. Запасы V_2O_5 на месторождении Средняя Падма составляют 107 тыс. т при среднем содержании V_2O_5 2,35 % [3].

Заключение

Золото-урановые объекты установлены во многих раннепротерозойских структурах. Прогнозные ресурсы золота на объектах этого типа составляют около 30 % от общих прогнозных ресурсов восточной части Балтийского щита. Связь золота и урана на рудных объектах различна. В одних случаях они совмещены в пространстве, но разорваны по времени формирования (рудопроявления Озерное Куолаярвинского прогиба, Юомасуо Финляндии и др.), в других случаях – рудные концентрации урана и золота разобщены в пространстве, хотя и находятся в пределах единых структурных зон (рудопроявление урана Соленое и проявление золота Ворговый Имандра-Варзугского прогиба и другие) и сформированы в единую металлогеническую эпоху.

Для решения вопроса практической значимости золото-уранового оруденения разных типов необходимо продолжить изучение Панакуолаярвинского, Имандра-Варзугского прогибов, Лехтинской и других раннепротерозойских структур на основе проведения ревизионных, тематических и поисковых работ, нацеленных на изучение масштабов золото-уранового оруденения и создания рудно-генетической модели его формирования.

Литература

Опубликованная

1. Афанасьева Е.Н., Харламов М.Г. и др. Ураноносность и золотоносность Лехтинской структуры // Региональная геология и металлогения. № 8, 1999.

2. Афанасьева Е.Н., Миронов Ю.Б., Васин О.В., Михайлов В.И., Житников В.А. Золото-урановое оруденение Куолаярвинского прогиба // Разведка и охрана недр. 2017. С. 31-36.

3. Кушнеренко В.К. Перспективы ураноносности Северо-Западного региона Российской Федерации // Проблемы сырьевого обеспечения атомной энергетики. СПб, 2004. С. 32-41.

4. Машковцев Г.А., Мигута А.К., Тарханов А.В. Урановый потенциал России 2015-2035. Москва. 2017.

5. Erkki Vanhanen Geology, mineralogy and geochemistry of the Fe-Co-Au-(U) deposits in the Paleoproterozoic Kuusamo Schist Belt, northeastern Finland. Espoo, 2001. 229 p.

Фондовая

6. Житникова И.А. и др. «Проведение в 2018-2020 годах региональных геологосъемочных работ масштаба 1:200 000 на группу листов в пределах Северо-Западного и Центрального Федеральных округов». 2020.

7. Казанов О.В. Отчет о результатах выполненных работ по объекту «Геохимические поиски на рудное золото в пределах Сергозерско-Стрельнинской площади (Мурманская область)», 2014 г. ФБУ «ТФГИ по СЗФО».

8. Семенов В.В. Геологическое строение и полезные ископаемые верховьев рр. Стрельна, Чапоа, Пулонга. Отчет Восточно-Кольской партии о результатах поисково-съемочных работ масштаба 1:50 000 с общими поисками на площади 3550 кв. км и поисков масштаба 1:25 000 на площади 65 кв. км, проведенных в пределах восточного блока Имандра-Варзугской структурной зоны и её обрамления. Листы Q-37-VIII, IX, X, XIV, XV, XVI. Мончегорск 1988 г.

9. John Nebocat, P.Eng. Report on the Geology, Mineralization and Exploration Activities on the Rompas gold-uranium property Southern Lapland, Finland. 2011.

ПЕРСПЕКТИВЫ ВЫЯВЛЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА ПЕСЧАНИКОВОГО ТИПА В ЗАБАЙКАЛЬЕ

С.А. Дзядок[1], Д.А. Прохоров[2]
1 – АО «Урангео», г. Иркутск, 2 – ФГБУ «ВИМС», г. Москва

Забайкалье – крупнейший урановорудный регион России, где сосредоточены 16 урановорудных районов, в пределах которых выявлено большое количество месторождений и рудопроявлений урана различной формационной принадлежности и промышленной значимости. Здесь расположены два из трех рудных районов, вовлеченных в промышленное освоение – Урулюнгуевский и Витимский (рис. 1).

В настоящее время наиболее перспективны для выявления месторождений песчаникового типа четыре урановорудных района (УРР), расположенных в пределах Джида-Витимской структурно-металлогенической зоны. Это Витимский УРР, в котором действует горно-добывающее предприятие и располагаются 3 потенциально урановорудных района – Бадинский, Джидинский и Еравнинский.

В пределах данных районов возможно выявление месторождений урана 2 геолого-генетических типов: – в неогеновых палеодолинах, перекрытых покровами базальтов («витимский» тип), и в приразломных депрессиях, выполненных мезозойскими осадочными образованиями в связи с зонами пластового окисления.

Перспективными на выявление месторождений гидрогенного типа выделяются Витимский и Джидинский районы, месторождений в мезозойских депрессиях – Бадинский и Еравнинский районы.

В контроле кайнозойского гидрогенного оруденения главную роль играют литологический, структурный, радиогеохимический и эпигенетический критерии:

1) оруденение отлагается в рыхлых отложениях аллювиальных, пойменных, реже озёрных фаций, обогащённых органикой, сульфидами;

2) руды размещаются в речных палеодолинах эрозионно-тектонического происхождения, наследующих положение крупных тектонических нарушений;

3) преимущественное распространение в области питания палеодолин гранитоидов с повышенными концентрациями урана;

4) вмещающие оруденение рыхлые породы подвержены экзогенно-эпигенетическим изменениям окислительно-восстановительного характера.

По совокупности проявленности данных критериев в **Витимском УРР** выделены Аталангинскиая, Дутакитская и Муясынская площади.

Муясынская площадь расположена на западном фланге Витимского района. Большую часть площади занимает покров неогеновых базальтов, под которым возможно наличие разветвлённой палеоречной сети, ближайшее обрамление сложено витимканскими гранитоидами.

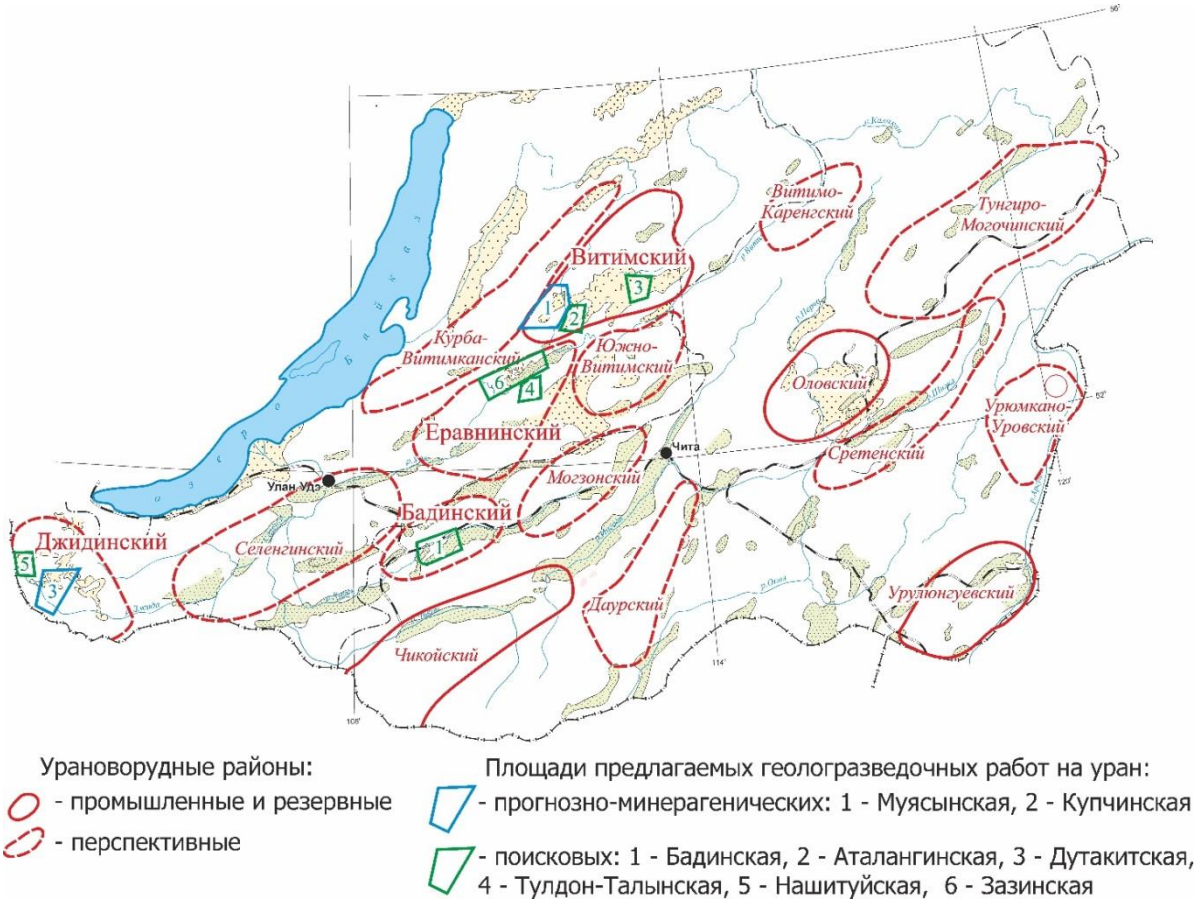


Рис. 1. Урановорудные районы Забайкалья и площади предлагаемых геологоразведочных работ на уран

Поиски бурением в пределах площади ранее не проводились. Здесь необходимо провести прогнозно-поисковые работы с применением бурения для выявления палеорусловых образований под покровом базальтов и оценки их ураноносности. Ожидаемый результат – прирост прогнозных ресурсов урана категории P_2 в количестве 40 тыс. т.

Аталангинская площадь расположена к западу от действующего предприятия, в Западном рудном узле Витимского урановорудного района. В пределах площади известны Аталангинское, Борокченское и Сихилинское рудопроявления гидрогенного генезиса полностью не оцененные, известны палеодолины, не опоискованные бурением. На площади необходимо провести поисковые работы, что позволит дополнительно прирастить к ресурсной оценке Западного рудного узла 7 тыс. т урана по категории P_1 и 10 тыс. т категории P_2.

Дутакитская площадь в Восточном рудном узле имеет схожие перспективы. В пределах площади известны Иминское, Дутакитское рудопроявления и ряд не опоискованных палеодолин.

Джидинский потенциально урановорудный район (ПУРР) расположен в юго-западной приграничной части Республики Бурятия на территории Закаменского района.

Специальными исследованиями территория района изучена слабо, проведенные исследования в основном заключались в оценке аэроаномалий с позиций перспектив выявления гидротермального оруденения. Основные перспективы района связываются с возможностью выявления уранового оруденения «витимского» палеодолинного типа под покровами неогеновых базальтов. Предпосылками для этого являются:

1. Значительные площади развития неогеновых базальтов и подстилающих их терригенных осадков.
2. Гранитоидный высокорадиоактивный фундамент кайнозойских структур.
3. Прямые признаки уранового оруденения: рудопроявления, аномалии в неогеновых осадках и корах выветривания гранитов.

В результате рассмотрения проявленности критериев и признаков уранового оруденения на территории района в качестве перспективных выделены Нашитуйская и Купчинская площади.

Эти площади под разными названиями и в разных контурах выделялись и предыдущими исследователями, однако их рекомендации по разным причинам остались нереализованными.

Нашитуйская площадь расположена на границе Купчинского свода и Джидинского синклинория, в области пересечения Джида-Темникского и Шара-Азаргинского глубинных разломов. Древнейшими являются осадочно-метаморфические породы хохюртовской свиты кембрия, представленные мраморизованными известняками с прослоями и линзами кремнистых пород и ортосланцев, кремнистыми сланцами различного состава, метапесчаниками, метаэффузивами основного состава. Кембрийские образования прорваны гранитоидами урминского и гуджирского интрузивных комплексов. Урминскими гранитоидами сложен сравнительно небольшой (8 х 8 км) шток, занимающий центральную часть площади. Они представлены разнозернистыми биотитовыми гранитами и граносиенитами. Лейкократовые граниты гуджирского комплекса образуют весьма небольшие тела и имеют подчиненное распространение. Они характеризуются высокой радиоактивностью: до 30-80 мкР/ч.

Неогеновые базальты залегают в виде покровов и представлены тёмно-серыми массивными, реже миндалекаменными породами с вкрапленностью мелких зёрен оливина. Они закартированы как на гранитном, так и на осадочно-метаморфическом фундаменте. Радиоактивность их 6-9 мкР/ч.

На площади выявлены Нашитуйское рудопроявление урана и несколько радиоактивных аномалий, в том числе наземные, гидрохимические и аэроаномалии.

Нашитуйское рудопроявление приурочено к узлу пересечения ветвей северо-западного Шара-Азаргинского и субширотного Джида-Темникского глубинных разломов. Рудопроявление обнаружено работами партии № 327 Сосновского ПГО в 1965 г. при выполнении аэрогамма-

поисков как аэроповышение с содержанием урана 4×10^{-4} %. Урановое оруденение зафиксировано в аллювиально-делювиальных отложениях палеодолины. В одной из оценочных скважин вскрыто рудное сечение мощностью 3,0 м с содержанием урана 0,048 %. Площади в окрестностях рудопроявления, представленные значительными по размерам полями базальтов, практически не изучались.

К этой же формации принадлежат также радиоактивные аномалии №№ 85 и 86, выявленные в 1983 г. партией № 129, и аномалия № 12-4, установленная в 1992 г. экспедицией № 34 на этом же участке. Аномалии находятся в 10 км к востоку от Купчинской впадины в узле пересечения Джида-Хилокского и Оронгодойского глубинных разломов. Они приурочены к зоне контакта базальтового покрова с гранитами урминского комплекса. Аномалии предварительно оценивались с поверхности, их интенсивность до 60-75 мкР/ч. Самостоятельного значения они не имеют, но в совокупности сигнализируют о развитии процессов перераспределения и накопления урана в кайнозойских осадках под покровами базальтов.

Условия локализации урановых проявлений данной формации позволяют рассматривать их как аналоги урановорудных объектов «витимского типа», распространённого в пределах Амалатского плато в Витимском урановорудном районе. С учётом широкого развития базальтовых полей, в том числе и на гранитоидном фундаменте, в Джидинском районе есть реальные предпосылки выявления урановых месторождений этого типа.

В пределах Купчинской перспективной площади известны аномалии радиоактивности в виде ореолов протяжённостью 100-300 м, приуроченных к горизонтам обелённых неогеновых осадков, перекрытых покровами базальтов. Очевидно, что осадочные образования выполняют палеодолины в донеогеновом рельефе. Предполагаемая протяженность долин древней палеоречной сети позволяет рассчитывать в результате проведения поисковых работ на прирост прогнозных ресурсов урана категории P_2 в количестве 40 тыс. т.

В случае установления рудного потенциала выделенных площадей в поисковые работы могут быть вовлечены более обширные территории в северной части района, где также распространены покровы базальтов на гранитном фундаменте с неясными пока перспективами выявления под ними оруденения.

В качестве районов, перспективных на выявление песчаниковых месторождений урана в мезозойских депрессиях, выделены Бадинский и Еравнинский.

Районы выделены исходя из проявленности критериев и признаков уранового оруденения данного типа, основными из которых являются:

1) Наличие во впадине кондиционного оруденения в сероцветных отложениях, многочисленных аномалий, ореолов и потоков рассеяния урана.

2) Широкое развитие в разрезе осадочной толщи сероцветных пород, обогащённых восстановителями и сульфидами железа.

3) Наличие в разрезе зеленоцветных и красноцветных пород, создающих на контакте с сероцветными отложениями контрастные геохимические барьеры, способствующие рудоотложению.

4) Сложная морфология ложа впадины. Наличие отрицательных структур более высоких порядков, выполненных проницаемыми осадками гранитного состава.

5) Широкое развитие разрывной тектоники, что обусловило значительную нарушенность пород и блоковое строение впадины.

6) Развитие в обрамлении впадины гранитных массивов и полей вулканитов с повышенным кларковым содержанием урана.

Бадинская впадина расположена в средней части Хилокской структурно-формационной зоны и представляет собой одну из крупных структур центрального Забайкалья, сформировавшуюся на заключительных стадиях мезозойского этапа тектоно-магматической активизации. Она имеет северо-восточную ориентировку и прослеживается с юго-запада на северо-восток на расстояние 100 км при средней ширине 12 км. В обрамлении впадины развиты палеозой-протерозойские образования, сложенные интрузивными (специализированными) и метаморфическими породами, а также верхнеюрскими вулканитами (в северном борту впадины), в пределах которых известно множество проявлений урана гидротермального типа.

В 1962-1983 гг. Сосновским ПГО проведены радиометрические маршруты, площадные и профильные пешеходные и шпуровые гамма-съемки, бурение и гамма-каротаж скважин, проходка и радиометрический промер стенок канав и шурфов, радиогеохимическое, радиогидрогеохимическое и керновое опробование, радонометрия и др. методы поисков радиоактивных элементов. Непосредственно в Бадинской впадине поисками охвачена узкая полоса и отдельные участки северной прибортовой части.

Первично сероцветные нижнемеловые отложения, слагающие впадину, подразделяются на две свиты: нижнюю – сангинскую и верхнюю – селенгинскую. Границей раздела свит служит покров андезито-базальтов, залегающих с размывом на образованиях сангинской свиты. Литолого-фациальное строение свит идентично и представлено литологическими разностями от валунных конгломератов до угленосных алевролитов, сменяющих друг друга от бортов впадины к центру. Седиментация осадков в Бадинской впадине и их последующее преобразование происходили в различных геохимических обстановках, что обусловило возникновение различных геохимических типов пород. По степени окисленности

выделяются: сероцветные, красноцветные, зеленоцветные и пестроцветные породы. Геохимические типы соответствуют обычно определённым литолого-фациальным комплексам, что указывает на связь геохимической среды и условий формирования осадков; в то же время отмечаются афациальные окраски, что свидетельствует о проявлении наряду с первичными и наложенных процессов окисления.

В настоящее время в Бадинской впадине известны несколько однотипных рудопроявлений урана, сформированных в подбазальтовой мезозойской осадочной толще (Бугутуйское, Итыргинское, Солнечное, Хохотуйское, Якорное, Бугутуйское, Сибирское). Все выявленные проявления расположены в северной и центральной частях впадины; южный борт изучался значительно меньше и фрагментарно.

Так, в надбазальтовых осадках на глубинах до 160 м содержания урана достигают 0,052-0,070 % на мощности 9-11 м, размеры залежей от 0,5 до 12,0 км^2. Подбазальтовое оруденение на глубинах 180-400 м имеет максимальные содержания до 0,096 % на мощности около 1 м при размерах залежей 0,3-1,0 км^2. Урановое оруденение на большинстве рудопроявлений концентрируется в слаболитифицированных обводненных песчаниках, гравелитах, конгломератах, обладающих трещинной и поровой проницаемостью. В поровых коллекторах применим способ разработки месторождений скважинными системами подземного выщелачивания (ПВ).

Общая площадь распространения продуктивной на гидрогенное урановое оруденение базальт-терригенной формации на Бадинской впадине составляет 800 км^2; в результате проведения работ возможен прирост прогнозных ресурсов урана категории P_1 – 10 тыс. т, P_2 – 40 тыс. т.

Еравнинский ПУРР является составной частью Западно-Забайкальской геосинклинальной зоны, сформированной в каледонскую эпоху тектогенеза и значительно трансформированной в период мезозойской тектоно-магматической активизации. В региональном плане территория района расположена в узле пересечения крупных тектонических нарушений, определивших развитие Удино-Витимской структурно-формационной зоны северо-восточного простирания с пересечениями Заза-Еравнинским, Исингинским и другими разломами северо-западного простирания. Удино-Витимская СФЗ представляет собой линейно-вытянутую зону, в пределах которой группируются цепочки впадин (грабенов) и прогибов, разделенных как в поперечном, так и в продольном направлениях локальными горстами и валообразными поднятиями.

В пределах исследуемой территории выделена Заза-Еравнинская барьерная зона, которая разграничивает Эгитинский и Еравнинский блоки и смещает осевые линии депрессионных зон. Барьерная зона протягивается в северо-западном направлении на расстояние 120 км от среднего течения р. Мохей до верховий р. Кыджимит. Ширина ее 10-13 км. В пределах зоны проявлена интенсивная вулканическая деятельность, которая выразилась

в обильном излиянии кислых лав удинской свиты ($J_{2-3}ud$) и базальтоидов неогена. В пределах зоны проявлены дизъюнктивные нарушения, интенсивное брекчирование, катаклаз, иногда милонитизация. Заза-Еравнинская барьерная зона – наиболее рудонасыщенная структура района, в ее пределах находятся 2 месторождения урана, 23 рудопроявления и многочисленные аномалии радиоактивности.

На начальных этапах изучения района специалированные исследования ориентировались в основном на выявление гидротермальных месторождений урана в вулканогенно-осадочных образованиях юрского возраста.

После открытия в Витимском УРР палеодолинных месторождений в конце 70-х – начале 90-х годов в пределах района были начаты поиски гидрогенных месторождений, что привело к открытию Талаканского и Витлаусского месторождений, расположенных на восточном фланге района.

Исходя из проявленности критериев и признаков уранового оруденения, в Еравнинском районе для проведения поисковых работ выделены Зазинская и Тулдон-Талынская площади.

Зазинская площадь рассматривалась в качестве перспективной еще с начала 70-х годов, но специализированные на уран работы были проведены в меньшей степени, чем на остальной площади Еравнинского района. Особенности геологического строения Зазинской площади позволяют сделать заключение, что она характеризуется благоприятными предпосылками и признаками уранового оруденения. Обрамление впадины сложено в основном благоприятными как источник урана витимканскими гранитоидами. Широкое развитие осадочных меловых пород значительной мощности позволяет прогнозировать здесь оруденение, аналогичное имскому. В средних и базальных частях разреза осадочных пород ранее выявлены проявления урана Субникское, Гранитное, на поверхности фиксируются ряд наземных аномалий и потоки рассеяния урана.

Тулдон-Талынская площадь с юга примыкает к Зазинской. В пределах площади известны несколько выявленных, но окончательно не оцененных рудопроявлений.

Первое Зазинское рудопроявление расположено на левобережье р. Заза в 48 км к северу от пос. Гонда. Рудопроявление выявлено Верхнее-Зазинской ПСП БГУ в 1963 г. и оценивалось этой же партией в 1964-1967 гг. как перспективное. В 1970-71 гг. Центрально-Забайкальская группа партии № 1 Сосновской экспедиции (Морозов М.А. и др.) провела на участке рудопроявления и прилегающей площади дополнительные работы и также рекомендовало его для дальнейшего изучения. Рудопроявление всегда выделялось в число перспективных объектов, однако после 1971 г. никаких работ по его дооценке и опоискованию прилегающей площади не проводилось.

Наиболее древние образования на участке – граниты витимканского комплекса: средне-, крупнозернистые биотитовые, мелкозернистые

лейкократовые, реже порфировидные разности. На гранитах залегают эффузивы удинской свиты суммарной мощностью более 220 м; в нижней части это базальты, долериты и диабазы. С небольшим размывом (горизонт песчаников) они перекрываются андезитовыми порфиритами и их туфами, а также кератофирами (фельзитами).

Осадочные образования суммарной мощностью 50-63 м и более, представленные чередованием конгломератов, гравелитов, песчаников и алевролитов (все разности серой и серо-зеленоватой окраски), согласно залегают на кератофирах (фельзитах) или имеют с ними более сложные взаимоотношения. Они относятся к нижнехилокской подсвите верхней юры (J_3h) по Дубченко В.И. или к хысенской свите нижнего мела (K_1hs) – по Морозову М.А.

Наличие крупных тектонических нарушений в пределах участка достоверно и однозначно не доказано; нормальные стратиграфические контакты, наоборот, хорошо согласуются по данным бурения, канав и геоморфологическим признакам.

Урановое оруденение с содержаниями более 0,010 % локализовано только среди осадочных пород нижнехилокской подсвиты верхнеюрского возраста. Оно вскрыто шурфом № 12 и скважинами №№ 26, 27, 28, 33. Для Первого Зазинского рудопроявления характерно наличие сечений с содержаниями урана до 0,198 % на 1,50 м, частных интервалов по данным гамма-каротажа с содержаниями урана до 0,275 % на 0,35 м, а в минералогических пробах – до 0,516 % урана. Урановое оруденение представлено отенитом, бассетитом, коффинитом; оно сопровождается пиритом, баритом, гипсом, ярозитом, апатитом и флюоритом.

Выявленные параметры уранового оруденения, его близповерхностное залегание, минералого-геохимические особенности, слабая литификация вмещающих осадочных пород и их преимущественно грубообломочный состав позволяют считать Первое Зазинское рудопроявление весьма перспективным объектом для выявления месторождения урана, пригодного для отработки методом подземного выщелачивания, скважинным способом или карьером с последующим кучным выщелачиванием.

Сближенные рудопроявления Талын и Тулдон располагаются в узле пересечения Заза-Еравнинской барьерной зоны, Диагонального (СЗ направления), Центрального, Южно-Зазинского (СВ направления) и Эгитинского (субмеридионального) разломов. Развитые здесь юрские осадочно-вулканогенные отложения, вмещающие рудопроявления, разбиты на блоки тектоническими нарушениями высоких порядков субмеридиональной, северо-восточной, северо-западно-субширотной ориентировки. Вулканиты и подстилающие их граниты в зонах нарушений интенсивно окварцованы, каолинизированы, гематитизированы. Кроме рудопроявлений урана, не в полной мере

оцененных, выявлены многочисленные аномалии радиоактивности интенсивностью от 120 до 400-520 мкР/ч.

Рудопроявление Талын локализуется на участке сочетания блоков осадочно-вулканогенных пород субширотной и северо-западной ориентировки в осадочных породах (песчаники, конгломераты удинской свиты). Вскрытое рудное тело характеризуется мощностью 10 м, средним содержанием 0,02 % с отдельными участками богатых руд с содержанием свыше 0,1 %. Здесь предполагается развитие оруденения вдоль борта в северном направлении.

Рудопроявление Тулдон проявлено ореолом радиоактивности (до 410 мкР/ч) размером 600х300 м по данным шпуровых поисков. Скважинами вскрыто рудное тело мощностью 14 м со средним содержанием 0,024 %; в восточном направлении залежь не оконтурена. Оруденение приурочено к сероцветным разногалечным конгломератам.

Как самостоятельные объекты перечисленные рудопроявления вряд ли могут представлять промышленный интерес, но учитывая, что что они расположены в непосредственной близости друг от друга, здесь возможно создать ресурсную базу в размере 20 тыс. т суммы категорий P_1 и P_2.

Таким образом, в пределах Джида-Витимской структурно-металлогенической зоны выделены 4 урановорудных района, перспективных для проведения поисковых и прогнозно-поисковых работ на уран. В выделенных районах возможно выявление урановых месторождений 2 геолого-промышленных типов:

- в неогеновых палеоруслах в связи с зонами экзогенно-эпигенетических изменений («витимский» тип);
- в приразломных депрессиях, выполненных мезозойскими осадочными образованиями в связи с зонами пластового окисления.

Проведение прогнозно-поисковых и поисковых работ в выделенных районах позволит нарастить сырьевую базу действующего предприятия ОАО «Хиагда» в Витимском УРР и создать ресурсную основу для строительства новых добычных предприятий в Бадинском, Джидинском и Еравнинском ПУРР.

МОДЕЛИ УРАНОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ – ОСНОВА ГЕОЛОГО-ПРОМЫШЛЕННОЙ ТИПИЗАЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА В УЗБЕКИСТАНЕ

Ю.Б. Ежков, Р.Р. Рахимов, А.Т. Холиеров, У.Х. Тошметов
ГП «ИМР» Госкомгеологии РУз, г. Ташкент, Республика Узбекистан

Месторождения урана, известные в Узбекистане уже много лет, принадлежат 3-м геолого-промышленным типам (рис. 1). К *гранитофильно-гидротермальному типу* (4,5 % общего баланса урана) относятся жильно-штокверковые позднемагматические и гидротермальные месторождения молибден-урановой и молибден-флюорит-урановой формаций в гранитоидах вулканотектонических депрессий Южноузбекистанского и Чаткало-Кураминского регионов. Месторождения рассматриваемого типа в Узбекистане большей частью отработаны и в состав минерально-сырьевой базы урана в настоящее время не включаются.

К ***гидрогенному (песчаниковому) типу*** (78,9 % общего баланса урана) относятся залежи урановых руд, локализующихся в проницаемых песчаных горизонтах на окислительно-восстановительных барьерах зон пластового окисления. В зарубежных классификациях эти гидрогенные месторождения принадлежат «песчаниковому» типу. Основные месторождения серии расположены в Центрально-Кызылкумской провинции, где активно изучаются и отрабатываются, в связи с чем их генетические особенности в настоящей работе не рассматриваются. Руды оксидные настурановые, настуран-черниевые, урано-слюдковые, иногда с примесью коффинита. Средние содержания урана от 0,026 до 0,18 %. Кроме урана, в рудах отдельных месторождений в промышленных количествах содержатся **селен, молибден, рений, скандий, редкие земли, золото, иттрий.**

Месторождения ***гранитофильно-черносланцевого типа*** (16,6% общего баланса урана) – стратиформные и линейно-штокверковые в урановосных кембрий-раннепалеозойских углеродисто-кремнистых сланцах Центральных Кызылкумов. Представлены залежами урановых и уран-ванадиевых руд, которые существенно преобразованы зоной окисления мелового и неоген-четвертичного возраста. Руды оксидные настуран-черниевые и слюдистые уранил-ванадат-фосфатные, средние содержания урана варьируют от 0,06 до 0,20%. В рудах также выявлены в промышленных содержаниях **ванадий, молибден, иттрий, скандий, редкоземельные элементы, рений, благородные металлы.**

Геологическое строение всех серий месторождений Узбекистана уже неоднократно освещалось в печати (И.Г. Печенкин, Х.К. Каримов, Ю.Ф. Корсаков, Ю.И. Морозов, Л.А. Сим, И.Б. Турамуратов, Ю.Б. Ежков и др.).

В настоящем сообщении мы дополним существующие представления рядом фактов, методических подходов и предположений в основном прогнозно-рекомендательного характера.

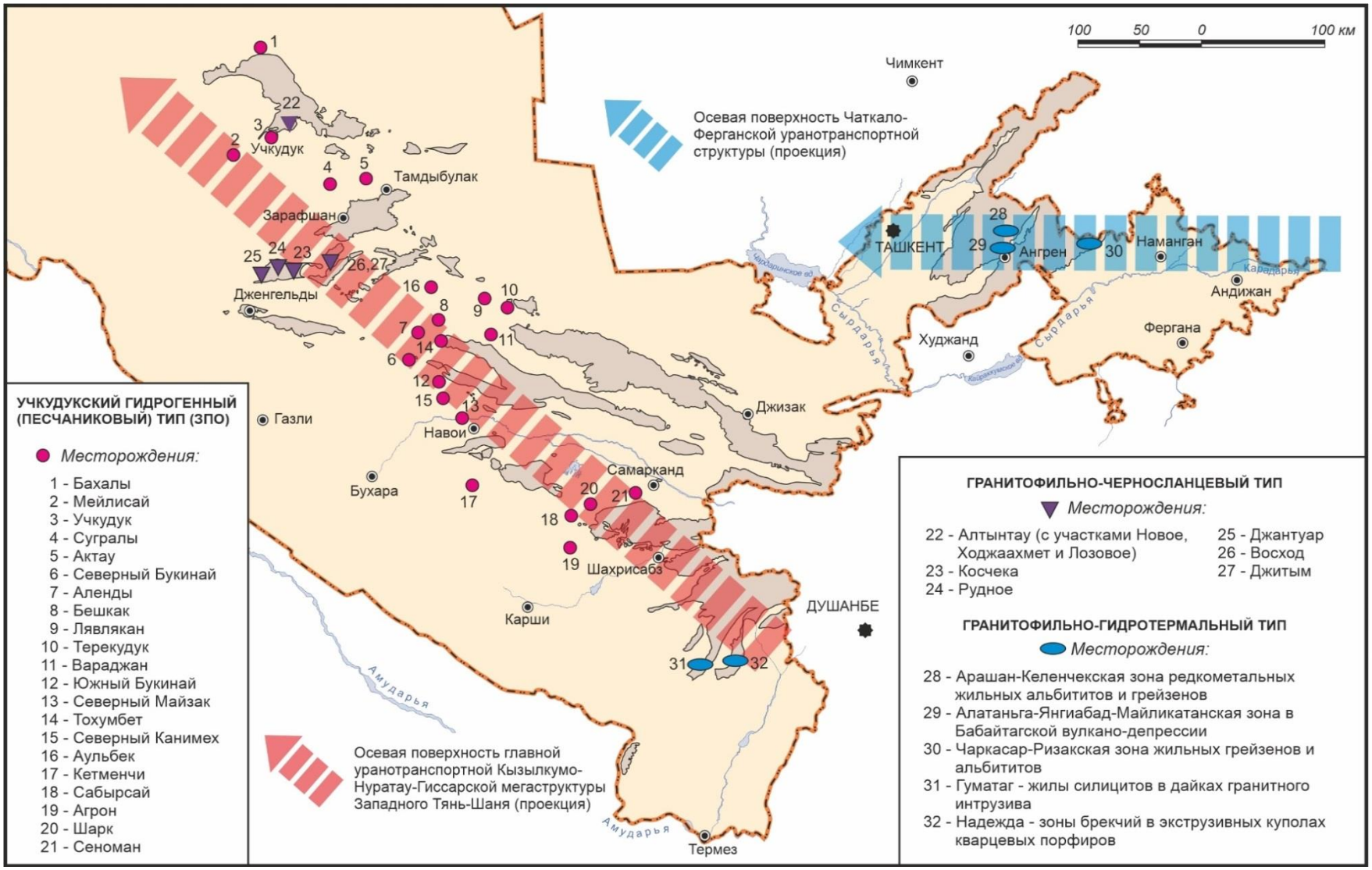


Рис. 1. Модель геолого-промышленной типизации и транспортных структур урановых месторождений Республики Узбекистан. Составил Ю.Б. Ежков

Гранитофильно-гидротермальный тип. Появилась возможность расширить представления о позициях ураноносности в магматитах Узбекистана, используя характеристики особенностей двух урановых проявлений в Южном Узбекистане – Надежда и Гуматаг.

Особенности такого типа уранового оруденения – это его приуроченность к группе секущих структур: сериям экструзивных куполов и сложных (диабаз-кварцевый порфир) даек гранитного комплекса.

Рудопроявление **Надежда** расположено в Байсунском районе Сурхандарьинской области в 30 км к северо-западу от сел. Байсун, в 60 км от ж/д станции Денау, с которыми связано проселочной и частично асфальтированной дорогой. Выявлено в 1960 г. Аэрорадиометрической партией Краснохолмской экспедиции при проведении наземных гаммапоисков масштаба 1:10 000. В 1969-70 гг. проведено геологическое картирование масштабов 1:25 000, 1:10 000, 1:2 000.

Площадь рудопроявления находится в юго-западной части хр. Сурхан-Тау на северном борту Ходжирбулакской грабен-синклинали и ограничена с юга Диагональным, с востока – Нижним разломами. Сложена кристаллическими и осадочно-эффузивными толщами палеозоя, прорванными пермскими субвулканическими кварцевыми и дацитовыми порфирами. Урановое оруденение приурочено к Дистбалинскому экструзиву, представленному серией из шести сближенных куполов, в апикальных частях которых оно и локализовано. Урановое оруденение отмечено в разрывных нарушениях северо-западного и субширотного направлений, проходящих в краевых частях куполов и представленных зонами дробления и гидротермального изменения среди брекчий кварцевых порфиров. Размеры куполов: I – 1300х1000 м, II – 450х450 м, III – 600х450 м, IV – 600х350 м, V – 1000-350 м, VI – 300х100 м.

На площади рудопроявления выявлено более 40 радиоактивных аномалий и проявлений урана. Основная их масса приурочена к Центральному и Восточному участкам. Центральный участок находится в зоне пересечения Межкупольного разлома с Северным и Дистбалинским в пределах I, II и III куполов. Восточный участок включает купол VI и приурочен к пересечению Диабазового разлома с Дистбалинским и Брекчиевым. Рудные тела имеют форму штокверков, жил и линз площадью от 20х1,0 м до 100х4 м. По падению тела не прослеживались. Активность составляет 150-300 мкр/час, на отдельных участках до 1200 мкр/час. Содержание урана от 0,01 до 0,098%. Из урановых минералов определены *настуран, урановая чернь, уранофан, отенит,* представленные вкрапленностью в углеродистом веществе и выделениями в пустотах и трещинах. Из сопутствующих минералов распространены пирит, галенит, халькопирит, арсенопирит, сфалерит, графит, халцедон, кальцит.

Генетический тип оруденения – эндогенный, гидротермальный. Рудопроявление пока представляет собой небольшой труднодоступный объект с прерывистой минерализацией. Перспективы объекта могут

расшириться за счет слепых рудных зон, скрытых под юрскими отложениями в северной части площади.

Рудопроявление **Гуматаг** находится в Сариасийском районе Сурхандарьинской области.

Выявлено в 1963 г. Сурхандарьинской ГСП Узглавгеологии. В 1970 г. ЦГЭ № 3 Краснохолмской экспедиции проведено специализированное геолого-структурное картирование масштабов 1:25 000 и 1:10 000.

Расположено на южной оконечности хр. Байсунтау в юго-западных отрогах Гиссарского хребта и приурочено к гранитному массиву герцинского цикла, прорывающему осадочно-эффузивные образования среднего палеозоя. Среди гранитов развиты дайки диабазовых порфиритов, по сорванным контактам которых отмечены участки катаклазированных и ожелезненных пород.

В 1963 г. выявлено несколько аномальных точек с активностью до 600 мкр/час. В 1970 г. спецработами установлено 30 зон и точек урановой минерализации, приуроченных к сложным дайкам (диабаз-кварцевый порфир) позднегерцинского возраста, развитым в пределах зоны Ходжарбулакского глубинного разлома широтного простирания в полосе площадью 6х1,5 км и достигающим длины 3-5 км. Центральная часть даек сложена зеленовато-серыми кварцевыми порфирами, в которых и отмечена активность до 3000 мкр/час. Протяженность рудоносных зон вдоль отдельных даек при неравномерном распределении урановой минерализации достигает 450 м. *В участках высокой активности наблюдаются прожилки красноцветных карбонатов с тонкой вкрапленностью урановой смолки.* Рудные тела не оконтурены. Руды неконтрастные. Содержание урана колеблется от 0,04 до 0,395% на мощность 0,5-1,0 м.

Гранитофильно-черносланцевый тип и гипергенное рудообразование. В последние годы в кристаллических породах фундамента древних платформ выявляются рудные объекты, характеризующиеся развитием *полигенного уранового оруденения с широким распространением вторичной коффинит-черниевой минерализации.* На одном из таких объектов эндогенные концентрации урана представлены: высокотемпературным уранинитовым оруденением в аплит-пегматоидных гранитах и гидротермальным сульфидно-настуран-коффинитовым в гранитогнейсах в связи с низкотемпературными щелочно-калиевыми метасоматитами гумбеитовой формации. В общем балансе руд существенная роль принадлежит вторичным коффинит-черниевым накоплениям, сформированным экзогенными процессами за счет выщелачивания урана из различных эндогенных проявлений и переотложения его в зонах открытой трещиноватости. Учитывая высокую степень тектонической раздробленности пород, это экзогенное оруденение, по мнению Е.М. Шмариовича, может быть перспективно для извлечения урана способом подземного выщелачивания.

Характер распределения рудной минерализации преимущественно порово-трещинный. Обычно коффинит-черниевые агрегаты концентрируются в гнейсах, реже гранитах на плоскостях «сухих» трещин, а также выполненных хлоритом или хлоритом совместно с кальцитом, гематитом, пиритом. Хлорит нередко находится в смеси с продуктами гипергенного изменения – каолинитом, монтмориллонитом и гидрослюдами. Рудное вещество, по данным микрорадиографий и f-радиографий, часто устанавливается в межзерновых участках породы и по микротрещинкам в породообразующих минералах. Помимо преобладающего отложения в свободных полостях уран накапливается *в минералах-концентраторах – биотите, хлорите, лейкоксене, гидроокислах железа, размещаясь по периферии зерен, спайности, реже микротрещинах по всей массе минерала*.

Пострудная минерализация в кристаллических породах месторождений может проявиться, к примеру, развитием гидротермальных кальцитовых прожилков мощностью до первых миллиметров, которые образуют уходящие на глубины штокверковые зоны. В пределах залежи кальцит частично залечивает трещины с коффинит-черниевой минерализацией, что может несколько ухудшить технологические свойства руд применительно к способу подземного выщелачивания. Продолжительность пострудной гидротермальной деятельности может быть незначительной, поскольку в верхней части профиля выветривания, включая зону дезинтеграции, этот прожилковый кальцит растворен в связи с развитием поздних гипергенных процессов. Последние обусловливают формирование наиболее молодых коффинит-черниевых концентраций, в том числе даже порово-инфильтрационного типа в палеоруслах, выполненных угленосными осадками палеогена.

На характер гипергенных преобразований пород существенное влияние оказывают также изменения палеоклиматических условий, выразившиеся чередованием гумидных и аридных эпох. Эпохи аридизации, которые устанавливаются по появлению красноцветных формаций в платформенном разрезе в регионе, имели место в палеозойское и раннемеловое (неоком, 140-115 млн лет) время. Они обусловливали неоднократную смену гумидного корообразования с кислотно-щелочной зональностью каолинитового профиля *процессами гипергенного окисления пород и рудных залежей, сопровождавшимися выщелачиванием урана и его переотложением в соответствии с дифференцированной зональностью окислительно-восстановительного типа.*

Глубина и масштабы гипергенной проработки пород определялись локальными геолого-структурными условиями участков. Рудное поле в период экзогенного рудообразования представляло собой сложнопостроенный тектонический узел с интенсивной трещиноватостью пород, который выражался в рельефе своеобразной структурой проседания. Последняя отчетливо будет маркироваться повышенными

мощностями коры выветривания и рыхлых отложений, общим понижением гипсометрии кровли, обнажавшегося на поверхности фундамента, признаками активной гидродинамической обстановки (развитие карста в карбонатных горизонтах кайнозойского осадочного чехла и др.). Главной особенностью гипергенных процессов здесь является *формирование мощных урановосных зон цементации* с их специфическими окислительно-восстановительными условиями.

Источником урана в данном случае служат разрушающиеся тела высокотемпературных уранинитовых и гидротермальных сульфидно-коффинит-настурановых руд месторождения, в которых происходит перераспределение гидротермальных концентраций, локализованных по системе пологих зон и их ореолов. Это может устанавливаться в поперечных и продольных разрезах залежи, где видно, что *инфильтрационные накопления урана расположены только в верхней части фундамента, образуя коффинит-черниевую «шляпу» в пределах области распространения первичных рудных концентраций. Вторичное коффинит-черниевое оруденение развивается как непосредственно на фоне эндогенных рудных образований, так и на некотором расстоянии от них.* Величина этого отрыва обусловлена структурной позицией и глубиной эрозионного среза.

Характерно, что весь профиль гипергенных образований, включая рудоносные зоны цементации, резко обеднен пирротином, разрушенным при взаимодействии с трещинными грунтовыми водами сферы активного водообмена. Граница появления этого минерала хорошо маркирует общую глубину распространения преобразующих гипергенных агентов кислотно-щелочной и окислительно-восстановительной направленностей. Приповерхностное обеднение пород моносульфидной серой, по-видимому, происходило как под действием кислых слабовосстановительных, так и близнейтральных исходных окислительных подземных вод. Первые, очевидно, преобладали в эпоху гумидного климата и каолинового корообразования, вторые – в эпохи аридизации с господством окислительных обстановок.

В связи с затронутой проблемой гипергенного рудообразования чрезвычайно важно дальнейшее изучение геологических обстановок, благоприятных для формирования черниевого оруденения в трещиноватых кристаллических породах. В частности, до настоящего времени окончательно неясен вопрос *о возможностях масштабного экзогенного эпигенетического рудообразования в фундаменте в случае отсутствия первичного оруденения* – при существовании любого другого благоприятного источника металла, например, *в виде его надкларковых концентраций в окисляющихся высокорадиоактивных гранитах, кислых эффузивах или черных сланцах*. Не менее актуальны также исследования разных геохимических обстановок, способных эффективно осаждать уран из трещинно-инфильтрационных вод. Кроме минерального восстановителя – пирротина, потенциал-понизителями

здесь могут быть также газообразные сероводород и водород, поступившие ранее с глубины по тектонически ослабленным зонам и окклюдированные в микропорах и микротрещинах пород. В этом случае при наличии благоприятного источника урана перспективными следовало бы считать не только пирротинсодержащие формации, но и другие вмещающие комплексы *вблизи глубинных разломов, по которым можно предполагать длительное поступление газообразных восстановителей и их сохранность ко времени развития окислительного эпигенеза.*

Разработка указанной проблемы в целом могла бы открыть значительные перспективы целенаправленных поисков трещинно-инфильтрационных коффинит-черниевых месторождений *в кристаллических породах разных регионов, в том числе малоинтересных с позиций эндогенной урановой металлогении.* Это направление является, на наш взгляд, одним из важных в дальнейших тематических исследованиях и требует привлечения комплекса методов литолого-петрографического, геолого-структурного, минералого-геохимического, палеоклиматического и историко-геологического анализа.

В этом плане интересно ознакомиться с геохимическими спектрами двух эталонных месторождений полигенного типа в Центральных Кызылкумах – **Рудное и Новое** (рис. 2, 3). Спектры отражают геохимические последовательности элементов, ранжированных по уровням кларков-концентрации, рассчитанных для всего рудного разреза месторождений: зона интенсивного гипергенеза и зона умеренного гипергенеза – обе над горизонтом слабоизмененных углеродистых сланцев.

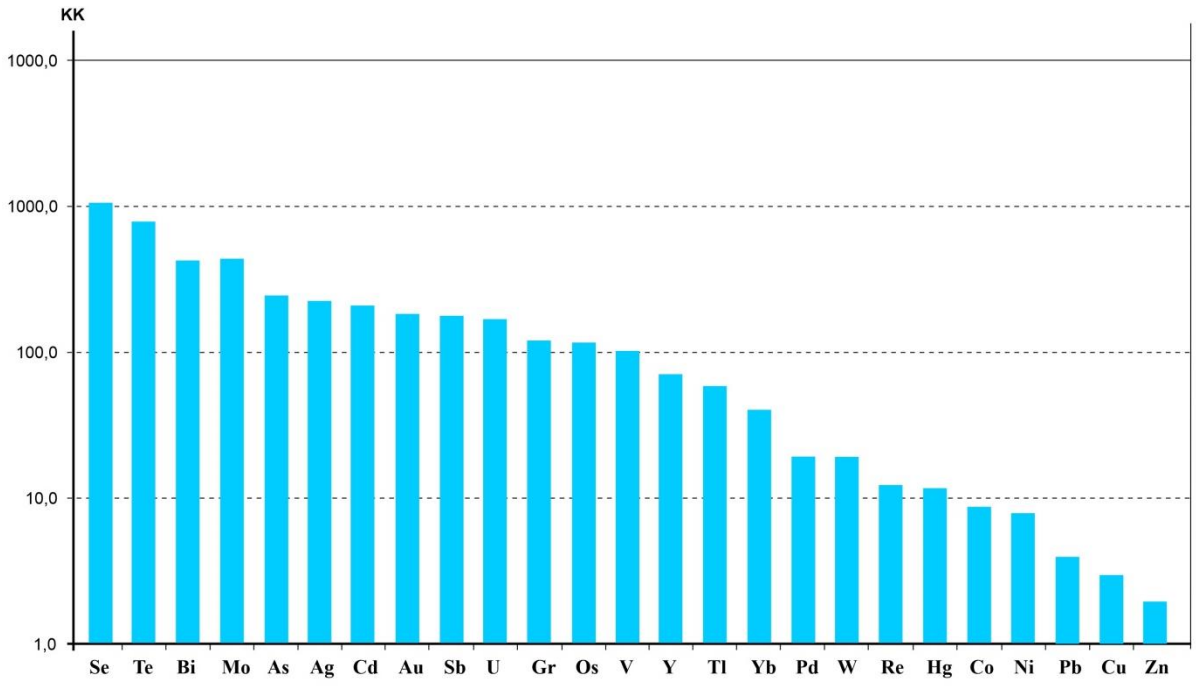


Рис. 2. Распределение коэффициентов концентрации (КК) главных и сопутствующих элементов руд месторождения Рудное

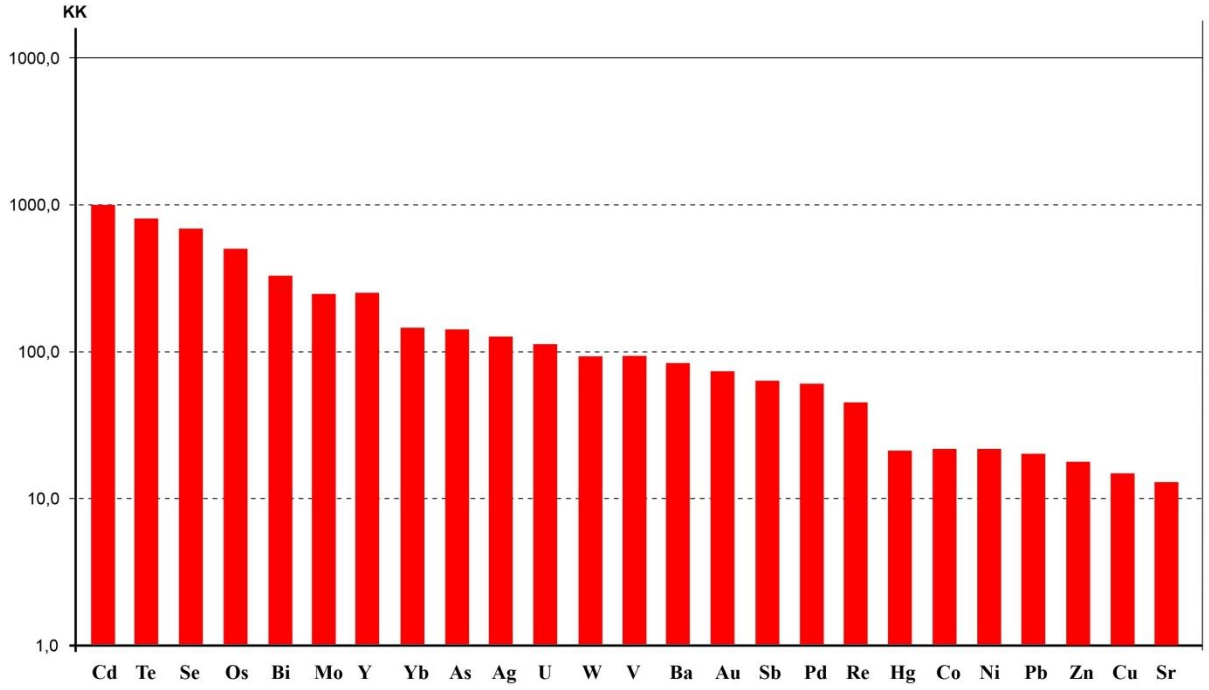


Рис. 3. Распределение коэффициентов концентрации (КК) главных и сопутствующих элементов руд месторождения Новое

Добавим, что по сравнению с мировыми аналогами сланцевых образований на месторождениях Кызылкумов интенсивно накапливаются: рассеянные элементы – **Se, Te**; редкие сульфидообразователи – **Mo**, **Bi**; **Y**, а из группы **REE** – **Yb** и профилирующие элементы урановых руд – **U, V, Au, Ag**.

Латеральная модель уранотранспортных структур геолого-промышленной типизации месторождений урана. На рисунке 1 нами уже было показано, что геолого-промышленной типизацией в Узбекистане охвачено три основных группы урановых месторождений.

Справедливости ради отметим, что на рубеже XX и XXI веков силами геологов бывшей Краснохолмской ГРЭ с помощью научных организаций России был создан Атлас специализированных карт, позволивший в свою очередь создать объемную модель Центрально-Кызылкумской урановорудной провинции – крупного блока Туранской плиты.

Центрально-Кызылкумская урановорудная провинция (ЦКУП) приурочена к одноименному сводово-блоковому поднятию северо-западного простирания в восточной части молодой эпипалеозойской Туранской плиты, разделяющему Сырдарьинскую и Бухаро-Хивинскую депрессии (Мавлянов, Корсаков, 2008). Это поднятие, по их мнению, вытянутое с юго-востока от гор Каратепе на северо-запад до северных склонов Букантау, имеет протяженность порядка 500 км и ширину около 200 км. Географически включает поднятия Центральных Кызылкумов и северо-восточную часть Бухаро-Хивинской депрессии. Кызылкумское сводовое поднятие зародилось как самостоятельная геологическая структура на гетерогенном палеозойском основании в раннем мезозое.

Известно, что геологические формации, развитые в провинции, образуют два структурных этажа: фундамент, представленный консолидированными ранне-, позднепротерозойскими и палеозойскими образованиями, и слаболитифицированный мезозой-кайнозойский осадочный чехол. Метаморфогенно-осадочно-вулканогенные формации фундамента с верхнепалеозойскими, в основном гранитоидными интрузиями, выходят на поверхность в пределах Кызылкумских горных поднятий, обрамленных образованиями платформенного чехла, почти повсеместно перекрытого современными осадками.

Современный структурный план ЦКУП обусловлен неоген-четвертичной тектонической постплатформенной активизацией Центрально-Азиатского орогенного пояса. В результате проявления процессов орогенеза в миоцене, плиоцене и антропогене территории Тянь-Шаня и Туранской плиты по амплитудам новейших блоковых движений были разделены на несколько структурных зон.

Не вдаваясь в дальнейшие подробности структурно-тектонического строения Западно-Тяньшанского региона и проведя здесь собственный анализ и обобщение по позициям размещения уранового оруденения, мы сочли возможным выделить (протрассировать) секущие урановосные зоны (см. рис. 1) над транспортными структурами глубинных рудоносных корово-мантийных флюидов; структуры показаны в виде проекции осевых поверхностей.

Кызылкумо-Нуратау-Гиссарская (Западно-Тянь-Шаньская) транспортная секущая мегаструктура включает в себя: 1) площади блоков высокого стояния нижнего структурного этажа с реальной эндогенной урановосностью; 2) территории опущенных блоков с реальной урановосностью пород чехла (инфильтрация, элизия, гидрогенез) над урановосным кристаллическим фундаментом.

Близширотная *Чаткало-Ферганская* U-транспортная структура включает в своей средней части магматогенный вулкано-плутонический Чаткало-Кураминский блок высокого стояния, а на флангах своего погружения (опущенные блоки) под породы чехла – гидрогенные месторождения урана.

В целом уранотранспортные структуры – это генеральные направления сложного многоэтапного проявления рудогенных процессов – от источника металла до позиций рудолокализации (часто в сложных минеральных формах).

Масштабы и интенсивность накопления урановых руд и элементов-парагенов урана в пределах глубинных транспортных структур Узбекистана позволяют думать, что перспективы их рудогенного потенциала еще далеко не исчерпаны.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ НА УРАН

Г.А. Машковцев, Н.А. Гребенкин, А.В. Петрин, Д.А. Прохоров
ФГБУ «ВИМС», г. Москва

Введение

Актуальность рассматриваемых в статье проблем продиктована запланированным «Росатомом» существенным увеличением производства электроэнергии (ЭЭ) на отечественных АЭС, объемы которого должны составлять к 2035 г. не менее четверти от всей общероссийской ее выработки. Увеличение энергопроизводства потребует существенного наращивания МСБ урана за счет выявления объектов с рентабельными для освоения запасами. В связи с низкими качественными показателями имеющихся запасов основные направления геологоразведочных работ должны быть направлены на выявление, оценку и подготовку к освоению месторождений с богатыми эндогенными и технологичными гидрогенными рудами. В статье приводятся сведения о состоянии мировой и отечественной атомной промышленности и минерально-сырьевой базы урана РФ.

Мировая урановая промышленность

В 2020 г. в мире действовало 442 реактора суммарной мощностью 392,6 ГВт, производившими около 10% электроэнергии [7]. Потребление природного урана составляло 61,8 тыс. т [7]. Однако производство сырья по отношению к 2016 г. сократилось на 25%, опустившись до 47,6 тыс. т [1]. В наибольшей степени добычу урана снизили лидеры мировой отрасли: Казахстан – с 24,7 до 19,5 тыс. т и Канада – с 14 до 4,0 тыс. т [1]. Снижение производства металла произошло в основном в связи с падением цен уранового сырья и горнотехническими проблемами отдельных крупных рудников Канады. Создавшаяся напряженная ситуация с сырьевым обеспечением АЭС усиливается планами стран юго-восточного региона по наращиванию мощностей атомной энергетики.

По оценкам Всемирной ядерной ассоциации (WNA) к 2030 г. мощности мирового парка АЭС должны составить 420-440 ГВт (431 ГВт [6]), при этом потребность в уране к 2025 г. вырастет с текущих 62,5 до 112,3 тыс. тонн в год в 2040 году [1]. Очевидное наращивание дефицита уранового сырья должно вызвать существенное увеличение конъюнктуры мирового рынка. Подтверждением этого является существенное повышение цен на уран в текущее время – только с августа 2021 г. и по настоящее время спотовая цена выросла почти в 2 раза с 70 до 130 долл./кг, и эта тенденция продолжится в перспективе.

Мировая минерально-сырьевая база урана составляет 8 млн т извлекаемых запасов [1], однако за последние десятилетия интенсивной

разработки песчаниковых месторождений и типа «несогласий» доля относительно дешевых категорий запасов до 80 долл./кг существенно сократилась. В связи с этим уже в ближайшей перспективе мировой атомной промышленности придется использовать более дорогое сырье и его импорт для многих государств, в т.ч. для России, будет достаточно дорогим.

Атомная промышленность РФ

В настоящее время в ***атомном энергетическом комплексе*** РФ работает 35 реакторов установленной мощностью более 29,3 ГВт [7] и с потребностью в урановом сырье порядка 5 тыс. т в год. К 2040-2050 гг. Госкорпорация «Росатом» планирует наращивание производства электроэнергии (ЭЭ) на АЭС, доля которого должна достигнуть 25% от суммарного энергопроизводства с годовым объемом более 390 млрд кВт·ч. До этого времени атомная энергетика будет базироваться, в основном, на тепловых модернизированных реакторах ВВЭР-1200 ТОИ и др., которые будут вводиться в энергосистемы путем замены устаревших блоков и строительства новых АЭС. Кроме того, в этот же период планируется сооружение и ввод в производство реакторов малой и средней мощности (РИТМ-200 и др.), главным образом для создания и деятельности изолированных энергосистем, т.н. «островных» потребителей ЭЭ в арктических и дальневосточных регионах. Таким образом, потребности в уране для российских атомных реакторов большой, средней и малой мощности, включая энергоблоки корабельного базирования и научного направления, должны составлять порядка 6 тыс. т в год. Кроме того, значительные потребности уранового сырья – порядка 10 тыс. т, потребуются для обеспечения деятельности реакторов зарубежных стран, построенных по российско-советским проектам, что вместе с экспортом природного урана должно составлять порядка 20 тыс. т в год, до 2035-2040 гг.

В последующем объемы потребления природного урана отечественной атомной промышленностью не определены, главным образом в связи с вводом в энергосистему ГК «Росатом» активно разрабатываемых в настоящее время по программе «Прорыв» реакторов на быстрых нейтронах (БН). Предполагается после 2040-2045 гг. ввести в энергосистему двухкомпонентные блоки, предусматривающие взаимодействие тепловых реакторов и реакторов на быстрых нейтронах (БН), что позволит отходы первых использовать в качестве сырья для вторых. В принципе прогнозируется, что включение в производство реакторов БН в том или ином соотношении с тепловыми позволит существенно снизить потребности атомной промышленности в природном уране, которая в настоящее время использует только изотоп U^{235}, естественное содержание которого в уране составляет всего около 0,7%. Однако конкретные годовые потребности не определены. Неясны также объемы строительства силами ГК «Росатом» АЭС за рубежом и, соответственно, потребления российского сырья для их деятельности.

Поэтому вопросы минерально-сырьевого обеспечения отечественной атомной промышленности после 2040 г. здесь не рассматриваются.

Горнорудный дивизион ГК «Росатом» включает четыре предприятия АО «Атомредметзолото», действующие на территории РФ, а также предприятия в Республике Казахстан, в Танзании и Намибии, подчиненные Uranium One Inc.

Ведущим предприятием АО «Атомредметзолото» (Забайкальский край) является *ПАО «ППГХО»*, отрабатывающее подземным горным способом жильно-штокверковые месторождения урана Стрельцовского рудного поля Урулюнгуевского рудного района. Месторождения Стрельцовское, Антей и Мало-Тулукуевское разрабатываются, Аргунское и Жерловое подготавливаются к добычным работам. Запасы разрабатываемых и подготавливаемых объектов составляют 78,0 тыс. т, в том числе активные – 37,1 тыс. т [8]. Годовая производительность ПАО ППГХО» около 1,3 тыс. т урана, но с вводом в эксплуатацию рудника 6 объемы добычи возрастут до 2,5 тыс. т. При этом деятельность предприятия должна продлиться до 2045-2050 гг.

АО «Хиагда» (Республика Бурятия) отрабатывает скважинным подземным выщелачиванием (СПВ) месторождения в песчаниках Витимского района с суммарными запасами 33,5 тыс. т со Сср. U – 0,039% [8]. Запасы урана сосредоточены на 7 объектах, из которых Хиагдинское, Вершинное и Источное находятся в разработке, Количиканское, Намаруское, Кореткондинское, Дыбрынское будут последовательно вовлекаться в освоение в перспективе. Производство урана в 2021 г. составило около 1,0 тыс. т в год. Учтенные запасы урана позволяют рассчитывать на деятельность предприятия на 25-30 лет. Однако имеющиеся прогнозные ресурсы (ПР) урана категории P_1, локализованные в сопредельных палеодолинах на флангах района, при переводе в запасы позволят увеличить годовую добычу до 1,3-1,5 тыс. т и продлить сроки деятельности предприятия до 2060 гг.

АО «Далур» (Курганская обл.) осваивает способом СПВ 3 глубоко залегающие палеорусловые месторождения Зауральского района с суммарными запасами 12,7 тыс. т и средним содержанием урана 0,044% [8]. Добыча осуществляется с глубин 450-550 м на месторождении Далматовское и Хохловское с годовой производительностью 600 т. Месторождение Добровольное подготавливается к разработке. На имеющейся МСБ предусматривается деятельность предприятия с годовой производительностью 500-700 т. Таким образом, срок работы предприятия составит 17 лет, т.е. до 2040 г. Возможности расширения урановой сырьевой базы отсутствуют. Опытно-промышленными работами доказана возможность попутного с ураном получения скандия, а в перспективе, при проведении соответствующих тематических и опытных работ, и редких земель, что позволит улучшить экономические показатели деятельности предприятия.

АО «ЭГМК» (Республика Саха-Якутия) имеет лицензию на разработку 6 золото-урановых месторождений Зоны Южной Эльконского рудного района с суммарными запасами 357 тыс. т при среднем содержании урана в рудах 0,147 % [8] и запасами золота 178,9 т при среднем содержании 0,8 г/т. Низкое качество руд, значительная глубина их залегания и сложные горнотехнические условия обуславливают высокую себестоимость разработки объектов, неприемлемую при современной низкой конъюнктуре уранового рынка. Поэтому освоение Зоны Южной, возможно, начнется после 2030 г. при весьма вероятном повышении цен на уран. Исключение составляет месторождение Северное, подготавливаемое в настоящее время к карьерной добыче свободного золота зоны окисления комплексных руд.

Таким образом, к 2030-2035 гг. на предприятиях АО «АРМЗ» на имеющихся запасах возможно суммарное производство урана до 3,0 тыс. т в год, что явно недостаточно для сырьевого обеспечения запланированных увеличенных объемов выработки ЭЭ на АЭС и независимости страны в важнейшем стратегическом минеральном сырье. В связи с этим уже в настоящее время необходимо активное развитие ГРР по наращиванию запасов в осваиваемых районах и выявлению и оценке новых месторождений на перспективных площадях.

Добычное предприятие Uranium One Inc. осваивает месторождения в песчаниках в Республике Казахстан, в Танзании и Намибии с суммарными ресурсами 187 тыс. т [5].

Производство урана осуществляется в настоящее время только в Казахстане, где российскими и казахскими организациями совместно разрабатываются способом СПВ 6 месторождений с суммарными разведанными запасами 112 тыс. т. В настоящее время российская доля добычи металла составляет порядка 4,3 тыс. т, в 2025 г. планируется рост производительности до 6 тыс. т, а к 2040 г. в связи с полным истощением запасов на осваиваемых объектах, кроме Южного Инкая, она снизится до 2 тыс. т [5]. Для восстановления достигнутых величин потребуются усилия ГК «Росатом» по участию российских недропользователей в других проектах Казахстана.

Проект *Мкуджу Ривер* в Танзании связан с освоением крупного месторождения Ньёота в слаболитифицированных песчаниках с запасами 58,5 тыс. т урана и годовой проектной производительностью 3 тыс. т металла в год. Объект полностью готов для освоения, которое будет осуществляться в начале карьерной добычей с кучным выщелачиванием, на втором этапе – способом СПВ. Начало разработки объекта намечено на 2030 г. [5].

Проект *«Крылья»* в Намибии включает проведение ГРР на одноименном месторождении в песчаниках, которое является одним из важнейших мировых открытий последних десятилетий. Ресурсный потенциал объекта пока не определен, однако его запасы, оцениваемые экспертно в диапазоне 64,6 тыс. т, вполне достаточны для годового производства урана до 3 тыс. т [5].

Минерально-сырьевая база урана РФ

На 01.01.2021 г. балансовые запасы урана составляют 710,6 тыс. т, в т.ч. $A+B+C_1$ – 327,1 тыс. т, C_2 – 383,5 тыс. т, забалансовые запасы – 132,6 тыс. т [8], и ПР категорий P_1 – 164,7 тыс. т, P_2 – 528,6 тыс. т, P_3 – 1894,3 тыс. т [9].

Балансовые и забалансовые запасы урана РФ учтены в 60 больших и малых месторождениях, количественные характеристики ведущих из них приведены в табл. 1, а размещение на территории страны – на рис. 1. Основной объем запасов (73%) сосредоточен в жильно-штокверковых объектах и незначительная часть – в песчаниковых. По себестоимости добычи по категорийности МАГАТЭ более 70% запасов относится к наиболее дорогим – 130 долл./кг и выше, 20% – к категории 130-80 долл./кг и менее 9% – 80 долл./кг и менее, которые являются рентабельными для освоения. Распределенный фонд недр включает 500 тыс. т, который целиком принадлежит ПАО «АРМЗ». Запасы нераспределенного фонда насчитывают 210,7 тыс. т.

Таблица 1

Количественные характеристики главных месторождений урана РФ

	Месторождение	Запасы, т	Среднее содержание, %
Урулюнгуевский рудный район			
1	Стрельцовское	24644	0,145
2	Антей	4230	0,058
3	Мало-Тулукуевское	8253	0,150
4	Аргунское	37438	0,215
5	Жерловое	3485	0,087
Витимский рудный район			
6	Хиагдинское	4162	0,053
7	Вершинное	4092	0,031
8	Источное	1251	0,054
9	Количиканское	6530	0,036
10	Намаруское	6120	0,042
11	Кореткндинское	4721	0,043
12	Добрынское	6634	0,039
13	Тетрахское	6429 (забалансовые)	0,047
Зауральский урановорудный район			
14	Далматовское	1243	0,002
15	Хохловское	4470	0,028
16	Добровольное	7399	0,056
Эльконский урановорудный район			
17	Элькон	40263	0,174
18	Эльконское плато	62410	0,157
19	Курунг	54849	0,145
20	Непроходимое	42258	0,112
21	Дружное	95840	0,134
22	Северное	61523	0,153

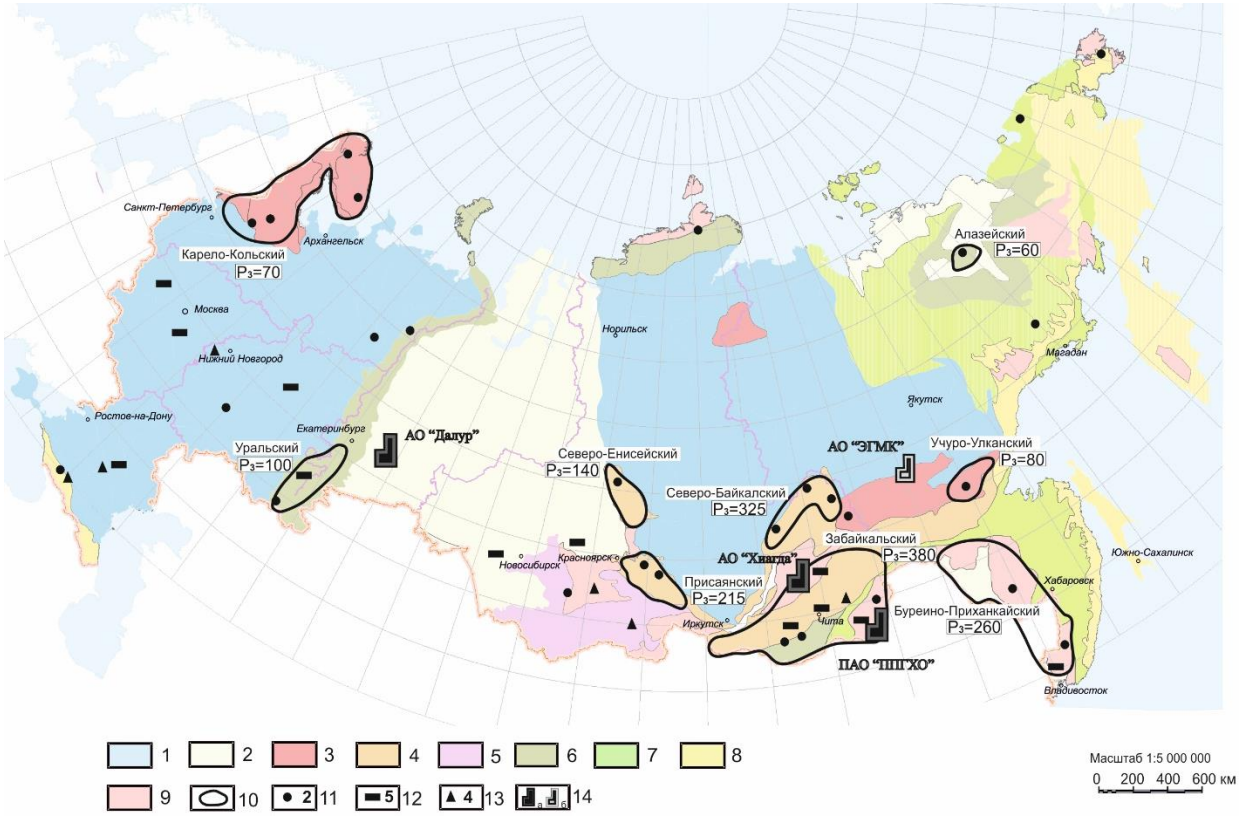


Рис. 1. Схема размещения основных урановоносных и урановорудных регионов России. 1-2 – чехлы платформ: 1 – древних, 2 – молодых; 3 – кристаллические щиты; 4-8 – складчатые системы: 4 – байкальская, 5 – каледонская, 6 – герцинская, 7 – киммерийско-ларамийская, 8 – альпийская; 9 – срединные массивы; 10 – урановоносные регионы; 11-13 – урановорудные и урановоносные районы и узлы с месторождениями: 11 – эндогенными гидротермальными; 12 – экзогенно-эпигенетическими; 13 – гибридными (гидротермально-осадочными), а также спорного и неясного генезиса; 14 – основные урановорудные районы с действующими (а) и планируемыми (б) горнорудными предприятиями

Запасы распределенного фонда недр сосредоточены на территориях Сибирского и Дальневосточного регионов, в четырех осваиваемых районах – Урулюнгуевском, Витимском, Зауральском и Эльконском. Но и в этом фонде доля рентабельных для освоения запасов урана не превышает 7-8%.

Урулюнгуевский рудный район (ПАО «ППГХО»). Балансовые запасы основного осваиваемого объекта Стрельцовского рудного поля (СРП) составляют 96,6 тыс. т со средним содержанием в рудах 0,157% и забалансовые – 17,2 тыс. т [8]. Значительная часть запасов урана в СРП (58,3 тыс. т) являются остаточными, из которых около 37,1 тыс. т – на отрабатываемых Стрельцовском, Антейском и Мало-Тулукуевском месторождениях, порядка 41,0 тыс. т сосредоточено в подготавливаемых для разработки Аргунском и Жерловом, и 18,5 тыс. т низкорентабельных запасов остаются в недрах в пределах отработанных и законсервированных месторождений (Новогоднее, Мартовское, Лучистое, Юбилейное, Тулукуевское, Весеннее и Октябрьское). Низкое качество руд служит

основным фактором невысокого уровня экономической деятельности предприятия. В пределах СРП и его флангов имеются малоизученные участки с ожидаемым богатым урановым оруденением, выявление и оценка которого позволили бы улучшить качественные параметры производства уранового сырья.

Витимский урановорудный район (АО «Хиагда») располагает балансовыми запасами (33,5 тыс. т) осваиваемого Хиагдинского рудного поля со средним содержанием урана 0,039%, распределенными среди семи месторождений в палеоруслах – Хиагдинское, Вершинное, Источное, Количиканское, Намарусское, Кореткондинское и Дыбрынское [8]. Первые три находятся в разработке СПВ, остальные будут в перспективе последовательно вводиться в освоение. В непосредственной близости от промплощадки предприятия расположено пока незалицензированное месторождение Тетрахское с забалансовыми запасами 6,4 тыс. т и средним содержанием урана 0,047%, которое также планируется к разработке в ближайшие годы. На флангах Хиагдинского рудного поля локализованы 59,4 тыс. т прогнозных ресурсов категории P_1 и 90,6 тыс. т P_2, которые после проведения оценочных и разведочных работ могут в значительном объеме быть переведены в запасы. На окраинах Витимского района ранее выявлены и оценены несколько гидрогенных месторождений с забалансовыми запасами: Имское (23,6 тыс. т), Буяновское (5,3 тыс. т), Родионовское (4,6 тыс. т), Щегловское (7,5 тыс. т) и другие, более мелкие объекты [9]. По данным предшественников месторождение Имское непригодно к разработке СПВ в связи с высокой литификацией и, соответственно, низкой проницаемостью рудовмещающих отложений, остальные нуждаются в проведении дополнительных оценочных работ по определению технологической и экономической возможности их освоения.

Зауральский урановорудный район (АО «Далур») включает три гидрогенных, глубоко залегающих месторождения в юрских палеоруслах – Далматовское, Хохловское, Добровольное с суммарными запасами 12,7 тыс. т и средним содержанием урана 0,044% [8]. Первые два интенсивно разрабатываются с годовым объемом добычи около 600 т урана, Добровольное с запасами 7,4 тыс. т подготавливается к освоению. Наряду с ураном в рудах присутствует в невысоких концентрациях скандий, который по результатам опытно-промышленной эксплуатации успешно извлекается попутно с ураном из продуктивных рабочих растворов. Перспективы расширения МСБ за счет выявления новых месторождений на приемлемых для рентабельной разработки глубинах в районе отсутствуют.

Эльконский урановорудный район (АО «ЭГМК») располагает шестью крупными месторождениями, образующими протяженную (25 км) рудную Южную Зону с суммарными балансовыми запасами 357 тыс. т и забалансовыми 45,7 тыс. т [8]. Урановое оруденение жильное, крутопадающее, залегающее в крупных тектонических зонах в диапазоне глубин 200-1500 м, руды комплексные, наряду с ураном

присутствуют золото (178,9 т), серебро, молибден. Среднее содержание урана составляет 0,147%, Au – 0,8 г/т.

На флангах Зоны Южной размещается группа мелких объектов – зоны Пологая, Надеждинская, Интересная и др., запасы урана на которых варьируют от 0,7 до 8 тыс. т с суммарным объемом 25,6 тыс. т, а содержание от 0,132 до 0,356%, составляя в среднем 0,178%. Важнейшей особенностью месторождений является их залегание выше штольневых горизонтов, что вместе с более высокими, чем в объектах Зоны Южной, позволяет их разрабатывать с приемлемой рентабельностью на первых порах освоения района с годовой производительностью по урану 600 т.

Прогнозные ресурсы урана Сибири и Дальнего Востока, служащие исходной основой подготовки запасов, составляют: P_1 – 130,7 тыс. т, P_2 – 464,6 тыс. т, P_3 – 1704,3 тыс. т [9]. Около 150 тыс. т ПР категорий P_1 и P_2 сосредоточены в палеодолинах Витимского района и пригодны для формирования на их основе запасов урана. Остальная их часть размещена в регионе в виде рассредоточенных на значительных площадях локальных скоплений с незначительными количествами ПР, не имеющих практического значения.

Прогнозные ресурсы категории P_3 установлены в связи с крупными структурами домезозойского фундамента, перспективными на выявление жильно-штокверковых месторождений в вулкано-тектонических структурах (ВТС) и в связи с зонами древних ССН, а также мезозойско-кайнозойских впадин с ожидаемым оруденением в песчаниках. Основной объем ПР категории P_3 (730 тыс. т) связан с крупными древними гранитизированными блоками южного обрамления Восточно-Сибирской плиты, в их числе Енисейский кряж, Восточный Саян, Северное Прибайкалье, Восточный склон Алданского щита (Учуро-Майский прогиб). Их урановосность, кроме структурно-формационных и металлогенических факторов, подтверждается размещением в их пределах мелких урановых месторождений и часто недоизученных рудопроявлений. Перспективные на уран вулкано-тектонические структуры типа Стрельцовской ВТС связаны, главным образом, с проявлением мезозойской тектоно-магматической активизации и располагаются в пределах Забайкальского и Хабаровского краев. Среди них наибольший практический интерес для развития геологоразведочных работ представляет Каменушинская ВТС, наложенная на гранитизированные формации Буреинского массива и содержащая в своей северной краевой части малые урановые месторождения Ласточка и Светлое, а также несколько рудопроявлений.

Прогнозные ресурсы урана категории P_3 учтены для депрессионных структур, перспективных на выявление гидрогенного оруденения. Наибольший практический интерес представляют мезозойские (нижнемеловые) впадины (Забайкальский край и Республика Бурятия), где ранее были установлены проявления урана в связи с зонами грунтового

окисления. Перспективными являются песчано-глинистые отложения неоген-четвертичного возраста, перекрытые молодыми базальтовыми покровами в отдельных структурах Южного Прибайкалья. Наиболее приоритетна Муясынская структура, расположенная среди специализированных на уран палеозойских гранитоидов, которые могут служить объемным источником металла при гидрогенном рудообразовании. Определенными перспективами на обнаружение экзогенно-эпигенетических урановых месторождений обладают ранее не изучавшиеся северные окраины Амуро-Зейской впадины и западные Приханкайского прогиба, непосредственно примыкающие к восточному склону с гранитизированными структурами фундамента.

Кроме приведенных выше, выделены и другие рудоперспективные структуры Сибири и Дальнего Востока, заслуживающие проведения региональных прогнозно-минерагенических исследований м-ба 1:200 000-1:50 000 с целью выделения и обоснования детальных поисковых площадей.

Основные направления геологоразведочных работ

Исходя из имеющегося на настоящее время фактического материала авторами разработан план дальнейшего последовательного изучения ураноносности Сибири и Дальнего Востока с целью увеличения МСБ урана этих регионов [3]. Планом предусматривается проведение прогнозных, поисковых, оценочных и разведочных работ.

Планируемые геологоразведочные работы призваны решать две крупные задачи: расширение и улучшение минерально-сырьевых баз урана осваиваемых районов, а также выявление и оценка новых объектов в рудоперспективных регионах, заслуживающих горно-добычной деятельности вновь создаваемых предприятий.

Геологоразведочные работы в осваиваемых урановорудных районах РФ в планируемый период будут проводиться в Урулюнгуевском, Витимском и Зауральском районах и должны включать поиски, оценку и разведку определившихся объектов [2].

В *Урулюнгуевском районе* в Стрельцовском рудном поле в связи с истощением запасов высококачественных урановых руд предусматривается реализация подготовленного проекта «Кальдера», нацеленного на выявление и оценку скрытого богатого оруденения на малоизученных участках СРП и сопредельных локальных структурах. Проект включает весь комплекс опережающих геофизических, геохимических, геолого-структурных исследований и глубинных поисков бурением с вскрытием перспективных локальных структур осадочно-вулканогенного чехла и кристаллического гранитного фундамента. Среди других ВТС района определенными перспективами на обнаружение скрытого оруденения обладает Куйтунская структура.

Выявленные в районе урановые объекты песчаникового типа Полевое, Меридиональное, Тарбаганжинское, Гыритуйское, Усть-Харганатуйское и

др., сложенные пластовыми рудными телами в мезозойских осадочных отложениях впадин, требуют предварительных геотехнологических испытаний с целью определения возможности их освоения способом СПВ.

Значительный объем разведочных и оценочных работ необходимо реализовать в *Витимском районе* по подготовке запасов урана на базе ранее локализованных прогнозных ресурсов (ПР) категорий P_1 и P_2 в суммарном объеме 59,4 и 90,6 тыс. т соответственно. По проведенной оценке пригодности к СПВ ПР к подготовке запасов урана выделено две группы объектов: заслуживающие постановки собственно разведочных работ и требующие доизучения на стадиях поиска и оценки. К первой группе отнесены рудоносные долины Баркасунского, Кулариктинского, Джилиндинского, Красного, Дулесминского рудного поля (РП) с суммарными прогнозными ресурсами категории P_1 – 58,5 тыс. т, 26,5 тыс. т из которых пригодны для первоочередного освоения СПВ, а 32 тыс. т требуют геологического доизучения, в рамках которого необходимо будет уточнить условия локализации уранового оруденения, исключить из подсчета урансодержащие малопроницаемые глинисто-алевролитовые, мерзлые и необводненные отложения и уточнить качественные и количественные параметры, пригодного для освоения СПВ уранового оруденения. Ко второй – Аталангинская и Дутакитские системы русловых структур, где единичными скважинами ранее было вскрыто урановое оруденение. В границах перспективных участков необходимо проведение поисковых и оценочных работ с целью выявления суммарно ПР категории P_1 – 13 тыс. т и P_2 – 30 тыс. т.

Ранее подготовленные запасы урана, количество которых в настоящее время составляет 33,5 тыс. т, вместе с ожидаемыми потенциальными в результате проведения разведочных, оценочных и поисковых работ могут составить в сумме около 70-75 тыс. т промышленных балансовых запасов предприятия.

В перспективе следует осуществить оценочные работы на ранее выявленных месторождениях Витимского района Родионовское, Щегловское и др., на которых урановое оруденение локализовано в проницаемых песчаниках и в практически непроницаемых мерзлых породах и базальтах. Основной задачей оценочных работ должна стать достоверная оценка запасов урана, пригодных для добычи СПВ, и определение возможности применения кучного выщелачивания для разработки урановых руд, залегающих в вечной мерзлоте и базальтах.

Рассмотренные реальные возможности существенного расширения МСБ урана на АО «Хиагда» позволит значительно увеличить сроки его производственной деятельности до 2050-2060-х гг. с годовой добычей урана 1,3-1,5 т.

В Зауральском районе в ближайшей перспективе будут завершены разведочные работы на месторождении Добровольное с подготовкой около 7,4 тыс. т запасов урана. Производство металла на этом объекте позволит скомпенсировать убывающие добычные мощности на Далматовском

месторождении и сохранить общий объем производства урана в районе до 2030-2035 гг. на уровне 550-600 т. Перспективы расширения МСБ предприятия АО «Далур» в Зауральском районе отсутствуют.

Прогнозные и поисковые работы на уран в рудоперспетивных районах Восточной Сибири и Дальнего Востока. Эти работы включают три взаимосвязанных вида исследований – прогнозно-аналитические, охватывающие крупные потенциально урановосные регионы, прогнозно-минерагенические масштаба 1:200 000-1:50 000, проведение которых планируется в пределах рудоперспективных структур в их естественных геологических границах и направленные на выделение и обоснование поисковых площадей, и собственно поиски на локализованных участках с ожидаемым промышленным, в т.ч. скрытым урановым оруденением. Рассматриваемый комплекс исследований имеет два направления, отвечающих основным промышленным типам месторождений – жильно-штокверковому в кристаллических породах и стратиформному в песчаниках. В работах первого направления учитываются геолого-структурные условия рудолокализации в зонах древних структурно-стратиграфических несогласий и в ВТС (стрельцовский тип), второго – в литолого-структурных обстановках палеорусел (витимский тип) и на склонах крупных впадин (учкудукский тип). Основные районы проведения прогнозных и поисковых работ приведены на рис. 2.

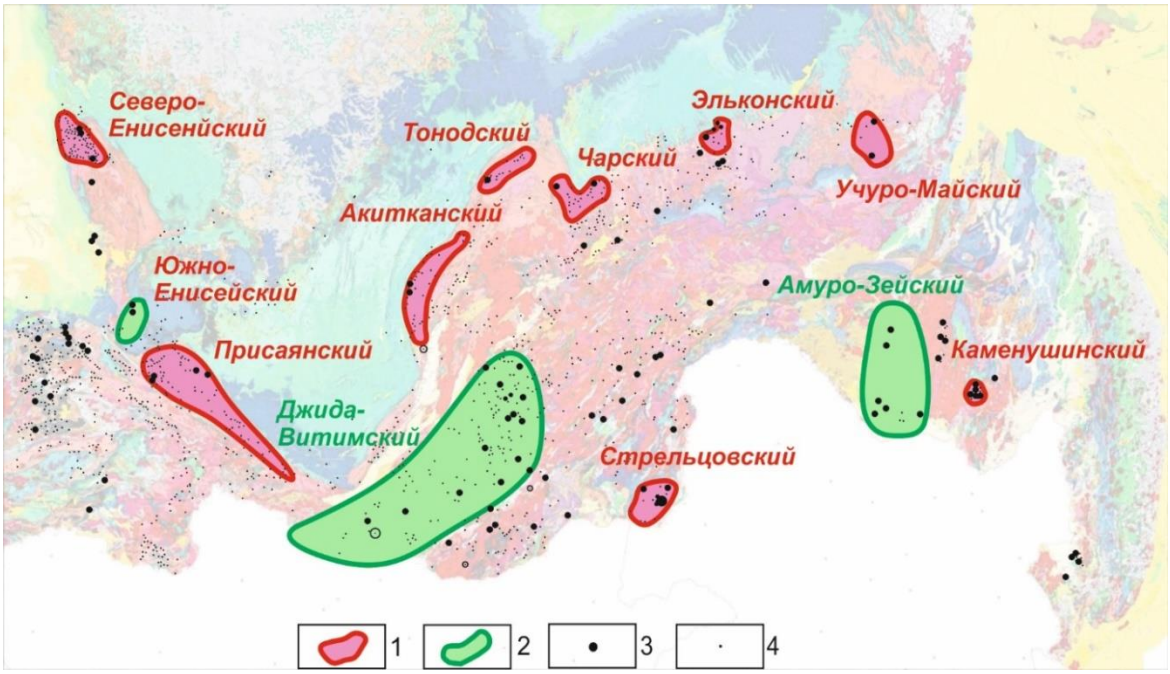


Рис. 2. Схема урановорудных и урановосных районов Сибири и Дальнего Востока, перспективных на выявление уранового оруденения.
1-2 – районы, перспективные на выявление месторождений урана: 1 – жильно-штокверкового типа; 2 – песчаникового типа; 3 – месторождения и рудопроявления урана; 4 – пункты проявления урановой минерализации

Прогнозно-аналитические работы **(ПАР)** на эндогенное урановое оруденение типа «несогласия» последовательно проводятся по крупным районам трансрегиональной ураноносной металлогенической зоны южного обрамления Восточно-Сибирской плиты, представленной допалеозойскими гранитизированными формациями крупнейших структур – Енисейского кряжа, Восточного Саяна, Северного Прибайкалья, Чарского района и Восточного склона Алданского щита – Учуро-Майского прогиба (рис. 3) [3].

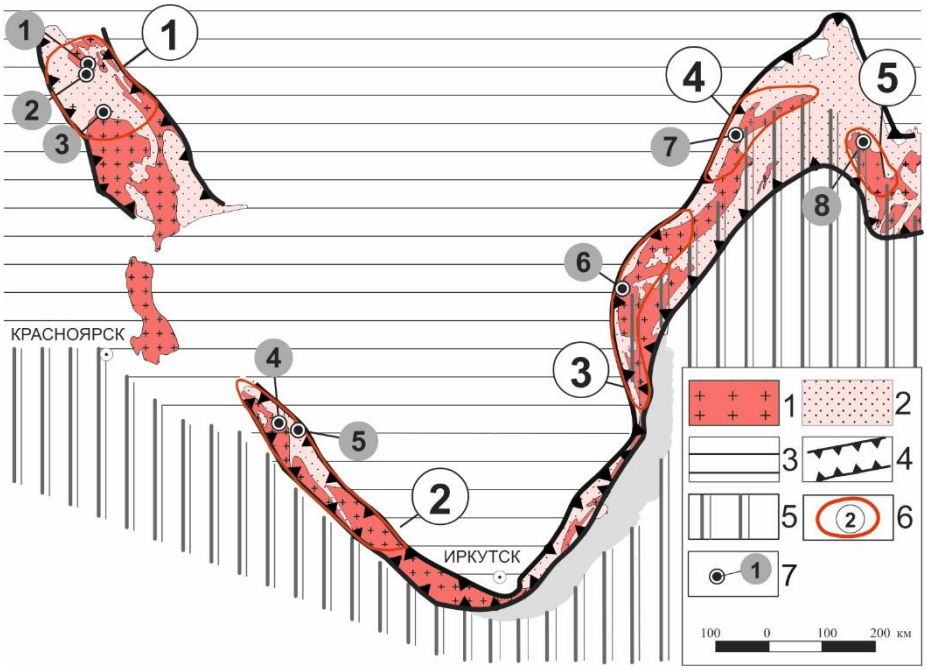


Рис. 3. Геологическая схема и ураноносность южного обрамления Восточно-Сибирской плиты [3].

1 – выступы архей-нижнепротерозойского кристаллического фундамента; 2 – протоплатформенные образования рифея; 3 – отложения чехла Сибирской платформы; 4 – область полихронной рифейской тектоно-магматической активизации; 5 – область проявления палеозойской складчатости; 6 – потенциально урановорудные районы: 1 – Северо-Енисейский, 2 – Восточно-Саянский, 3 – Акитканский, 4 – Тонодский, 5 – Чарский; 7 – выявленные месторождения урана: 1 – Кедровое, 2 – Оленье, 3 – Осиновское, 4 – Столбовое, 5 – Ансах, 8 – Безымянное, 7 – Туюкан, 8 – Чепок

Другие направления прогнозно-аналитических исследований нацелены на выявление эндогенных жильно-штокверковых месторождений в ВТС. Наиболее перспективны ВТС Забайкальского края и Дальнего Востока. Первоочередной интерес представляет Каменушинская ВТС, наложенная в ходе мезозойской ТМА в южной части Буреинского массива на гранитизированные формации. Перспективными также являются недоизученные ранее ВТС в юго-восточном Забайкалье (в области деятельности АО «ППГХО»), особенно на скрытое урановое оруденение.

Прогнозный анализ районов с ожидаемыми гидрогенными урановыми месторождениями планируется провести в Забайкальском крае в терригенных впадинах неоген-четвертичного и позднемезозойского возраста, на многих из которых установлены единичные урановые проявления. В настоящее время начаты исследования по нескольким таким впадинам с ожидаемым неоген-четвертичным оруденением под покровом молодых платобазальтов и в мезозойских грабенообразных структурах. Предусматривается осуществить подготовительные прогнозные работы гидрогенного направления на северо-западном склоне Восточного Саяна в пределах юрской впадины, где ожидается выявление продуктивных зон пластового окисления на ее крыльях. Сходные исследования необходимо провести на северном склоне крупной Амуро-Зейской депрессии и на восточном – в пределах Приханкайской впадины (Хабаровский край).

Прогнозно-минерагенические исследования (ПМИ) масштаба 1:200 000-1:50 000 будут проводиться во всех позитивно оцененных региональными прогнозно-аналитическими работами. ПМИ – ключевой вид ГРР по подготовке поисков. Они направлены на достоверное выделение и обоснование локальных площадей с оценкой ПР категорий P_2 (P_3) и определением геолого-промышленного типа, масштаба и глубины залегания ожидаемого, в т.ч. скрытого, уранового оруденения. ПМИ в соответствии с регламентом будут осуществляться в естественных геологических границах выделенных рудоперспективных структур и сопровождаться комплексом специализированных на уран площадных и профильных геолого-структурных, геохимических, традиционных аэро-, беспилотных и наземных геофизических работ, минералого-геохимических исследований с изучением и оценкой геолого-генетического типа ранее выявленных урановых проявлений. Наиболее перспективные участки, выделенные по результатам анализа полученных данных, будут заверены ограниченным объемом горно-буровых работ и, в конечном счете, оконтурены в качестве площадей локальных поисков.

ПМИ по эндогенному направлению будут проведены в центральной части Каменушинской кальдеры (Хабаровский край) (рис. 4), Учуро-Майском прогибе (Якутия), Северо- и Южно-Енисейском районах, Чарском районе (Иркутская обл.) и Юго-Восточном Забайкалье. По гидрогенному направлению будут изучены Джидинский, Еравнинский, Джида-Витимский и другие районы Забайкалья и Бурятии, Рыбная депрессия (Красноярский край) и др.

В 2022 году в первоочередном порядке прогнозно-минерагеническими исследованиями планируется уточнить геологическое строение Муясынской терригенной впадины с неоген-четвертичными отложениями, перекрытыми платобазальтами, и, главное, определить проявленность ведущих критериев рудоносности, в первую очередь установить развитие ураноносных зон грунтового и пластового окисления; на этой основе будут локализованы площади поисковых

работ. Опережающими прогнозными исследованиями была определена в качестве перспективной Бадинская нижнемеловая впадина, для которой разработан проект поисковых работ.

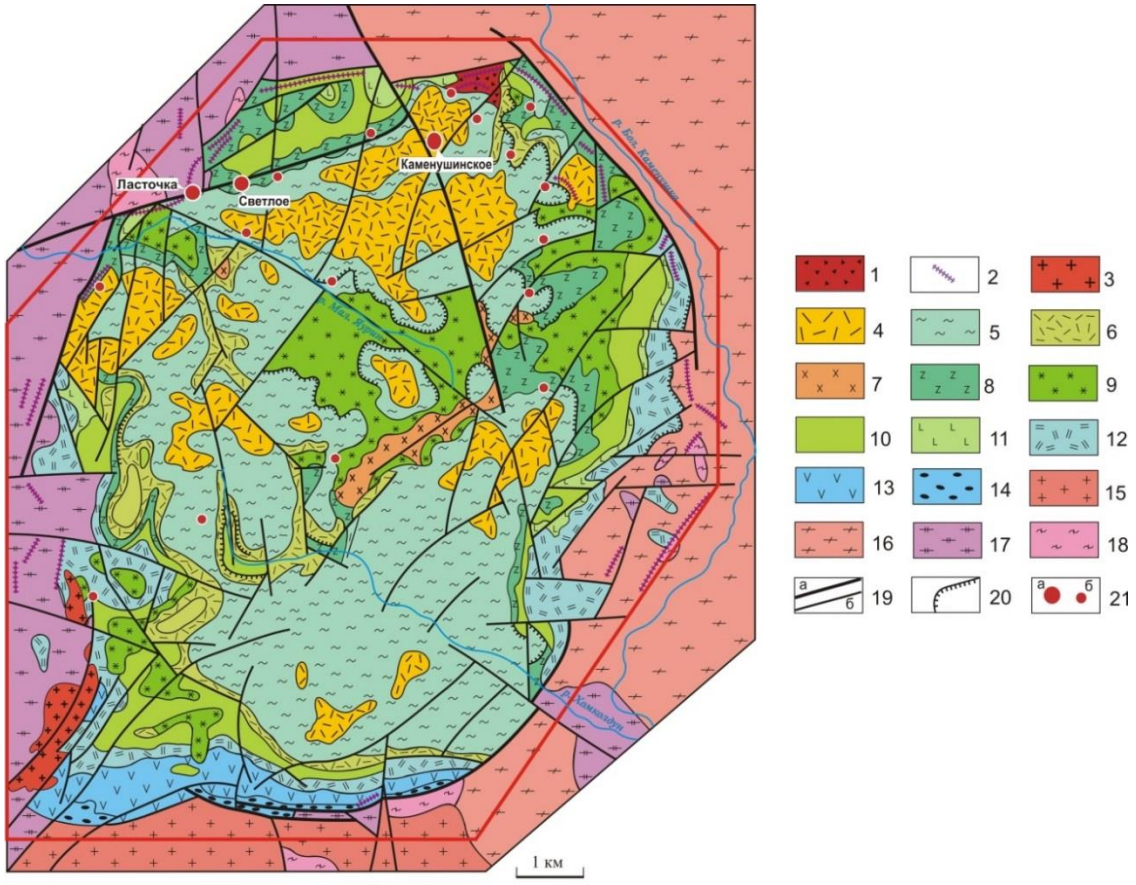


Рис. 4. Геологическая карта Каменушинской ВТС с данными по ураноносности.
1-4 – верхний мел: 1 – эруптивные брекчии, 2 – дайки фельзит-порфиров и гранофиров, 3 – гранит-порфиры, 4 – крупновкрапленниковые риолиты; 5-14 – нижний мел: 5 – фельзиты и фельзит-порфиры, 6 – мелковкрапленниковые риолиты, 7 – трахидациты, граносиенит-порфиры, 8 – дациты, 9 – сферолитовые ленточно-флюидальные риолиты, 10 – песчаники, туфогравелиты, углистые алевролиты, 11 – андезито-базальты, 12 – кварц-полевошпатовые порфиры, 13 – андезиты, 14 – базальные конглобрекчии; 15-18 – верхний палеозой:15 – среднезернистые лейкократовые граниты, 16 – порфировидные гнейсовидные биотит-амфиболовые гранодиориты, 17 – биотит-амфиболовые гнейсы, 18 – амфиболиты; 19 – разрывные нарушения первого (а) и второго (б) порядков; 20 – пологозалегающие разрывные нарушения; 21 – месторождения (а) и рудопроявления (б) урана

Поисковые работы на гидрогенное и гидротермальное (жильно-штокверковое) промышленное оруденение запланированы практически во всех рассмотренных выше районах, перспективы которых будут подтверждены прогнозно-минерагеническими исследованиями с выделением конкретных поисковых площадей.

По гидрогенному направлению планируется опоискование мезозойских впадин Республики Бурятия и Забайкальского края, среди которых первоочередное значение имеет Бадинская структура с ранее

вскрытым Бугутуйским рудопроявлением (рис. 5). Позднее поисковые работы будут последовательно проведены в подготавливаемых других мезозойских впадинах этого обширного региона. Предусматривается также опоискование неоген-четвертичных формаций Бурятии, перекрытых молодыми платобазальтами. Наибольший интерес представляет крупная Муясынская структура, в пределах которой в результате ПМИ будут выделены конкретные поисковые площади. Предусмотрены также поиски гидрогенных урановых объектов в юрских отложениях Рыбинской депрессии на северном склоне Восточно-Саянского поднятия.

Перспективы развития поисковых работ гидрогенного уранового направления в Дальневосточном регионе ограничены краевыми областями крупных мезозойско-кайнозойских депрессий: в пределах северной окраины Амуро-Зейской впадины и западной – Приханкайской. Основной интерес здесь будут представлять ураноносные зоны грунтового окисления на склонах поднятий и в русловых структурах.

Поиски жильно-штокверковых месторождений направлены на оценку ВТС, перспективных на выявление объектов стрельцовского типа, и крупных таксонов древних гранитизированных формаций с ожидаемым масштабным урановым оруденением типа «несогласия». По первому направлению предусматривается опоискование площадей в пределах Каменушинской ВТС, конкретные контуры которых будут определены в результате планируемых прогнозно-минерагенических исследований м-ба 1:200 000 и крупнее. В Забайкальском крае будут проведены глубинные поиски скрытого уранового оруденения в ранее выделенных перспективных мезозойских структурах. Особый практический интерес представляют поиски месторождений несогласия в древних гранитизированных формациях южного обрамления Восточно-Сибирской плиты. В настоящее время поисковые работы этого направления проводятся на Тонодском поднятии (Северное Прибайкалье), где ранее были выявлены мелкое месторождение Туюканское и рудопроявление Натали (рис. 6).

В последующем наибольший прогнозный интерес представляет Учуро-Майский прогиб, расположенный на восточном склоне Алданского щита и сложенный рифейским комплексом терригенных отложений. Его ураноносность определяется локализованными в его пределах недоизученными рудопроявлениями Конкули, Топорикан и др., которые по геологическому строению и условиям размещения сходны с объектами впадины Атабаска (Канада). Перспективы выявления месторождений типа «несогласия» установлены также в ряде площадей Сибирского региона, в том числе на Шутхулайской, Кирейской, Ермосохинской, Амандракской, Чарской, Бульбухтинской площадях. Конкретное размещение поисковых площадей будет также определено ПМИ.

В результате проведения прогнозных и поисковых работ планируется локализовать 4 гидрогенных объекта с прогнозными ресурсами P_1 – 60 тыс. т урана и два жильно-штокверковых с P_1 – 80 тыс. т.

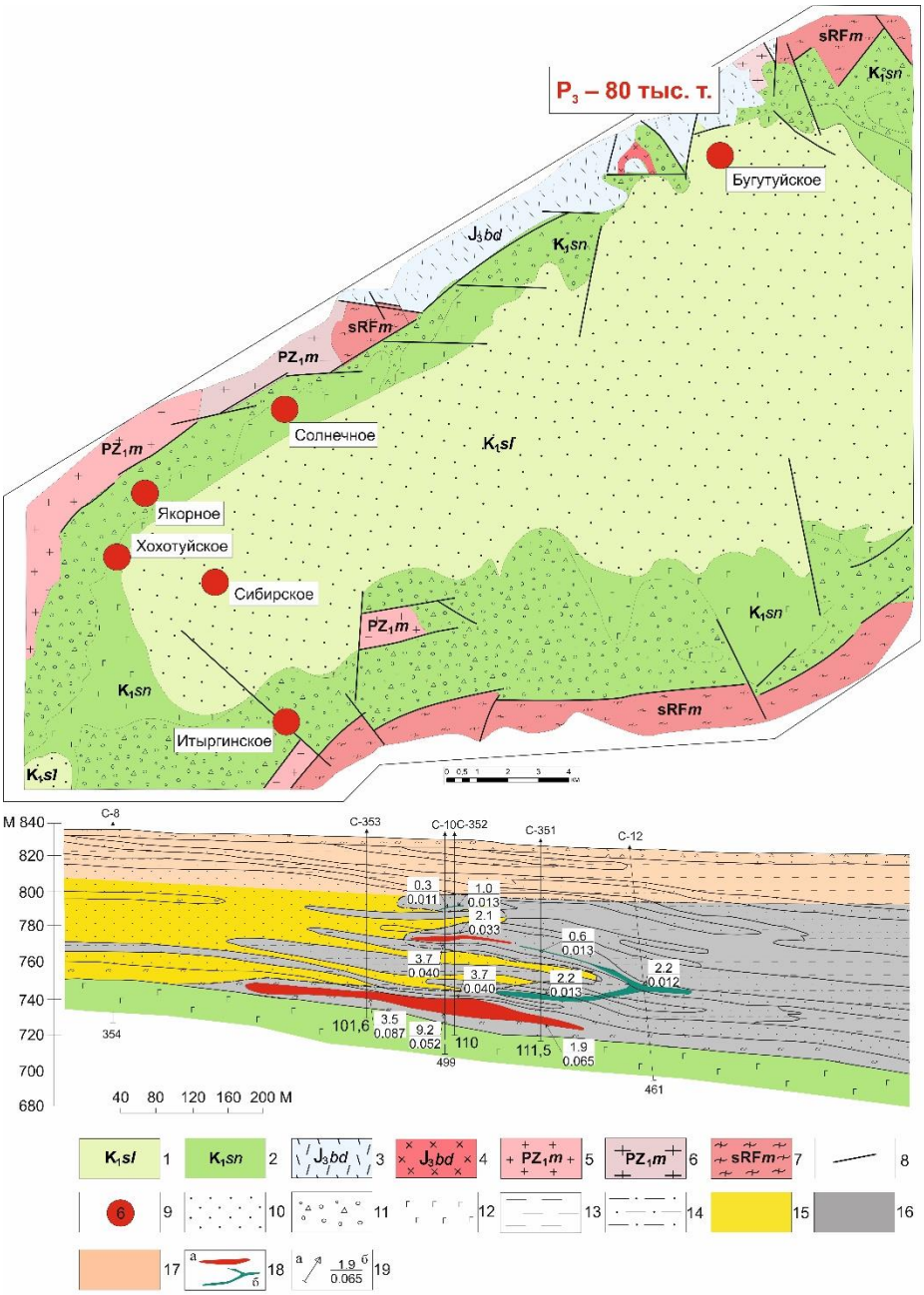


Рис. 5. Геологическая карта центральной части Бадинской впадины с положением рудопроявлений урана (вверху) и разрез через Бугутуйское рудопроявление (внизу). 1-9 – условные обозначения для карты: 1 – алевролиты, аргиллиты, песчаники, угли бурые, гравелиты, конгломераты, 2 – андезито-базальты, трахиандезито-базальты, песчаники, конгломераты, гравелиты, 3 – лавы липаритов, фельзитов, туфы, игнимбриты, вулканические стёкла (перлиты), 4 – граносиенит-порфиры (вулканические стёкла), 5 – граниты мелко-среднезернистые, биотитовые с многочисленными ксенолитами гнейсов, гранито-гнейсов, 6 – разгнейсованные биотитовые и мусковитовые граниты, 7 – кристаллические сланцы, гнейсы, метаморфизованные эффузивы, 8 – разрывные нарушения, 9 – рудопроявления урана; 10-19 – условные обозначения для разреза: 10 – песчаники, 11 конгломераты, конглобрекчии, 12 – андезито-базальты, трахиандезито-базальты (массивные), 13 – алевролиты; 14 – алевролиты с песком; 15 – желтоцветные и пестроцветные осадки, 16 – сероцветные осадки, 17 – палевые осадки, 18 – рудные тела с балансовым (а) и забалансовым (б) содержанием урана, 19 – скважины колонкового бурения (а) и параметры рудных тел (б)

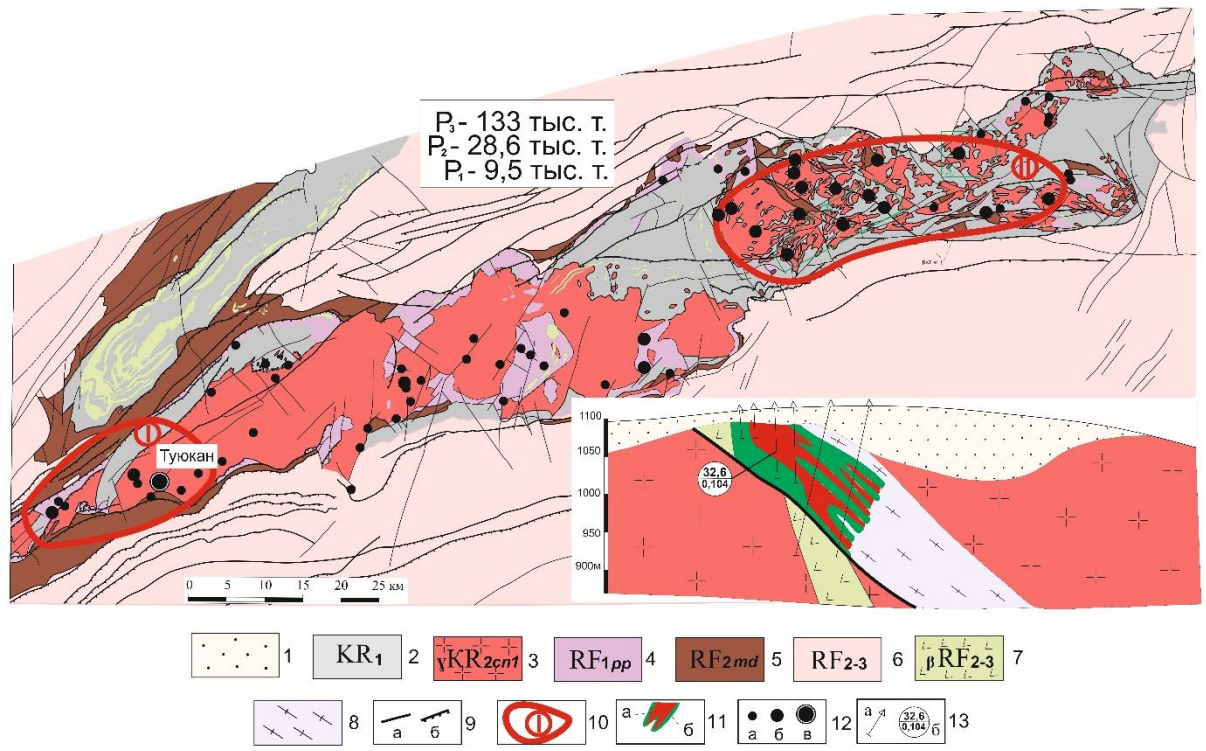


Рис. 6. Схематическая геологическая карта Тонодского поднятия (Северное Прибайкалье) и разрез через месторождение урана Туюкан.

1 – современные отложения и метаморфизованная кора выветривания; 2 – метапесчаники, алевролиты, сланцы, в т.ч. углеродистые; 3 – гранитоиды; 4 – песчаники, сланцы, конгломераты; 5 – конгломераты, метапесчаники, железистые кварциты; 6 – теригенно-осадочные отложения; 7 – породы основного состава; 8 – бластокатаклазиты; 9 – крутопадающие разломы (а) и надвиги (б); 10 – урановорудные узлы: Туюканский (I) и Амандракский (II); 11 – рудные тела с балансовым (а) и забалансовым (б) содержаниями урана; 12 – аномалии и пункты минерализации (а), рудопроявления (б) и месторождение (в); 13 – скважины колонкового бурения (а) и параметры рудных тел (б): в числителе – мощность рудного тела в м, в знаменателе – содержание в %

Научно-исследовательские и тематические работы

Совершенствование технологий и повышения эффективности собственно разведочных и добычных работ планируется проводить предприятиями ПАО «Атомредметзолото», ФГБУ «ВИМС», ИГЕМ РАН и др.

1. Разработка и внедрение информационных технологий на добывающих и проектируемых предприятиях. В рамках этой работы проводится создание геолого-математических моделей всех месторождений урана и разработка уникального, не имеющего аналогов в мире, программного обеспечения по геотехнологическому моделированию и управлению добычей на месторождениях СПВ. Использование новых методов и создание «умных рудников» позволит максимально оптимизировать отработку месторождений в технологическом и экономическом отношении.

2. Совершенствование технологий СПВ будет направлено на поиски решений по отработке трудноизвлекаемых запасов урана в малопроницаемых глинисто-алевритовых и мерзлых породах.

3. Разработка комплексных технологий переработки урановых руд с использованием относительно малозатратных геотехнологических методов кучного и блочного подземного выщелачивания. Проведение этих исследований позволит оптимизировать технологию переработки беднобалансовых и забалансовых урановых руд действующих и проектируемых предприятий.

4. Совершенствование и внедрение новых технологий при горном подземном способе разработки подготавливаемых к освоению месторождений Аргунское и Жерловое (ПАО «ППГХО»). Выполнение этих исследований направлено на снижение потерь и разубоживания в процессе добычи урановых руд, предполагается внедрение пастовой закладки, радиометрического обогащения в подземных выработках, безлюдных проходческих комплексов и др.

5. Разработка и внедрение в производство аппаратурно-методических каротажных комплексов нового поколения для прямых определений урана в недрах методом мгновенных нейтронов деления, в первую очередь на объектах с изменчивым коэффициентом радиоактивного равновесия (КРР) в песчаниках. Использование этих комплексов позволит не только удешевить разведку и получить надежные данные для подсчета запасов, но и лучше контролировать количество запасов при вскрытии месторождений, вести мониторинг отработки недр при СПВ.

6. Разработка и внедрение систем сбора, обобщения и анализа данных о напряженно-деформированном состоянии массивов пород в зоне производства горных работ, получаемых различными методами и техническими средствами на различных уровнях рудного поля, месторождения и очистного блока. Это позволит прогнозировать развитие опасных сейсмогеодинамических процессов для разнообразных пространственных геосистем и временных горизонтов, снизить уровень геодинамического риска при производстве горных работ при разработке месторождений в сложных горно-геологических и удароопасных условиях.

7. Минералого-технологические исследования по месторождениям Зауральского и Витимского районов: изучение положения попутных редкоземельных компонентов в общем ряду рудобразования, минералогический состав, возможность технологического извлечения из руд; разработка и внедрение методики полевого определения рения, скандия, редких земель в условиях высокой минерализации продуктивных растворов.

Роснедра с участием отраслевых НИИ и ВУЗов осуществляет научно-исследовательские и тематические работы, обеспечивающие высокую эффективность поисковых и оценочных работ на уран, которые предусматривается развивать по следующим основным направлениям:

1. Уточнение закономерностей размещения урановорудных и ураноносных районов известных и ожидаемых на территории России промышленных типов эндогенных объектов на основе комплексного анализа новых данных по ураноносности, формационным, геодинамическим, глубинно-геологическим и металлогеническим особенностям ведущих урановых провинций мира.

2. Создание на основе комплексного анализа геологических, геофизических и геохимических данных, объемных моделей участков недр с выделением и обоснованием перспективных на выявление урановых объектов ранга рудных узлов, рудных полей, в том числе не проявленных или слабо проявленных на современной поверхности.

3. Разработка, усовершенствование и апробация новых поисковых методик, методов и аппаратуры, в том числе позволяющих выявлять «слепое» и перекрытое урановое оруденение по геохимическим, петролого-минералогическим, геофизическим, изотопно-, атмо-, биогеохимическим и другим признакам.

4. Разработка поисковых моделей и обоснование рациональных комплексов методов применительно к геологическим и ландшафтно-геоморфологическим обстановкам, а также ожидаемому геолого-промышленному, в том числе скрытому типу оруденения в рудоперспективных районах.

5. Геотехнологические исследования и геолого-экономическая оценка известных малых урановых месторождений с определением возможности их освоения с применением кучного выщелачивания и различных реагентов.

6. Разработка среднесрочных (5-6 лет) программ развития геологоразведочных работ по последовательному изучению и оценке крупных рудоперспективных районов.

7. Определение возможных направлений миграции рудоносных растворов, условий и обстановок концентрирования урановорудного вещества на объектах Стрельцовского рудного поля с помощью геоструктурных, минералого-геохимических, изотопно-геохимических, термобарогеохимических, структурно-петрофизических и геохронологических исследований для повышения эффективности глубинного прогноза, совершенствование на этой основе геолого-генетических жильно-штокверковых урановых месторождений.

8. На месторождениях Хиагдинского и Витимского рудных полей будет продолжаться изучение минерального состава, геохимических особенностей и гидрогеохимических условий локализации оруденения с целью оптимизации процессов подземного выщелачивания и комплексного использования руд, особое внимание будет уделено исследованию процессов изменения минерального состава оруденения в рудообразующей зональности и положению в ней минералов-концентраторов попутных редких элементов.

Заключение

В целях сырьевого обеспечения отечественной урановой промышленности на долгосрочную перспективу необходимо:

1. Расширение МСБ урана действующих горно-добычных предприятий ПАО «Атомредметзолото» как в пределах осваиваемых, так и в сопредельных районах путем проведения поисковых, разведочных и геолого-технологических работ.

2. Выявление и оценка новых урановых минерально-сырьевых центров с высоким качеством руд для создания и долговременной деятельности добычных вновь создаваемых производств на основе широкого развития прогнозных и поисковых работ в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке.

3. Геотехнологическая и геолого-экономическая переоценка резервных урановых объектов с целью их вовлечения в рентабельное освоение.

4. Активное развитие научно-методических исследований, направленных на существенное повышение эффективности поисков и оценки новых, в т.ч. скрытых, урановых месторождений.

Литература

1. Бойцов А.В. Развитие мировой урановой промышленности – вызовы времени / Уран: геология, ресурсы, производство: Материалы доклада пятого международного симпозиума. – М., 2021.

2. Машковцев Г.А. Основные направления развития геологоразведочных работ на уран / Гребенкин Н.А. // Уран: геология, ресурсы, производство: Материалы доклада пятого международного симпозиума. – М., 2021.

3. Машковцев Г.А. Перспективы ураноносности южного обрамления Восточно-Сибирской плиты / Гребенкин Н.А., Мигута А.К., Щеточкин В.Н. // Разведка и охрана недр. – 2015, – № 4. – С. 3-15.

4. Святецкий В.С. Состояние и перспективы развития уранодобывающей отрасли Российской Федерации / Полонянкина С.В. // Уран: геология, ресурсы, производство: Материалы доклада пятого международного симпозиума. – М., 2021.

5. Шутов А.Н. Состояние и перспективы развития добычи урана Госкорпорации «Росатом» за рубежом / Бойцов А.В. // Уран: геология, ресурсы, производство: Материалы доклада пятого международного симпозиума. – М., 2021.

6. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году / Государственный доклад / Федеральное агентство по недропользованию / Роснедра. – М., 2021.

7. Публичный отчет «Итоги деятельности Государственной корпорации по атомной энергии за 2020 год». – М., 2021.

8. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации на 1 января 2021 года. Вып. 33. Уран. – Федеральное агентство по недропользованию / Роснедра. – М., 2021.

9. Сборник «Прогнозные ресурсы твердых и твердых горючих полезных ископаемых Российской Федерации на 1 января 2020 года» Федеральное агентство по недропользованию / Роснедра / ФГБУ «Российский Федеральный геологический фонд (ФГБУ «Росгеолфонд»). – М., 2020.

ТОРИЙ РОССИИ: ГЕОЛОГИЯ, РЕСУРСЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ

Ю.Б. Миронов, А.М. Карпунин, В.З. Фукс
ФГБУ «ВСЕГЕИ», г. Санкт-Петербург

В последние годы в отечественной и зарубежной геологической литературе наблюдается рост интереса к торию и его природным источникам. Причиной этому послужили, с одной стороны, достигнутые к настоящему времени успехи в создании термоядерных реакторов с привлечением тория; по всей видимости, активное внедрение тория в ядерный топливный цикл атомных электростанций в РФ и мире реально можно ожидать уже в ближайшей перспективе. С другой стороны, природная радиоактивность тория и его, как правило, присутствие в рудах месторождений редких земель делает его прямым индикатором при поисках объектов этого остродефицитного сырья [2, 4].

Очевидны преимущества тория как ядерного топлива сравнительно с ураном. Использование тория в качестве ядерного горючего не потребует создания отдельной индустрии по добыче и переработке природного и техногенного сырья, если для переработки будут использованы руды с оптимальным соотношением тория и редких металлов (TR). Это снимет многие экологические проблемы, связанные с процессами добычи на месторождениях радиоактивного сырья [9, 11]. В качестве доводов в пользу тория (в сравнении с ураном) приводятся обычно его следующие преимущества: *экономичность* – тория нужно примерно в два раза меньше, чем урана, для производства того же количества энергии, *безопасность* – ядерные реакторы на ториевом топливе более безопасны, чем на урановом, т.к. ториевые реакторы не обладают запасом реактивности – никакие разрушения аппаратуры реакторов не способны вызвать неконтролируемую цепную реакцию, *удобство* – на базе тория возможно создание реактора, не требующего перезагрузок топлива. Отрицательные стороны ставки на торий – добыча его *дороже,* чем урана, т.к. это рассеянный элемент, и он не образует собственных руд и месторождений, вскрытие основного минерала тория – монацита – процесс гораздо *сложнее,* чем вскрытие большинства урановых руд и, к сожалению, в мировой практике *отсутствует налаженная технология* экономически оправданного его использования в энергетике. Показательны современные спотовые цены на торий – 260 $ за кг (т.е. гораздо выше урана). Если возникнет коммерческий спрос на торий в качестве ядерного топлива, то, конечно, тяжелая горная промышленность незамедлительно откликнется [3, 5].

В силу природных факторов в комплексных рудах торий является постоянным спутником целого ряда металлов, входящих в категорию стратегических или по определению академика РАН Н.С. Бортникова [1] – критических металлов (Critical metals), т.е. группы важных для новейших промышленных технологий материалов.

Атрибутивность тория – его природная радиоактивность – послужили в свое время и служат предметом изучения и накопления специальной информации по месторождениям радиоактивных руд в Международном агентстве по атомной энергии (МАГАТЭ) при ООН (IAEA) [6, 12, 13]. Важное значение имеет формационный анализ известных и прогнозируемых ториевых объектов и их «увязка» с геолого-промышленными типами, учитывающая современные классификации, принятые в зарубежной (МАГАТЭ) и отечественной практике (ВСЕГЕИ) [2].

Существующие многочисленные классификации месторождений тория основаны преимущественно на генетическом принципе, связи месторождений с определенными группами пород и рядом других признаков (структурных, возрастных и т.п.). Часто они не согласуются между собой, более того, одни и те же месторождения могут относиться разными авторами к разным генетическим и геолого-промышленным типам. Большинством авторов по генезису выделяется три больших группы месторождений: эндогенные, экзогенные и метаморфические [2, 3].

Представление о подходе зарубежных коллег к типизации ториевых объектов даёт действующая классификация МАГАТЭ, синтезирующая опыт более 100 стран ООН в этом вопросе [7, 8]. Данной классификацией успешно пользуются специалисты КНР, Франции, а также других стран [10]. В основу классификации положена связь рудной минерализации с определенными типами вмещающих пород и морфология рудных тел.

В целом за рубежом по распространенности месторождений тория разных геолого-промышленных типов выстраивается следующий ряд: карбонатитовые (31,26%), россыпные (24,68%), жильные (21,39%), щелочные (18,43%), прочие (4,24%) [6].

В России ведущее положение на сегодня занимают карбонатиты и щелочные породы. Цельную картину об отечественных объектах тория можно получить в таблице классификации месторождений тория территории РФ. Она использована авторами при районировании территории России на торий [2].

Таблица

Классификация месторождений тория

№ формации	Рудная формация	Торийсодержащие объекты (месторождения, рудопроявления)
1	2	3
1	Торий-редкометалльная в агпаитовых сиенитах и зонах метасоматоза	Вовнбед, Ловозерское
2	Редкометалльно-ториевая в щелочных метасоматитах и флюорит-баритовых жилах	Рудопроявления в Сев. Прибайкалье
3	Торий-цирконий-фосфорная в эйситах и карбонат-апатитовых жилах	Рудопроявления в Алтае-Саянской и Байкальской минерагенических провинциях

Продолжение табл.

1	2	3
4	Торий-урановая в щелочных метасоматитах и кварц-флюорит-баритовых жилах	Торгойское
5	Редкоземельно-ториевая урановосная в альбититах и эгирин-амфиболовых метасоматитах	Вишневогорское, Сибирка, Улуг-Танзек, Арысканское, Катугинское, Бугундья
6	Ториевая редкоземельно-редкометалльная с ураном в поликомпонентных метасоматитах	Рудопроявления в Северной Карелии и на Алданском щите
7	Торий-редкометалльно-урановая в калиевых метасоматитах, щелочных и лейкократовых гранитах, пегматитах	Ермаковское, рудопроявления на Алданском щите
8	Редкоземельно-редкометалльно-фосфорно-ториевая в карбонатитах	Ковдор, Африканда, Мало-Растайское, Кийское, Селигдар, Ингилийское
9	Золото-редкоземельно-ториевая и урановая в метаморфизованных протерозойских конгломератах, гравелитах, песчаниках и кварцитах	Рудопроявления на Алдане, Урале, Енисейском кряже
10	Редкоземельно-ториевая в корах выветривания карбонатитов и специализированных на торий пород	Кийское, Томтор, рудопроявления на Кольском и в других регионах
11	Торий-редкоземельно-цирконий-титановая погребенных прибрежно-морских и дельтовых россыпей	Туганское
12	Редкоземельно-редкометалльно-ториевая континентальных современных россыпей	Рудопроявления в обрамлении массивов разрушавшихся торий содержащих пород
13	Ториеносная в лигнитах и углях	Рудопроявления в чехлах платформ
14	Ториеносная в фосфатах	Рудопроявления в чехлах платформ
15	Неясной формационной принадлежности	Салдинское

Примечание: 1-8 – эндогенные (1-4 – щелочного магматизма, 5-7 – кислого магматизма, 8 – карбонатиты); 9 – полигенные (метаморфогенные); 10-14 – экзогенные (10 – остаточные, в корах выветривания, 11-14 – осадочные, (россыпи: 11 – погребенные, 12 – современные), 13 – углеродисто-осадочные, 14 – фосфорно-осадочные; 15 – неясной формационной принадлежности

По генезису все объекты разделены на эндогенные и полигенные, различаясь по составу магматизма – кислому, щелочному или щелочно-ультраосновному (карбонатиты).

В группу экзогенных объектов входят остаточные (кор выветривания ториеносных пород) и осадочные (россыпи современные и погребенные, ториеносные лигниты, угли и фосфаты).

Авторы сочли необходимым не упускать из вида и такой серьезный по запасам тип реального резерва тория, как техногенный (отвалы торие носных пород отрабатываемых и отработанных комплексных месторождений редких металлов и редких земель), а также складские запасы торие носных (монацитовых) песков.

Предлагаемая классификация ториевых объектов отображает современное положение дел и в перспективе может совершенствоваться. На основе предложенной классификации ториевых объектов проведено металлогеническое районирование (Th) территории РФ [2]. При этом касаясь торие носных комплексных редкоземельных и редкометальных месторождений были учтены главные принципы формационного анализа школы ВСЕГЕИ, реализованные при составлении «Прогнозно-минерагенической карты Российской Федерации и ее континентального шельфа» масштаба 1:2 500 000 (2015).

Геологические особенности торийсодержащих объектов определяются тектоническими обстановками формирования их субстрата, куда входят щиты древних платформ, чехлы платформ (древних и молодых), складчато-надвиговые области (коллизионные, аккреционно-коллизионные и аккреционно-коллизионно-активноокраинные) [2].

Месторождения тория на щитах древних платформ представлены объектами, локализованными в Ковдоро-Ловозерской минерагенической зоне Фенноскандинавского щита. Зона охватывает области развития ранне-среднепалеозойского щелочного магматизма. Зарубежные специалисты считают Ловозерское месторождение мировым эталоном данного геолого-промышленного типа.

В пределах зоны широко распространены щелочно-ультраосновные массивы, с которыми связаны торий-урансодержащие апатит-железо-титановые, апатит-редкоземельно-железорудные, флогопит-вермикулитовые месторождения, локализованные в щелочных метасоматитах и карбонатитах массивов Вуориярви, Ковдор, Африканда и др., а также интрузии нефелиновых сиенитов, с которыми ассоциированы крупные месторождения апатит-нефелиновых руд с торием, ураном, редкими металлами и редкими землями (Ловозеро и др.).

Богатые ниобиевые руды месторождения Вуориярви, расположенного в пределах Кольского полуострова, приурочены к телам апатит-кальцит-магнетитовых руд. На схеме указаны средние содержания основных компонентов. Богатые пирохлоровые руды слагают внешнюю часть рудного тела. Краевые части – это рядовые гатчеттолитовые руды, представленные магнетитовыми, карбонатитовыми и силикатными разновидностями. Суммарные запасы богатых руд (C_1+C_2) составляют 16 млн т со средним содержанием Nb_2O_5 – 0,5%, Ta_2O_5 – 0,2%, Th – 0,046%.

Месторождения тория в чехле платформ представлены Туганским месторождением, расположенным в пределах Западно-Сибирской минерагенической провинции. Продуктивными являются ильменит-

циркониевые олигоценовые пески юга Западносибирской плиты. Повышенной радиоактивностью обладают горизонты песков с максимальной концентрацией циркона и монацита. Месторождение включает 5 россыпей. Мощность рудных пластов от 1,4 до 7-14 м (иногда 27 м). В рудных частях россыпей присутствует монацит с аномально высокими содержаниями (в %): Ce – 20,8, La – 4,07, Sm – 0,65, Hf – 0,3, Th – 3,8, U – 0,15. Запасы рудных песков составляют около 124,7 млн кубометров. За рубежом лидерами данного типа выступают Индия, Бразилия, Австралия.

В связи со щелочными гранитами, специализированными на TR, Ta, Nb, Li, Be, Th и U, комплексные месторождения с торием известны в Алдано-Становой минерагенической провинции (Катугинское и др.). За рубежом данный тип представлен месторождением Илимауссак в Гренландии, рудным районом развития щелочных пород на Мадагаскаре – Амбатофинандрахана и др. Примечательно, что в последнем случае **рудные тела обнаруживаются по комплексным радиометрическим аномалиям** (свыше 90 мкР/час на фоне 30 мкР/час).

Месторождение Катугинское расположено в Забайкальского крае. Оно локализовано в массиве щелочных гранитов катугинского комплекса. Рудная залежь, приуроченная к нижней части массива, сложенной амфибол-эгириновыми гранитами. В пределах залежи выявлены три плащеобразных рудных тела с Ta-Nb и редкоземельной с торием минерализацией. Протяженность рудной залежи до 2 км по простиранию и до 1,2 км по падению, мощностью до 500 м.

По минеральному составу выделены редкометалльные, иттриевые и криолитовые руды. *Главные рудные минералы* представлены пирохлором, цирконом, гагаринитом, редкоземельным флюоритом, криолитом. В контуре месторождения в склоновых рыхлых отложениях выявлены промышленные скопления циркона (11,42–12,6 кг/м^3) и пирохлора (5,03–6,11 кг/м^3). Прогнозируемая россыпь перспективна в качестве дополнительного источника циркониевых и торий-редкоземельно-тантал-ниобиевых руд.

В южной части Алтае-Саянской минерагенической провинции в позднем палеозое и раннем мезозое сформировались коллизионные и постколлизионные гранитоиды лейкогранитовой и щелочногранитовой формаций. С ними связаны месторождения W, Be, Ta, Nb, TR, Th. Примером служит крупное Улуг-Танзекское месторождение, входящее в состав Сангиленской металлогенической зоны.

Месторождение *Улуг-Танзек* приурочено к интрузивному телу щелочных гранитов, переработанному метасоматическими процессами. По своим масштабам оно является самым крупным в России. Месторождение характеризуется крупными запасами Nb и Ta, значительным распространением оруденения на глубину, а также возможностью извлечения других компонентов – Zr, Hf, Li, TR, U, Th.

Торит на месторождении является основным минералом-концентратором тория, частично урана и редких земель. Основная масса торита до 70% связана с полислюдистыми метасоматитами и рибекитовыми рудами. Около 20% тория находится в цирконе. В пирохлоре концентрируется около 5%, в колумбите 2-10%. Основные минералы–концентраторы редких земель: гагаринит, циркон, колумбит, пирохлор и торит. Извлечение редких земель из них возможно в процессе переработки колумбит-цирконовых концентратов.

За рубежом основными рудами на торий наряду с карбонатитами являются монацитовые пески. Они залегают на пляжах морей Индии, Бразилии, Австралии, Вьетнама. В РФ скопления таких песков наблюдаются в устьях рек на Кольском побережье Белого моря, а также на побережье Азовского моря (по линии Таганрог (Россия) – Мариуполь-Бердянск (Украина).

Запасы тория в России оцениваются в 75 000 т (МАГАТЭ, 2019), прогнозные ресурсы весьма оптимистичны [7]. Наиболее перспективными на выявление промышленных месторождений тория являются ториеворудные формации, связанные с щелочными комплексами пород в региональных тектонических структурах различного ранга. Наиболее перспективным природным источником тория являются лопаритоносные агпаитовые нефелиновые сиениты Ловозерского месторождения. Отработка мономинеральных монацитовых россыпей рентабельна при содержании монацита порядка 1,5 кг/м^3. В монацит-циркон-ильменитовых погребенных прибрежно-морских россыпях извлечение монацита может быть рентабельным при содержании в песках 180–200 г/м^3. Количество входящих в эту группу россыпей на территории РФ обнадеживает [7].

Возможную в перспективе оперативную востребованность тория в РФ на первых порах в состоянии обеспечить его складские запасы. На складах предприятия ГУ «Урал монацит» г. Красноуфимск (Свердловская область) хранится 82653 т монацитового концентрата. Монацитовый песок собирался на месторождениях России, Монголии, Китая и Вьетнама. Завод по переработке монацита призван решить все проблемы получения тория необходимой кондиции.

Накопленные во ВСЕГЕИ опыт и информация в области радиоактивного сырья, включая торий, открывают возможности для проведения актуализации листов Госгеолкарты с отображением до настоящего времени отсутствующего на них тория.

Обладая природной радиоактивностью, торий при нахождении в комплексных редкоземельных и редкометалльных рудах может использоваться в качестве прямого поискового критерия на дефицитные металлы, столь необходимые стране [1]. Рекомендуется при проведении государственного геологического картирования различного масштаба использовать апробированный комплекс радиометрических методов и ввести торий в отдельный перечень учитываемых полезных ископаемых.

Литература

1. Месторождения стратегических и высокотехнологичных металлов Российской Федерации: закономерности размещения, условия формирования, инновационные технологии прогноза и освоения: Научные результаты, полученные при выполнении программы № 1.48 фундаментальных исследований Президиума РАН / Гл. ред. – академик РАН Н.С. Бортников. Ответственный составитель чл.-корр. РАН В.А. Петров. – М.: ИГЕМ РАН, 2020. 317 с.

2. Миронов Ю.Б., Карпунин А.М., Фукс В.З. Металлогения тория Российской Федерации. Региональная геология и металлогения. № 84, 2020, с. 106–116.

3. Миронов Ю.Б., Карпунин А.М., Фукс В.З. Зарубежные месторождения тория. Региональная геология и металлогения. № 86, 2021, с. 107–115.

4. Михайлов В.А. Редкоземельные руды мира. Геология, ресурсы, экономика: Киев. Издательско-полиграфический центр «Киевский университет», 2010. – 223 с.

5. Пелымский Г.А., Котова В.М., Чехович П.А., Капитонов И.М. Торий – перспективный сырьевой ресурс атомной энергетики / «Рациональное освоение недр», М., 2012, № 1. С. 30–45.

6. A Review of the Geochemical Processes Controlling the Distribution of Thorium in the Earths Crust and Australias Thorium Resources/ Terrence P. Mernagh1 and Yanis Miezitis1. –Geoscience Australia Record, №3, 2008. 49 p.

7. Cuney M. Uranium and thorium resources and the sustainability of nuclear energy/ Mineralogical Association of Canada Short Course 43, Winnipeg MB, May 2013, p. 417–437.

8. Cuney M. The extriem diversity of the resource Worlds energy mineral. Non-reaewable. № 6. 2011. p. 39-46.

9. Nuclear Energy Agency of the Organisation for Economic Co-operation and Development (NEA) and the International Atomic Energy Agency (IAEA) (2012) Uranium 2011: Resources, Production and Demand. OECD Report ISBN 978-92-64-17803-8, 487 p.

10. Geological Classification of Uranium Deposits and Description of Selected Examples. IAEA, Vienna, 2018, 414 p.

11. International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environmental Issues. URAM 2018. 25-29 June 2018. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2018. 541 p.

12. Thorium resources as co- and by-products of rare earth deposits, IAEA, Vienna, 2019, 68 p.

13. World Thorium occurences, Deposits and Resources. IAEA – Tecdoc – 1877, Vienna, 2019. 340 p.

УРАНОВЫЕ ПРОВИНЦИИ МИРА

Ю.Б. Миронов, А.М. Карпунин, В.З. Фукс
ФГБУ «ВСЕГЕИ», г. Санкт-Петербург

В представленном обобщении охватывается всё разнообразие выявленных к настоящему времени урановых и комплексных с ураном месторождений и практически все значимые рудные территории в ранге провинций и крупных районов (более ста). При систематизации урановых объектов и территорий при характеристике месторождений главное значение отведено рудовмещающей среде, геодинамическим обстановкам формирования оруденения, а для территорий – приуроченности к типоморфным структурам земной коры – аркогенным, тафрогенным, орогенным, эпейрогенным и их производным вследствие разновозрастной активизации. В основе типизации лежит вещественно-генетический принцип, позволяющий корректно проводить межрегиональные и межконтинентальные сопоставления между урановорудными провинциями (УРП) и районами (УРР). Это дает возможность уточнять известные и выявлять новые закономерности и прогнозные критерии, а также делать заключения о полихронности формирования большинства УРП и их этажности с вариациями таких ведущих рудных скоплений.

Аспекты ядерной энергетики. В 2021 году многие европейские страны настиг энергетический кризис. К разочарованию разных политических стратегов этих стран, не оправдала себя ставка исключительно на «зеленую» возобновляемую энергетику, в первую очередь энергию ветра. Гораздо раньше, опираясь на позицию ведущих специалистов и руководителей российской урановой отрасли, приводились обоснованные прогнозы, что мировые энергетические проблемы без использования ядерной энергетики практически неразрешимы [4]. Подобное мнение однозначно высказал и президент РФ на прошедшем в Москве международном энергетическом конгрессе. Жизнь подтвердила, что максимальное обеспечение ядерным топливом действующих и строительство новых атомных электростанций – гарантия устойчивого развития ядерной энергетики в мировом масштабе [4].

В современном комплексе источников электрической энергии, в том числе минерального сырья (газ, нефть, уголь, горючие сланцы и др.) уран, на основе которого генерируется атомная энергия (АЭ), играет всё более возрастающую роль. В России на АЭС приходится около 20% производимой электроэнергии при максимумах во Франции (87%), Японии (около 50%) и США (25%). Предполагается дальнейшее развитие АЭ с ростом к 2025 году до 25% в общем объёме мирового производства электроэнергии. Эта тенденция, несомненно, предусматривает расширение минерально-сырьевой базы (МСБ) урана стран – пользователей АЭ или увеличение доли ее экспорта. Для России, естественно, предпочтительным

является расширение отечественной МСБ урана, что и определяет стратегию развития атомной промышленности страны и специальной металлогении на ближнюю и дальнюю перспективы [4].

Природные скопления урана. Известно, что сырьевые ресурсы урана распределяются на территориях стран и континентов весьма неравномерно. В пределах континентальных блоков земной коры на фоне общего распределения урановых месторождений выделяются обширные территории их группового размещения, обычно именуемые урановорудными или урановыми провинциями (УРП) и/или районами (УРР). К настоящему времени в результате многолетних исследований в отечественной специальной металлогении сформировались достаточно определенные общие представления об урановых провинциях и иерархии входящих в их состав рудоносных территорий и месторождений. Согласно этим представлениям, наиболее ясно отраженным в работах Н.П. Лаверова и его коллег (1978–1986 гг.) [5, 6], УРП являются базовыми элементами мелкомасштабного – регионального металлогенического районирования. Они приурочены к типоморфным геотектоническим структурам древних и молодых платформ, разновозрастных геосинклинально-складчатых систем и областей их активизации. От сопредельных «нерудных» территорий их отличают особенности геологического развития, отчетливо проявленной геохимической урановой и комплексной специализацией, проявлением полихронных процессов концентрации урана и формирования его месторождений, относящихся к различным геолого-генетическим типам. Площади провинций варьируют от 50 до 500 и более тыс. км^2. Отечественными и зарубежными исследователями в области металлогении эмпирически установлено, что в ходе направленного и необратимого развития Земли по мере эволюции процессов осадконакопления, магматизма и тектоногенеза происходила эволюция рудообразования в целом и уранового рудообразования в частности с последовательной сменой типов рудоносных структур и связанных с ними урановых месторождений, а также, возможно, и источников рудного вещества. В последнем случае допускается вариант, что в геометрическом объеме определившейся УРП геохронологически более поздние рудные концентрации вышли из «депо» предыдущих скоплений рудных масс [21] или, иначе говоря, благодаря «рудной эстафете» [1].

Следует напомнить, что некоторые элементы эволюционно-геодинамического подхода, развиваемого авторами, были заложены ранее в целой серии коллективных публикаций ведущих НИИ СССР и России, среди которых ИГЕМ, ВСЕГЕИ, ВИМС, ВНИИХТ, ВИРГ, МГРИ. В числе таких публикаций, в частности: «Геология урановых месторождений капиталистических стран» (1956), «Месторождения урана зарубежных стран» (1959), «Урановые провинции» (1960), «Уран в древних конгломератах» (1963), «Геология гидротермальных урановых месторождений» (1966), «Металлоносные конгломераты мира» (1974),

«Топливно-энергетический потенциал Земли» (1976), «Эволюция уранового рудообразования» (1978), «Металлогения урана континентальных блоков земной коры» (1980), «Гидрогенные месторождения урана» (1980), «Зарубежные месторождения урана» (1983), «Основы прогноза урановорудных провинций и районов» (1986), «Урановые месторождения древних щитов» (1990), «Гидрогенное рудообразование» (2000), «Урановые месторождения в вулкано-тектонических структурах» (2005). Кроме того, большую роль в трудоёмком деле сбора и анализа фактического материала сыграли крупнейшие современные сводки по урановым месторождениям мира: 1) под редакцией Ф.И. Далькампа по странам Азии (включая Россию, Китай, Монголию, Японию, Вьетнам), Северной и Южной Америке [24, 25, 26, 27]; 2) под редакцией Г.А. Машковцева по территории России «Уран российских недр», 2010; 3) под редакцией Г.А. Машковцева «Крупнейшие урановые месторождения мира» [Тарханов, Бугриева, 2012]; 4) под редакцией О.В. Петрова и Дун Шувена «Региональная металлогении Центральной Азии» [Шатков, Петров, Пинский и др., 2012]; 5) под редакцией Г.А. Машковцева «Уран: геология, добыча, экономика» [Живов, Бойцов, Шумилин, 2012].

Вопросы типизации УРП рассматривались во многих публикациях сотрудников упомянутых выше организаций, а также отечественных и зарубежных специалистов сферы деятельности МАГАТЭ [2, 3, 5-8, 10-20, 23]. В одной из последних работ, доступной авторам сводки [28], типизация УРП представлена на географической основе – по континентам мира (рис.).

Основы анализа УРП. Авторы, исходя из своих предыдущих подходов к типизации УРП [1], представили её, опираясь на историко-геологический анализ, позволивший провести систематизацию данных по геологии, геохимии, геофизике и металлогении урана различных стран и континентов и разработать единый подход к рудным объектам. В анализ вовлечена большая часть известных урановых и комплексных месторождений и многочисленные (около 100) рудные территории ранга провинций и районов на пяти континентах.

Для историко-геологического анализа урановых территорий (около 100 ранга провинций и районов на пяти континентах) использованы результаты оригинальных палеотектонических и палинспастических реконструкций [1]. Представляется, что ведущую роль в металлогении урана, начиная с раннего докембрия, играли геоструктуры аркогенного (купольного) и тафрогенного (рифтового) происхождения. Выделено две разновозрастные глобальные генерации гигантских рудоносных купольных структур: архейская генерация куполов-нуклеаров с возрастом 3,2–2,5 Ма и палеопротерозойская 2,5–1,6 Ма генерация гранито-гнейсовых куполов. Выделенные генерации купольных структур различаются особенностями внутреннего строения и металлогении, которые обусловлены, главным образом, строением и эволюцией гранитизированного субстрата. Металлогеническое на уран районирование

континентов позволило выделить трансконтинентальные окраинно- и внутриконтинентальные рудоносные мегапояса и гигантские рудные узлы в местах телескопирования мегапоясов.

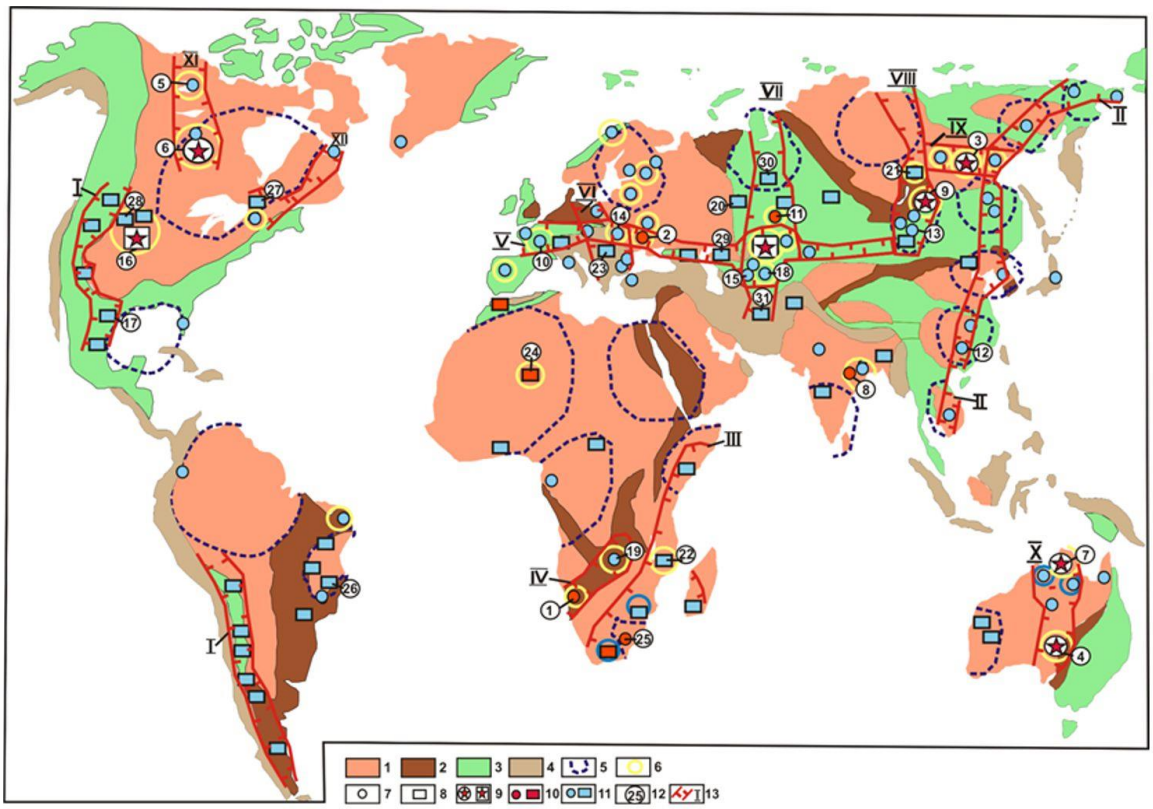


Рис. Карта размещения урановорудных территорий в структурах континентов.
1–6 *структуры континентальной земной коры (геотектоническая основа)*: 1 – древние платформы, включая щиты; 2 – рифейские складчатые пояса, 3 – фанерозойские складчатые пояса и молодые платформы, 4– кайнозойские мобильные (орогенные) пояса; 5–6 – реконструированные купольные структуры: 5 – нуклеарные, 6 – предрифейские; 7–8 *группировки урановорудных территорий (провинций, районов)*: 7–8 – *надгруппы по степени литификации вмещающих комплексов пород,* генетическим *классам* и ведущим геолого-промышленным *типам* месторождений: 7 – *первая надгруппа* – в литифицированных комплексах пород (эндогенные и полигенные месторождения), 8 – *вторая надгруппа* – в слабо- и нелитифицированных комплексах пород (экзогенные месторождения); 9–11 – *категории по масштабам ресурсов урана*: 9 – более 300 тыс. т, 10 – 300–100 тыс. т, 11 – менее 100 тыс. т; 12 – *список урановорудных провинций – прототипов (арабские номера в кружках).* ***Первая надгруппа:*** 1–3 *тип щелочных метасоматитов*: 1 – Дамара (Россинг), 2 – Центрально-Украинская, 3 – Центрально-Алданская; 4–5 *тип гематитовых брекчий*: 4 – Олимпик-Дам, 5 – Медвежьего озера (предположительно); 6–8 *тип несогласия*: 6 – Атабаска, 7 – Арнемленд, 8 – Куддапах; 9 – *вулканитовый тип:* Приаргунская; 10–11– *гранитовый тип*: 10 – Центрально-Французская, 11 – Северо-Казахстанская; 12–13 – *лейкогранитовый тип:* 12 – Южно-Китайская (Нанлин); 13 – Хэнтей-Даурская; 14–15 – *черносланцевый тип*: 14 – Чешская (Тюрингия), 15 – Центрально-Кызылкумская. ***Вторая надгруппа*:** 16–22 – *песчаниковый тип*: 16 – Колорадо-Вайоминг, 17 – Южно-Техасская, 18 – Притяньшаньская, 19 – Катанга, 20 – Зауральская, 21 – Витим-Амалатская, 22 – Ньяса; 23–24 – *метапесчаниковый тип:* 23 – Банатитовая (Бихор), 24 – Мали-Нигерская (Арли-Акаута); 25–27 – *конгломератовый* тип: 25 – Витватерсранд, 26 – Жакобина, 27 – Блайнд-Ривер; 28–29 – *фосфоритовый тип*:

28 – Фосфория, 29 – Прикаспийская; 30–31 – предполагаемые песчаникового типа: 30 – Баженовская, 31 – Лут-Белуджистанская. **13 – *элементы металлогенического районирования (римские номера)***: I–II *глобальные и трансрегиональные металлогенические пояса*: *окраинно-континентальные* I – Восточно-Тихоокеанский с Кордильерским и Андийским фрагментами, II – Западно-Тихоокеанский), III – XII *внутриконтинентальные:* III – Восточно-Африканский, IV – Дамара-Катангский, V – Карпинского, VI – Балтийско-Карпатский, VII – Западносибирско-Среднеазиатский, VIII – Восточно-Сибирско-Гобийский, IX – Чарско-Алданский, X – Центрально-Австралийский, XI – Бер-Волластон, XII – Гренвиллский

Всего на континентах выделяется 12 мегапоясов, в том числе окраинноконтинентальные: I – Восточно-Тихоокеанский с Кордильерским и Андийским фрагментами, II – Западно-Тихоокеанский; и внутриконтинентальные: III – Восточно-Африканский, IV – Дамара-Катангский, V – Карпинского, VI – Балтийско-Карпатский, VII – Западносибирско-Среднеазиатский, VIII – Восточно-Сибирско-Гобийский, IX – Чарско-Алданский, X – Центрально-Австралийский, XI – Бер-Волластон, XII – Гренвильский. В узлах телескопирования мегапоясов (Средне-Европейский, Средне-Азиатский, Монголо-Забайкальский) ресурсы урана достигают 500–1500 тыс. т, но подобные масштабы иногда характерны и для ряда провинций внутри мегапоясов (Атабаска, Колорадо-Вайоминг, Арнемленд, Олимпик Дам).

Элементами высокого порядка в типизации урановых территорий являются две крупные группы, выделяемые по степени литификации ураноносных комплексов пород, соответствующих главным геоструктурным и генетическим классам урановых месторождений.

Первая группа – это рудные провинции и районы с месторождениями в литифицированных комплексах горных пород основания древних и молодых платформ, срединных массивов, складчатых областей, древних эпикратонных впадин и в ареалах континентального вулканизма и гранитоидного магматизма (эндогенный и полигенный классы месторождений). Среди них выделяются рудные провинции в типоморфных протоструктурах нуклеаров и структурах разновозрастной активизации.

Промышленные концентрации урана в нуклеарах появляются на конечном орогенном этапе их формирования и часто являются кластогенными образованиями, сформированными за счет накопления в россыпях акцессорных урансодержащих минералов из позднеархейских калиевых гранитов и пегматитов. Такие метаморфизованные россыпи в кварцево-галечных конгломератах характерны для протоорогенных впадин, располагающихся пунктирно по периферии нуклеаров преимущественно антиформного (необращенного) типа – мегапровинции Сьюпериор, Восточно-Бразильская, Южной Африки и другие. С некоторыми эпохами разновозрастной активизации нуклеаров связан целый ряд провинций и районов с месторождениями разных типов: карбонатитового (U-TR) в щелочных кольцевых трубках разного возраста

(Илимауссак, Палабора, Хибины и др.); черносланцевого типа в наложенных краевых прогибах (Южно-Китайская, Карпатская и другие провинции); лейкогранитового типа в зонах разрывов среди мезозойских высокорадиоактивных пород в ассоциации с редкометальным оруденением (Ганьханский, Керулен-Аргунский рудные пояса).

Урановое оруденение сопровождает все этапы формирования и трансформации купольных структур генерации этапов воздымания. Типоморфные структуры куполов этой генерации были заложены на этапе компенсационной деструкции, проседания и обрушения кровли. С подобными структурами связаны провинции в приразломных метасоматитах (аляскитовый) (Россинг), альбититовый (Кировоградский) и слюдитовый (Падма) типы.

Рудные провинции в протоструктурах рифейских гранито-гнейсовых куполов вблизи зон структурно-стратиграфических несогласий в основании эпикратонных впадин относятся к полигенным (канадский и австралийский подтипы). В рифее – фанерозое в ряде провинций (Франсвиль, Чешская, Катанга) происходила эпигенетическая регенерация рудных залежей вблизи поверхности несогласий с изменением их морфологии и масштабов оруденения.

Вторая группа включает рудные провинции и районы с месторождениями в слабо или нелитифицированных комплексах горных пород, в осадочных бассейнах чехлов и молодых платформ (экзогенный класс месторождений).

Эта группа объединяет: провинции с сингенетическими концентрациями урана сорбционного происхождения (поверхностный, с углефицированными остатками, фосфатный, черносланцевый типы) и провинции с эпигенетическими гидрогенными месторождениями песчаникового типа, представленные пластовыми, ролловыми и палеодолинными типами. Рудные провинции сформировались в осадочных бассейнах в центральных (разрушенных) частях купольных структур и в межкупольном пространстве в пределах рифтогенных структур.

В числе закономерностей формирования провинции сингенетического типа отмечается постоянная связь урана с фосфатным и углеродистым веществом (провинции Фосфория, Чаттануга и др.). Для большей части эпигенетических провинций с гидрогенными месторождениями в суборогенных впадинах и чехлах платформ, перекрывающих древние купольные структуры, значительна роль линейных, линейно-дуговых разломов в отложениях осадочных бассейнов (Притяньшаньская провинция, плато Колорадо и др.). Важная роль разломам отводится в локализации гидрогенного оруденения вблизи или на флангах нефтегазоносных областей, которые являются источниками газово-жидких восстановителей (Южный Техас, Центрально-Кызылкумская провинция).

Вышеуказанные закономерности и пространственное положение рудных районов и провинций позволяет сделать несколько выводов

о прогнозе качества руд в их пределах. Принадлежность урановорудных районов к сходным геологическим структурам не всегда позволяет предполагать и сходный уровень возможного качества руд. Можно полагать, что региональным критерием прогноза богатых эндогенных руд может являться параметр, определяемый как степень эволюции земной коры. Её геохронологический уровень достаточно отчетливо коррелирует с уровнем средних концентраций урана в гранитоидных образованиях купольных структур. Кроме того, существуют рудно-формационные типы уранового оруденения, резко различные по качеству руд. Так, выделяется группа рудных формаций, отличающихся низкосортными рудами, но гигантскими запасами: кварцево-галечные конгломераты нижнего протерозоя (Витватерсранд, ЮАР), ураноносные черные сланцы (Шведё, Швеция), фосфориты (Марокко), пегматиты (Шарлебуа, Канада), нефелиновые сиениты (Илимауссак, Гренландия), анатектоидные аляскитовые граниты (Россинг, Намибия), карбонатиты (Палабора, ЮАР), калькреты (Йилири, Западная Австралия), урано-угольные месторождения (Нижнеилийское, Казахстан). Однако и формационный тип оруденения не гарантирует тождественности качества руд. Сами по себе особенности рудовмещающих пород не всегда оказывают существенное влияние на степень концентрированности уранового оруденения. Роль литологических факторов, также, как и структурных, в локализации богатого оруденения не может рассматриваться изолированно от характера метасоматических преобразований. Широкий площадной характер предрудного метасоматоза указывает на относительную открытость гидродинамических систем и является свидетельством разбавленности рудообразующих растворов. Для образования богатых руд более благоприятны закрытые гидродинамические системы, обеспечивающие наличие высоких концентраций металла в растворе и локальные, контрастные зоны околорудных изменений. Вероятно, для формирования большого объема богатых руд наиболее подходящим является изначально субщелочной раствор, включающий H_2, H_2S, S^{-2}, CH_4, углеводороды, Fe^{+2} и другие восстановители. Одним из источников нагретых субщелочных вод являются высококонцентрированные рассолы солеродных комплексов. Качество руд гидрогенных месторождений определяется также несколькими способами формирования рудоотложения. Если восстановительный барьер содержит только сингенетические восстановители (первичная сероцветная окраска), то руды, как правило, бедные и убогие. Эпигенетическая подготовка барьера к рудоотложению может быть связана как с действием восходящих восстановительных термальных вод, так и с латеральным перетоком углеводородов из соседних нефтегазоносных бассейнов.

Не исключено, что применяемый авторами историко-геологический подход при систематизации мировых УРП может оказаться более предпочтительным для геологов-практиков сравнительно с приведенной

выше типизацией МАГАТЭ, т.к. опирается на две объективные природные реалии – конкретную литологическую (петрографическую) среду рудогенеза и время (эпоху) рудообразования, что позволяет оперативно и объективно проводить корреляцию однотипных и одновозрастных рудных месторождений в пределах родственных УРП на различных континентах Земли. Здесь же может заключаться и прогнозно-поисковый критерий для потенциальных УРП.

Ниже в табл. 1 приведен перечень УРП, представленный на основе вышеизложенных принципов.

Необходимо отметить, что в предлагаемой типизации имеется одно логически обоснованное отклонение от вышеизложенных общих принципов. В условно выделяемую третью надгруппу объединены урановорудные территории в ранге районов и зон, в общих чертах охарактеризованные в первых двух надгруппах (группы провинций IV–VII), но обладающие рядом специфических особенностей, на которых обычно не акцентируется внимание при классификации. В их числе: а) приуроченность к разнотипным и разновозрастным депрессионным структурам кальдерного, бассейнового и даже палеодолинного типа, зачастую с резким несогласием, перекрывающим предрифейские гранито-гнейсовые купола и телескопирующимся в разных сочетаниях, б) совмещение (сближенность) в пространстве и времени рудогенных процессов окислительной и флюидно-восстановительной направленности, в) особо крупные ресурсы урана как рудоносных территорий в целом, так и крупные и даже уникальные масштабы отдельных месторождений (десятки и сотни тысяч тонн) при повышенных и весьма высоких содержаниях урана: в «песчаниковых» рудах до десятых долей процента и первых процентов, а для руд «несогласия» до 10–20%. Указанные особенности позволяют причислять месторождения третьей надгруппы к классу полигенных или гибридных.

Следует иметь ввиду, что предложенная типизация урановых месторождений в рамках УРП с одной стороны по максимуму адаптирована к терминологии МАГАТЭ, а с другой большое значение в ней придается типоморфным геодинамическим обстановкам рудолокализации и рудосопровождающей трансформации пород. В названиях типов месторождений предпочтение отдается в первую очередь не минеральному или элементному составу руд, а рудовмещающей среде. Для класса эндогенных месторождений дополнительно вводится указание типа рудосопровождающих метасоматитов, отражающих в определенной мере специфику процессов рудогенеза. Кроме двух традиционных генетических классов урановых месторождений (эндо- и экзо-) выделен класс полигенных рудных объектов (типа несогласия, гематитовых брекчий, черносланцевый, метапесчаниковый).

Таблица 1

Типизация урановорудных провинций Мира

Группы провинций	Типы провинций	Провинции и мегапровинции, районы
1	2	3
Надгруппа 1. Урановорудные провинции в литифицированных комплексах пород основания древних и молодых платформ, срединных массивов и ареалах континентального вулканизма и гранитоидного магматизма (I–V группы провинций)		
I. Рудные провинции в типоморфных протоструктурах нуклеаров	Рудные провинции с месторождениями в эпикратонных протоорогенных и протооплатформенных впадинах нуклеаров (тип золото-ураноносных кварцевогалечных конгломератов): а) в нуклеарах антиформного типа (куполах), б) в нуклеарах синформного типа (обращенных куполах)	а) Мегапровинция Сьюпериор: Южно-Канадская провинция Блайнд-Ривер; Восточно-Бразильская мегапровинция: провинции Жакобина, Кампус-Белус, Железорудного Четырехугольника; Афро-Австралийская мегапровинция: провинции Витватерсранд – Трансвааль, Наллагайн-Хаммерсли; Индостанская мегапровинция: Южно-Индийская провинция; Северо-Китайская мегапровинция: провинция Иньшань-Ляохэ. б) Западно-Африканская мегапровинция: провинция Золотой Берег; Свеко-Фенно-Карельская мегапровинция: Фенно-Карельская провинция
II. Рудные провинции в структурах разновозрастной активизации нуклеаров	Рудные провинции с месторождениями в разновозрастных щелочных кольцевых интрузиях-трубках (карбонатитовый тип)	Рудный район Палабора –провинция Витватерсранд. Рудный район Илимауссак. Кольская провинция. Рудный район Посус-ди-Калдас – Восточно-Бразильская мегапровинция
	Рудные провинции и пояса с месторождениями в ареалах распространения мезозойских и позднепалеозойских высокорадиоактивных лейкократовых гранитов и ВТС (гранитовый и вулканитовый типы): а) синформные нуклеары в субдукционной позиции, б) синформные нуклеары в коллизионной позиции	а) Южно-Сибирская мегапровинция: Гоби-Хэнтэй-Даурская прорвинция, Центрально-Монгольский рудный пояс; Южно-Китайская мегапровинция: провинция Нанлин, рудный пояс Ганхан; Чукотская мегапровинция: провинция Певек, Провиденский рудный пояс. б) Западно-Африканская мегапровинция: провинция Ахаггар
	Рудные провинции с месторождениями в областях мел-палеогеновой (ларамийской) и неогеновой (альпийской) активизации наложенных палеозойских черносланцевых прогибов и вулканогенно-молассовых впадин, кайнозойских ВТС (черносланцевый, гранитовый, вулканитовый, метапесчаниковый типы)	Карпато-Балканская кольцевая мегапровинция: провинции Восточно-Карпатская, Предбалканская, Западно-Румынская, Западно-Карпатская, Восточно-Болгарская

Продолжение табл. 1

1	2	3
III. Рудные провинции в протоструктурах предрифейских гранито-гнейсовых куполов (ГГК)	Рудные провинции с месторождениями в щелочных (K, Na, Mg) метасоматитах полей гранитизации-протограбенов ГГК: а) в полях гранитизации мигматит-гнейсового типа (аляскитовый-порфировый тип); б) в полях гранитизации мигматит-гранитового типа (альбититовый-кировоградский тип); в) в полях гранитизации мрамор-кристаллосланцевого типа (альбитит-слюдитовый падминский тип)	а) провинции Дамара, Гренвилл; рудный район Шарлебуа провинции Атабаска; Дёс-Леглиерский рудный район (Ц. Алдан); б) Центрально-Украинская провинция, рудный район Биверлодж провинции Атабаска; в) Онежская провинция, Моравский рудный район Чешской провинции
IV. Рудные провинции в протоструктурах предрифейских ГГК вблизи поверхностей древних ССН	Рудные провинции с месторождениями типа несогласия: а) в зонах предвепсийских ССН (австралийский подтип); б) в зонах предрифейских ССН (канадский подтип)	а) провинция Аллигейтор-Риверс, б) провинция Атабаска – рудный район Волластон – Саскачеван, провинция Франсвиль (?), провинция Сингбхум (?), Средне-Чешский рудный район Чешской провинции (?)
V. Рудные провинции в активизированных структурах предрифейских ГГК, зон ССН и чехлов	Рудные провинции с месторождениями: а) в структурах ранне-среднерифейской активизации (тип объемных брекчий); б) в структурах позднерифейской-вендской активизации (жильно-штокверковый, жильный аргиллизитовый катангский тип); в) в структурах среднепалеозойской активизации (жильно-штокверковый, жильный альбитит-березитовый кокчетавский и прибалхашский типы); г) в структурах позднепалеозойской активизации (черносланцевый, гранитовый, вулканитовый, жильно-штокверковый и жильный типы: среднеевропейские и азиатские); д) в структурах мезозойской активизации (альбитит-гумбеитовый эльконский и альбитит-гидрослюдитовый стрельцовский типы)	а) Южно-Австралийская провинция Фром (рудный район Роксби-Даунс – Олимпик-Дам); Провинция Больших озёр СЗ Канады (Медвежьего и Невольничьего); б) провинции Катанги и Енисейского кряжа; в) Северо-Казахстанская и Прибалхашская провинции; г) провинции: Чешская, Центрально-Французская Иберийская, Западно-Тяньшаньская; д) Алданский рудный пояс: Центрально-Алданская, Чарская провинции; Монголо-Приаргунский рудный пояс: Приаргунская провинция, Северо-Чойбалсанская провинция

Продолжение табл. 1

1	2	3
Надгруппа 2. Урановорудные провинции в слабо- или нелитифицированных комплексах пород осадочных бассейнов в чехлах древних и молодых платформ (VI–VII группы провинций)		
VI. Рудные провинции фанерозойских осадочных бассейнов в чехлах древних платформ	Рудные провинции позднепалеозойских и мезозойско-кайнозойских плитных осадочных бассейнов с месторождениями пластовых ураноносных фосфоритов (фосфоритовый тип, костно-детритовый подтип)	а) Провинция Фосфория (пермь); б) Аравийско-Сахарская или Средиземноморская мел-палеогеновая мегапровинция (рудный пояс); в) Южно-Русская (Прикаспийская) третичная провинция
	Рудные провинции мезозойско-кайнозойских суборогенных осадочных бассейнов с экзогенными эпигенетическими инфильтрационными месторождениями в зонах пластового окисления и восстановления с ролловыми и пластовыми рудными залежами (песчаниковый тип: вайомингский и колорадский подтипы: а) на склонах древних щитов; б) на плитах древних платформ	а) Западно-Африканская мегапровинция: Мали-Нигерская провинция; провинция Карру; б) провинция Вайоминг-Колорадо, мегапровинции-мегапояса Прикордильерская и Приандийская
VII. Рудные провинции мезозойско-кайнозойских осадочных бассейнов в чехлах молодых платформ	Рудные провинции суборогенных осадочных бассейнов с экзогенными эпигенетическими инфильтрационными месторождениями в зонах пластового и грунтово-пластового окисления и восстановления (песчаниковый тип): а) ролловые и пластовые рудные залежи (сарысуйский и учкудукский подтипы); б) палеодолинные рудные залежи (далматовский подтип)	а) Притяньшаньская мегапровинция: Чу-Сарысуйская, Сырдарьинская, Центрально-Кызылкумская провинции; Южно-Техасская рудная провинция; Северо-Чешский (Лабский) рудный район; Гобийская провинция; б) Западно-Сибирская или Урало-Енисейская мегапровинции (рудный пояс): Зауральская, Кулундинская (Семизбайский рудный район), Приенисейская провинции; Амалатская провинция (Витимский рудный район)
	Рудные провинции мезозойских плитных-суборогенных осадочных бассейнов с пластовыми месторождениями урано-угольного типа	Илийская провинция

Продолжение табл. 1

1	2	3
Надгруппа 3. Урановорудные территории в разновозрастных и разнотипных депрессиях (осадочных бассейнах, впадинах, системах палеодолин, вулканических кальдерах и их основании), которые характеризуются проявлениями флюидно-восстановительного эпигенеза (IV–VII группы провинций)		
Рудные провинции в разновозрастных осадочных бассейнах и впадинах (группы IV, VI, VII)	Рудные территории в мезозойско-кайнозойских суборогенных осадочных бассейнах с эпигенетическими инфильтрационными месторождениями в зонах пластового окисления и восстановления (песчаниковый тип, колорадский и учкудукский подтипы): а) на древних платформах (VI); б) на молодых платформах (VII)	а) Рудный район Грантс провинции Колорадо; б) Учкудукский рудный район Центрально-Кызылкумской провинции, Южно-Техасская провинция, Северо-Чешский (Лабский) рудный район Чешской провинции
	Рудные территории в зонах ССН вблизи основания эпикратонных рифейских и вепсийских осадочных бассейнов с месторождениями типа несогласия (а) и производными их регенерации (б) (IV)	а) Рудные зоны Волластон -Саскачеван провинции Атабаска и Джабилука-Кунгарра провинции Аллигейтор-Риверс; б) Рудные зоны Франсвиль провинции Конго и Средне-Чешская (Пшибрамская) Чешской провинции
Рудные провинции в разновозрастных вулканических коллапс-кратерах и кальдерах (V, VII)	Рудные территории в позднерифейских и мезозойских вулканических коллапс-кратерах и кальдерах с месторождениями типа объёмных гематитовых брекчий: а) в позднерифейских кальдерах; б) в мезозойских кальдерах (предположительно)	а) Рудный район Роксби-Даунс (Олимпик-Дам) Южно-Австралийской провинции. Рудный район Порт-Радий провинции Больших озёр СЗ Канады (Медвежьего и Невольничьего); б) Стрельцовский рудный район Приаргунской провинции, Витимский рудный район Амалатской провинции

Учитывая, что авторы не ставили своей целью оценку потенциала урана в приведенных (табл. 1) УРП, ниже в табл. 2 приводятся данные о главных УРП Мира с указанием ресурсов урана по одной из последних сводок МАГАТЭ [28].

Таблица 2

List of the main uranium provinces

Province/district	Country	Type of deposits	Geol. Res.(tU)
1	2	3	4
North Africa – Midle East	N. Africa: Mor, Tun, Lyb, Egy, Jord, Syr	Phosphates	7,500,000
Phosphoria Formation	USA	Phosphates	7,000,000
Gawler Craton	Australia	Polymetallic IOCG	2.200.000
South Scandinvian	Sweden, Estonia	Black shales	900,000
Chu Saryssu/Syr Daria	Kazakhstan	Sandstone-roll	765,000
Florida	USA	Phosphates	765,000
Namib Desert	Namibia	Alaskites, surficial	542,000
Athabasca Basin	Canada	Unconformity, Metasediment-hosted, Na metasomatism	710,000
Witwatersrand Basin	RSA	QPC	620,000
Tim Mersoi Basin	Niger, Algeria	Sandstone tabular	530,000
Alligator Rivers	Australia	Proterozoic unconf.	420,000
Elkon District	Russia	K-Metasomatites	345,000
Grants Mineral Belt	USA	Sandstone-tabular	290,000
Elliott Lake District	Canada	QPC	290,000
South Africa	RSA	QPC, intrusive, tabular, coal, surficial, phosphates	600,000
Wyoming	USA	Roll front	255,000
Karoo:	Bots, Mal, RSA, Tanz, Zamb	Tabular	242,500
Kyzylkum District	Uzbekistan	Roll front	240,000
Central Ukraine	Ukraine	Na-metasomatite, sandstone	180,000
Texas Coastal Plain	USA	Sandstone-roll	118,000
Hercynian Province	Portugal, Spain, England, France, Germany, Czeck Republik	Granite-related – Sandstone – blackshales – hydrothermal	100,000
Kazakh U province	Kazhakstan	Roll front, volcanic, Metasediment-hosted, Phosphates	
Western Australia	Australia	Surficial	81,000
Singhbhum District	India	Metasediment-hosted	70,000
Cudapah basin	India	Unconformity, limestone	

Элементы прогноза. Учитывая элементы случайности наиболее крупных находок за рубежом и отсутствие существенных открытий в России за последние 30 лет, следует вывод о необходимости дальнейшего совершенствования отечественных прогнозно-методологических разработок, существенного повышения их эффективности и коренной модернизации. Этот вывод не исключает, а напротив – предполагает параллельно с инновациями в методологии прогнозирования или даже с их опережением – расширение рационального комплекса методов и технологий прогнозно-поисковых работ на уран, в особенности глубинных и дистанционных, при периодическом их повторении с аппаратурой новых поколений, в том числе в пределах опытно-методических полигонов, создаваемых по примеру МАГАТЭ.

Совершенствование методологии регионального прогнозирования на уран должно включать следующие взаимосвязанные направления: 1) пополнение, систематизацию и анализ банка информации по всем известным урановым и комплексным рудным объектам и территориям разных континентов с учетом мирового опыта прогнозно-металлогенических исследований и поисковых работ; 2) критический пересмотр, в том числе и под влиянием новых фактов, традиционно существующих представлений о закономерностях формирования и размещения концентраций урана в пространстве и времени с учетом как современных данных о строении и развитии земной коры, так и результатов новейших палеотектонических реконструкций; 3) внедрение в практику региональных прогнозно-металлогенических исследований элементов модернизации, т.е. новых творческих разработок – инноваций, не получивших пока общего признания, но подтверждающихся на примерах ряда конкретных рудоносных территорий и крупных объектов в различных районах мира.

Авторы рекомендуют крайнюю желательность дальнейшего развития следующих направлений в металлогенических разработках: 1) о связи целого ряда эндогенных, полигенных и, отчасти, экзогенных урановорудных провинций с гигантскими коровыми купольными структурами двух глобальных докембрийских генераций и о приуроченности рудных районов и узлов в их пределах к элементам радиально-концентрической компенсационной делимости кровли; 2) об «этажности» крупных полихронных и полигенных урановых провинций, сформированных на активизированных в разное время рудоносных купольных структурах; 3) о морфологических различиях рудоконтролирующих региональных редокс-фронтов (восстановительных геохимических барьеров) гидрогенных урановых провинций в осадочных бассейнах разного типа; 4) о конвергентности некоторых типов урановых месторождений и рудных провинций, то есть о вероятности их формирования и размещения в иных по сравнению с прототипами пространственно-временных рамках (исходя из принципа абстрактных аналогий).

Эти разработки, особенно при их совместном использовании, проливают свет на существование и «неожиданность» выявления слабо проявленных на современной поверхности и слепых рудных гигантов на известных ураноносных территориях, которые оказываются приуроченными к активизированным купольным структурам с присущими им типоморфными особенностями строения и рудоконтроля.

Выводы. В целом развиваемые авторами положения направлены на более достоверное прогнозирование и поиски скрытых и слепых урановых и комплексных месторождений, причем в первую очередь на территориях определившихся и экономически освоенных районов, где наиболее продуктивна разработка и внедрение современного комплекса глубинных и дистанционных исследований. К таким территориями России относятся: Приаргунский, Ононский (Агинский), Витим-Амалатский, Чарский, Центрально-Алданский, Онежский, Ладожский, Воронежский рудные районы, большая часть которых, согласно палеореконструкциям, размещается в контурах гигантских купольных структур предрифейского заложения и различного времени активизации. Представляется также, что основные усилия геологических служб нашей страны должны быть сосредоточены на выявление УРП с объектами типа несогласия, получившими в мире устойчивый приоритет [22], а также комплексными рудами с радиоактивными элементами [9].

Как показывает мировой опыт, для успешного «ренессанса» МСБ урана России кроме предлагаемых мер по совершенствованию и модернизации теоретических основ прогнозирования необходимы также практические действия, в особенности устойчивое и достаточное финансирование отрасли при неукоснительном соблюдении очередности и технологии прогнозно-поисковых работ независимо от их временных успехов или неудач.

Литература

1. Афанасьев Г.В., Миронов Ю.Б. Уран в купольных структурах земной коры. Опыт палеореконструкций в металлогении. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2010. 360 с.

2. Билибин Ю.А. Металлогенические провинции и металлогенические эпохи. М. Госгеолтезиздат, 1955. 88 с.

3. Константинов М.М., Куликова Е.Я. Урановые провинции. – М.: Атомиздат, 1960. 306 с.

4. Кушнеренко В.К., Карпунин А.М., Миронов Ю.Б. Особенности радиогеохимии и радиоэкологические аспекты Саксо-Тюрингии (Германия) / ред. Ю.Б. Миронов. – СПб: Изд-во ВСЕГЕИ. 2015. – 132 с.

5. Лаверов Н.П., Величкин В.И., Шумилин М.В. Урановые месторождения Содружества: основные промышленно-генетические типы и их размещение. – Геология рудных месторождений, 1992, т. 34, № 2. С. 3–18.

6. Лаверов Н.П., Смилкстын А.О., Шумилин М.В. Зарубежные месторождения урана. М.: Недра, 1983. 320 с.

7. Машковцев Г.А., Константинов А.К., Мигута А.К., Шумилин М.В. Уран российских недр. М.: ВИМС, 2010. 850 с.

8. Машковцев Г.А., Тарханов А.В. О Техническом совещании «Урановые провинции и моделирование минерального потенциала». МАГАТЭ (г. Вена) 20–22 июня 2011 г. Инф. сб., вып. 156. Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов. М.: ВИМС, 2011. С. 154–156.

9. Месторождения стратегических и высокотехнологичных металлов Российской Федерации: закономерности размещения, условия формирования, инновационные технологии прогноза и освоения: Научные результаты, полученные при выполнении программы № 1.48 фундаментальных исследований Президиума РАН / Главный редактор академик РАН Н.С. Бортников. Ответственный составитель чл.-корр. РАН В.А. Петров. – М.: ИГЕМ РАН, 2020. 317 с.

10. Металлогения урана и тория СССР. Ред. А.А. Смыслов, В.М. Терентьев, В.М. Шумилин. М. –Л.,1988. 252 с.

11. Металлогения урана континентальных блоков земной коры / Г.В. Афанасьев, С.В. Бузовкин, Б.Б. Голубев и др. Под ред. Ю.М. Шувалова. Л.: Недра, 1980. 256 с.

12. Основы прогноза урановорудных провинций и районов / Ред. Н.П. Лаверов. – М.: Недра, 1986. 206 с.

13. Печенкин И.Г., Грушевой Г.В. Металлогения ураноносных осадочных бассейнов Евразии. М.-СПб.: Изд-во РИС ВИМС, 2013.

14. Пинский Э.М. О планетарных закономерностях металлогении урана. Региональная геология и металлогения, 1999, № 8. С. 100–107.

15. Рудные узлы России / Ред. Е.В. Плющев – СПб, Издание ВСЕГЕИ, 2001. 416 с.

16. Тарханов А.В., Бугриева Е.П. Крупнейшие урановые месторождения мира. Минеральное сырьё, № 27, М.: ВИМС, 2012. 118 с.

17. Тарханов А.В., Ветров В.И., Абросимов А.А., Мельник И.Г. Распределение мировых запасов урана. – Отечественная геология, 1996, № 11. С. 3–10.

18. Ткачев А.В., Рундквист Д.В. Эволюция формационно-генетических типов крупномасштабных месторождений минерального сырья и видового разнообразия полезных ископаемых в них как отражение тенденций развития глобальной металлогении. // Наука и просвещение. К 250-летию Геологического музея РАН. М. Наука. 2009. С. 209–284.

19. Тугаринов А.И. О причинах образования рудных провинций. – Химия земной коры. М.: 1963, т. 1. С. 153–177.

20. Чернов В.Я., Харламов М.Г. Рудные провинции срединных массивов (на примере Востока России и Северного Казахстана). – Региональная геология и металлогения, 1999, № 9. С. 77–85.

21. Шумилин М.В. Историческая металлогения урана (опыт глобального анализа). – Иркутск: изд. ООО «Репроцентр», 2015. – 255 с.

22. Шумилин М.И. Урановые месторождения типа несогласия: геология, генезис, ресурсы, опыт поисков и оценки, перспективы новых открытий / Минеральное сырье, № 41 – М.: ФБГУ ВИМС, 2020- 180 с.

23. Щеглов А.Д. Основы металлогенического анализа. М.: Недра, 1980. 432 с.

24. Dahlkamp F.I. Classifikation sheme for uranium deposits. Vienne IAEA, 1989. P. 1–29.

25. Dahlkamp F.I. Uranium ore deposits. Berlin. Heidelberg: Springer – Verlag, 1991.

26. Dahlkamp F.I. Uranium Deposits of the World.-Asia.-Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 2009. 508 p.

27. Dahlkamp F.I. Uranium Deposits of the World. – USA and Latin America. – Springer Verlag, Berlin – Heidelberg, 2010. 518 p.

28. Uranium Provinces, МАГАТЭ, т.18-83, 2020.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ НА УРАН В УЧУРО-МАЙСКОМ РАЙОНЕ (ХАБАРОВСКИЙ КРАЙ)

***А.В. Томашев*[1], *А.В. Молчанов*[2]**
1 – ФГБУ «ВИМС», г. Москва,
2 – ФГБУ «ВСЕГЕИ», г. Санкт-Петербург

Российская сырьевая база урана обладает значительными запасами, однако большая часть руд характеризуется низким качеством, что затрудняет или делает невозможным их отработку в современных экономических условиях. К 2030-2035 гг. в России возможно образование дефицита уранового сырья, пригодного для освоения в существующих экономических условиях, что будет связано с истощением запасов разрабатываемых месторождений. В связи с этим в настоящее время *необходимо усилить поиски месторождений высокотехнологичных руд,* в том числе в зонах древних структурно-стратиграфических несогласий.

Месторождения урана «типа несогласия» размещаются вблизи поверхностей региональных структурно-стратиграфических несогласий (ССН) между кристаллическим основанием древних щитов и перекрывающими их слабометаморфизованными континентальными толщами протерозойского чехла. Длительность формирования месторождений «типа несогласия» с многоэтапным, многоступенчатым перераспределением рудного вещества в ходе различных процессов, проявлявшихся на до- и постраннепротерозойских геотектонических этапах развития урановорудных провинций, способствовала мобилизации урана из вмещающих пород с образованием промышленных концентраций. Наиболее значимые месторождения «типа несогласия» известны в урановорудной *провинции Атабаска* канадского щита, металлогенический облик которой определяют разноранговые урановорудные объекты. Среди последних выделяются уникальные по запасам (более 100 тыс. т) комплексные (с никелем, кобальтом, ванадием и другими компонентами) месторождения ультрабогатых руд, в которых содержания урана достигают десятков процентов – Ки-Лейк, Сигар-Лейк, Мак-Артур, Мидуэст и др.

Основные закономерности уранового рудогенеза в месторождениях «типа несогласия» в пределах канадского щита сводятся к следующему [5]:

- отчетливый структурный контроль зоной предатабасского (предраннерифейского) ССН в совокупности с субвертикальными долгоживущими разрывными нарушениями, развитыми в афебийских толщах. Участки дизъюнктивов, прослеженные в породах доатабасского фундамента, как правило, трассируются зонами порфирокластеза и графитизации. Отмечается унаследованность разрывных структур фундамента в породах платформенного чехла. Чрезвычайно важным обстоятельством является то, что зона ССН отделяет, с одной стороны,

глубокометаморфизованные (амфиболитовая фация) сложнодислоцированные «жесткие» блоки дорифейского фундамента, изобилующие разноранговыми разрывными нарушениями сколового характера, а с другой – неметаморфизованные или слабометаморфизованные пологозалегающие, относительно пластичные терригенные отложения, базальные горизонты которых характеризуются отчетливо повышенной проницаемостью;

- рудные тела месторождений сопровождаются гидротермально-метасоматическими новообразованиями Fe-Mg-Ca и Si-щелочного петрохимического профиля, сопутствующими основным этапам рудообразования. Рудосопровождающие гидротермально-метасоматические образования и радиогеохимические ореолы характеризуются ограниченным латеральным распространением в терригенных породах группы Атабаска, но более широко проявлены в метаморфогенно-ультраметаморфогенных ингредиентах сложно-дислоцированного «жесткого» фундамента вблизи и непосредственно в зоне ССН. Последняя трассируется предатабасской метаморфизованной корой выветривания – реголитом;

- отмечается полихронный характер оруденения, обусловленный многостадийностью и длительностью процессов уранового рудогенеза. Радиологический возраст руд в единых рудных телах варьирует в широких пределах: от 1620, 1300-1350 млн лет до 27 млн лет и менее;

- по вопросу источника урана для месторождений «типа несогласия» существуют различные представления. Наиболее убедительны аргументы, рассматривающие в качестве источника геологические образования (метаморфиты, ультраметаморфиты, метасоматиты, рудные тела более ранних металлогенических эпох) доатабасского фундамента. Температура образования рудных тел по индивидуальным газово-жидким включениям составляет 130-150 °С;

- для богатых руд характерны: высокая контрастность геохимических барьеров, проницаемость рудоподводящих каналов и зон ССН; формирование зоны дезинтеграции пород чехла и фронта кислотного выщелачивания, проявленных на поверхности в зонах электронной и ионной проводимости, градиентного магнитного поля, минимумах аномалий поля Δg, аномальных линейно-вытянутых зон повышенных концентраций урана и его спутников. В породах фундамента участкам развития оруденения соответствуют значительная поляризуемость (до 30% и выше), повышенная концентрация $C_{орг}$ и CO_2 (до 0,68 и 23% соответственно), большая концентрация графита (до 45%). Отмечается зона выгорания графита вдоль тектонических нарушений и линейных кор выветривания, высокая проницаемость продуктивного горизонта в целом (до 13%), но пониженная в области формирования оруденения (до 5,7%).

Обнаружение урановорудных объектов «типа несогласия» провинции Атабаска позволило Канаде занять ведущее место в мире по

добыче и производству урана. Очевидна актуальность прогнозирования и поисков высокорентабельных месторождений урана «типа несогласия» на древних щитах территории России, в том числе и на Алданском щите.

Наиболее перспективная структура в пределах Алданского щита – его Тимптоно-Учурский блок, а именно Учуро-Майский терригенный прогиб, имеющий ряд структурно-тектонических позиций, сходных с аналогичными позициями района Атабаска Северо-Американской платформы.

Территория исследований расположена в пределах Аяно-Майского района Хабаровского края, в левобережье реки Учур, захватывая юго-восточную часть хребта Лурикан (рис. 1).

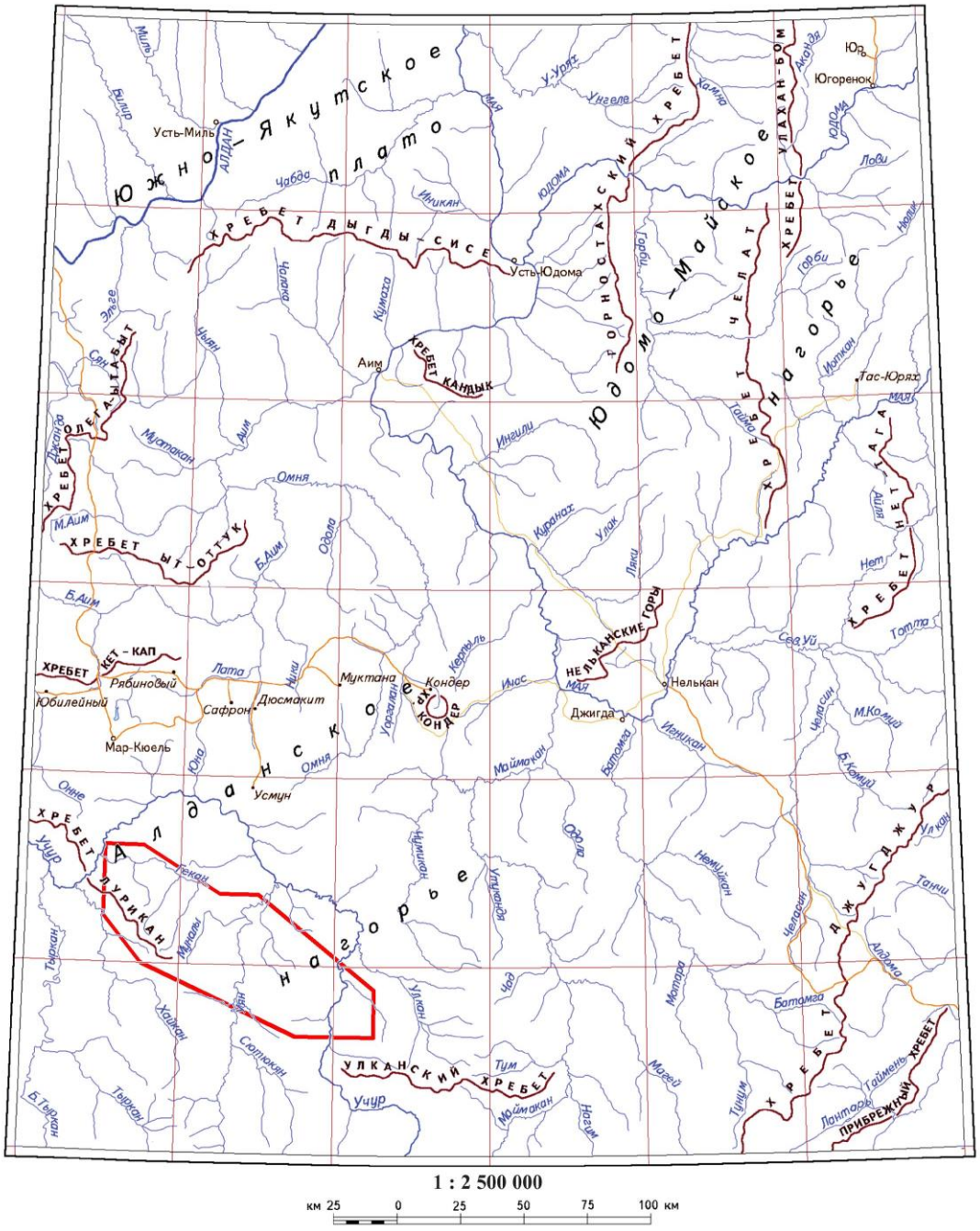


Рис. 1. Положение изучаемой территории (красный контур) в рамках листа О-53

Согласно схеме тектонического районирования в комплекте Государственной геологической карты РФ 1:1 000 000 (третье поколение) [3], изучаемая территория охватывает Учурскую зону прогибов и Улканский терригенно-вулканогенный (протовулканогенный) прогиб Сибирской платформы на их границе с Тырканским, Идюмо-Хайканским и Луриканским блоками раннедокембрийского кристаллического фундамента Алдано-Станового щита (рис. 2).

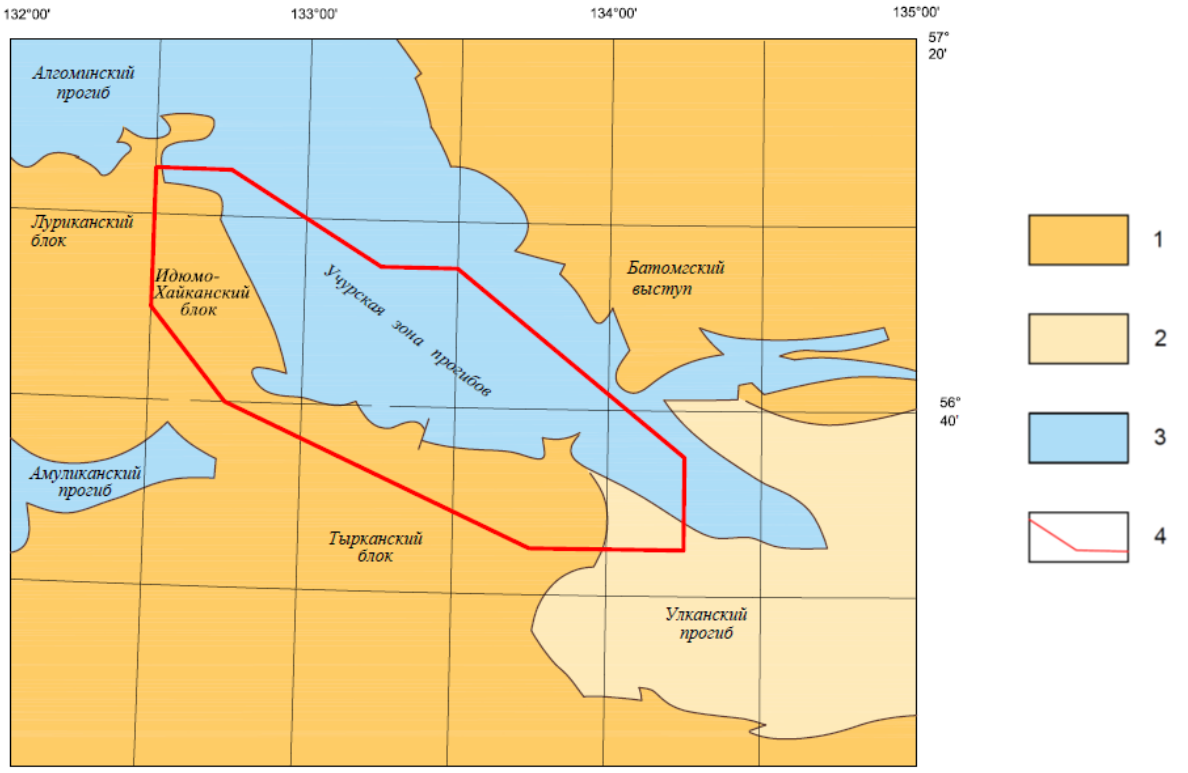


Рис. 2. Схема тектонического районирования района работ и прилегающей территории (по Дымовичу В.А. и др., 2012): 1 – структуры архейского кристаллического фундамента; 2, 3 – структуры Учуро-Майского прогиба; 4 – контуры исследуемой площади

Оценить возможность выявления месторождений «типа несогласия» в пределах Учуро-Майского прогиба целесообразно на фоне рассмотрения истории его геологического развития с выделением в рамках каждого этапа наиболее значимых урановорудных процессов и рудолокализующих структур.

В строении сложных блоковых сооружений региона на современном этапе исследований выделяется четыре основных структурно-вещественных комплекса: 1) раннеархейский фундамент; 2) раннепротерозойский платформенный проточехол; 3) рифей-кембрийский платформенный чехол; 4) мезо-кайнозойский активизационный ансамбль [2,3].

Фундамент Учуро-Майской впадины сложен глубокометаморфизованными раннеархейскими породами с преобладанием гранатсодержащих кристаллосланцев и плагиогнейсов, в том числе

графитсодержащих, с прослоями мраморов и амфиболитов. Породы мигматизированы и гранитизированы с образованием обособленных гранито-гнейсовых сводовых поднятий раннеархейской консолидации (Тырканского, Идюмо–Хайканского, Батомгского), разделенных зонами докембрийских тектонитов. Последние представляются наиболее древними тектоническими швами, определяющими проявление в районе наиболее крупных блоковых долгоживущих разломов преобладающей северо-западной и субширотной ориентировки. Они выражены зонами будинажа, бластомилонитов, сопровождаются жилообразными телами ультраметаморфогенных позднеархейских аляскитовых гранитов и генетически связанных с ними кремнещелочных и комплементарных им магнезиально-железо-кальциевых метасоматитов.

Данные метасоматиты характеризуются несколько вышекларковыми содержаниями радиоактивных элементов. Отдельные жильные тела этих высокотемпературных метасоматитов следует рассматривать как проявления комплексной уран-торий-редкоземельной минерализации, относимые к урановосной торий-редкоземельной формации в кварц-плагиоклаз-ортоклазовых и магнезиально-железо-кальциевых метасоматитах.

В начале протерозоя образования фундамента были выведены на дневную поверхность, и по ним повсеместно сформировалась кора выветривания. Радиологический возраст монофракции ортоклаза из предрифейской коры выветривания, определенный Rb-Sr методом во ВСЕГЕИ, составил 1670 млн лет (Коршунов и др., 1999ф). Процесс калишпатизации коры выветривания привел к резкому увеличению в них K_2O до 12-15% на фоне 1,5-3% в неизмененных породах [6].

В пределах Тимптоно-Учурского блока на этапе *раннепротерозойской активизации* породы фундамента претерпели тектоническую перестройку архейских структур, заложение новых и подновление древних зон разрывных нарушений (тектоно-метасоматических зон), интенсивную вулкано-плутоническую деятельность и накопление терригенно-осадочных толщ в относительно локальных депрессиях. В частности, в раннепротерозойское время был сформирован Улканский протовулканоген, сложенный терригенно-вулканогенными породами в составе топориканской (конгломерато-кварцево-песчаниковая формация) и элгетейской (терригенно-трахиандезит-трахириолитовая формация) свит, которые с резким структурно стратиграфическим несогласием залегают на архейских ультраметаморфогенных гранитоидах и метаморфитах, в том числе графитсодержащих и графитоносных, а также на метаморфизованных корах выветривания (реголитах) предраннепротерозойского возраста, вскрытых скважинами на рудопроявлении Топорикан. Базальный горизонт терригенно-вулканогенного разреза представлен в рассматриваемом регионе разнозернистыми кварцевыми песчаниками.

Отчетливой радиогеохимической специализацией характеризуются вулканиты терригенной трахиандезит-трахириолитовой (элгетейская свита) формации. Магматические образования этапа представлены в регионе габбро-сиенитовой и гранит-лейкогранитовой формациями, также характеризующимися отчетливой радиогеохимической специализацией.

Важной чертой раннепротерозойского этапа является формирование полного спектра (от высоко- до низкотемпературных) метасоматитов: формация кварц-альбит-микроклиновые метасоматиты, калиевые пропилиты, эйситы, характеризующиеся отчетливой радиогеохимической специализацией.

В целом на этапе раннепротерозойской активизации радиогеохимическая специализация Тимптоно-Учурского блока существенно усилилась.

В раннем протерозое были сформированы многочисленные проявления радиоактивной минерализации, относимые к урановосной торий-редкоземельно-редкометалльной формации, а также урановорудной формации в эйситах и эйситизированных породах, в том числе месторождение Тавитчак за контуром изучаемой территории. Оруденение отчетливо приурочено к зонам трещиноватости, брекчирования и катаклаза. Таким образом, к концу раннего протерозоя, до накопления терригенных пород рифейского возраста, рассматриваемый регион приобрел черты отчетливо радиогеохимически специализированного, а с металлогенической точки зрения – урановорудного.

Начиная с рифейского возраста на исследуемой территории существовал платформенный режим развития. В это время имели место процессы денудации и пенепленизации древней поверхности с одновременным прогибанием отдельных ее участков (Учурский эпикратонный прогиб), накопление мощной толщи красноцветных терригенно-осадочных отложений, нижняя часть которых с резким угловым несогласием залегает на образованиях архей-раннепротерозойских этапов развития и на древних метаморфизованных корах выветривания.

Базальные части разреза рифейских отложений представлены проницаемыми горизонтами конгломератов и конгломерато-брекчий, гравелитами и гравелито-песчаниками с максимальной мощностью до 100 м.

Большая часть прогиба выполнена осадочно-терригенными образованиями биридинской, конкулинской и адаргайской свит, слагающих уянскую серию рифейских отложений.

Учурская серия, представленная гонамской, омахтинской и эннинской свитами нижнерифейского возраста, в северо-восточной части Учурской зоны прогибов с размывом залегает на отложениях уянской серии. Стратиграфические колонки Улканского прогиба и Учурской зоны прогибов представлены на рис. 3.

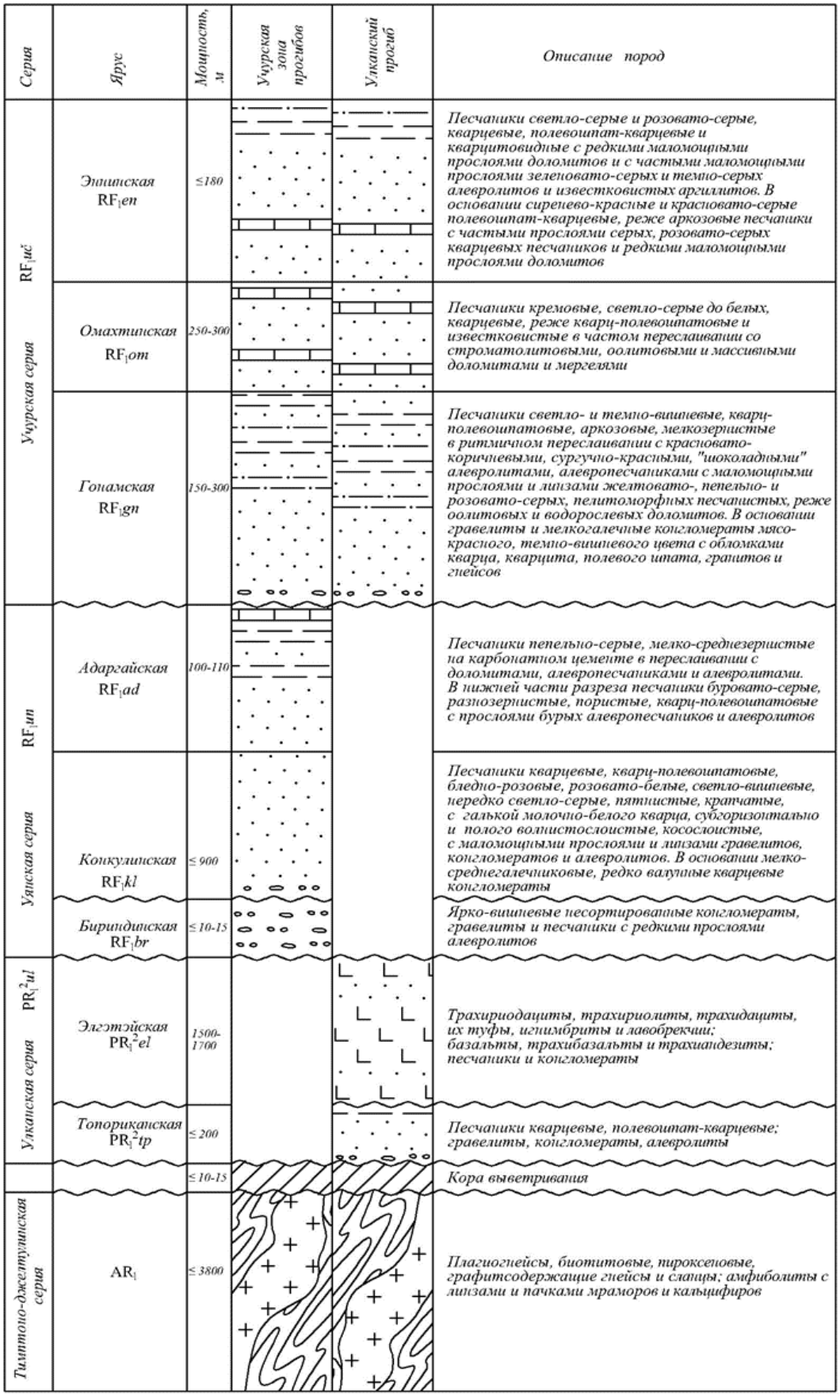


Рис. 3. Сравнительные стратиграфические колонки Учурской зоны прогибов и Улканского прогиба в пределах изучаемой площади

В пределах Учуро-Майского прогиба известны проявления урана, золота, редких металлов (тантала, ниобия), циркония, молибдена, ванадия, меди, полиметаллов, редких земель, серебра, бария, апатита (рис. 4). Непосредственно в пределах исследуемой территории известны проявления рудного золота в конгломератах, аркозовых песчаниках и алевролитах нижнего рифея, а также ряд золотоносных россыпей в голоценовых аллювиальных отложениях.

В кристаллических сланцах, гнейсах и крупнокристаллических гранитах луриканской серии верхнего архея зафиксированы проявления редкометальной (ортитовой) минерализации. Древняя кора выветривания по верхнеархейским породам фундамента с монацитом отмечена в районе верхнего течения р. Конкули. Коры выветривания характеризуются повышенными содержаниями урана и золота, что, видимо, обусловлено не первичным накоплением этих элементов, а привносом их на этапе мезозойской тектоно-магматической активизации.

В голоценовых аллювиальных отложениях отмечены шлиховые ореолы колумбита, монацита, циркона, рутила и сфена [1].

В центральной части Учурской зоны прогибов в нижнерифейских отложениях выявлено крупное баритовое проявление Адаргай [2,3]. Молибденит обнаружен в зонах милонитизации и окварцевания архейских гнейсов. Промышленные содержания ванадия (до 3,09% на мощность 1,7 м) отмечены в ураноносной зоне рудопроявления Конкули. Повышенные содержания хрома (до 0,3%) и никеля (до 0,07%) приурочены к дайкам основного состава в архейских гнейсах.

По обобщённым результатам предшествующих работ в контурах изучаемой территории выделены проявления радиоактивной минерализации трех металлогенических эпох – архейской, раннепротерозойской и позднепротерозойской [Горошко и др., 1999ф, 2001ф].

Расположение рудопроявлений урана в пределах изучаемой территории и ее ближайшего обрамления показано на рис. 5.

Проявления радиоактивной минерализации архейской металлогенической эпохи объединены в ураноносную торий-редкоземельную рудную формацию в кварц-плагиоклаз-ортоклазовых метасоматитах с монацит-циртолит-уранинитовым и торий-редкоземельными минеральными типами. Подавляющее большинство проявлений структурно тяготеют к апикальным частям сводовых поднятий, сложенных ультраметаморфогенными гранитоидами. Распределение радиоактивных элементов в рудоносных метасоматитах крайне неравномерное. Характер распределения рудного вещества – точечный. По рудной минерализации (уранинит, циркон, циртолит, монацит, торит) пункты радиоактивной минерализации близки к месторождениям урановорудного района Шарлебуа-Лейк Канадского щита.

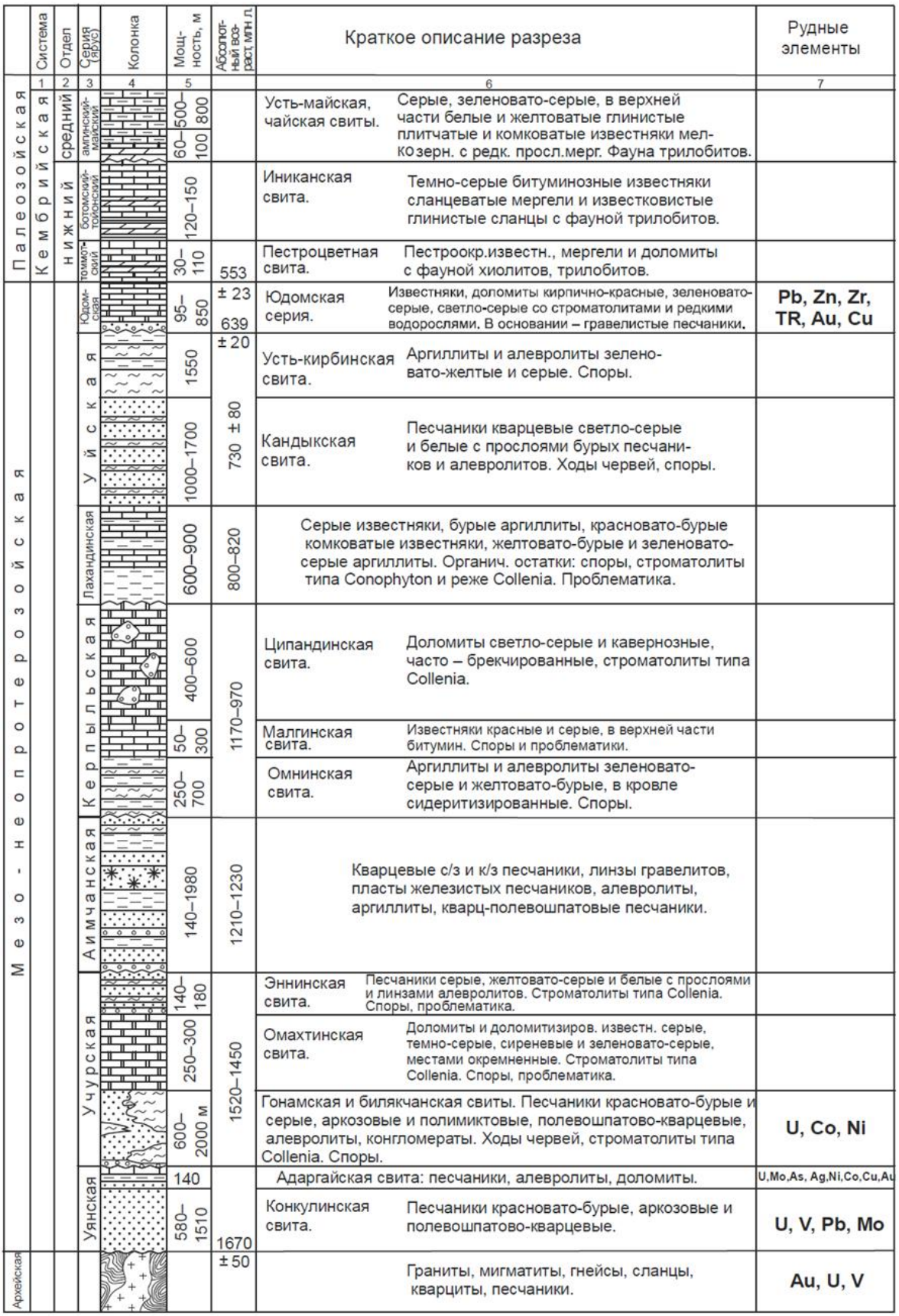


Рис. 4. Положение рудных проявлений на сводной стратиграфической колонке Учуро-Майской впадины (по Горошко М.В., Гильмановой Г.З., 2013)

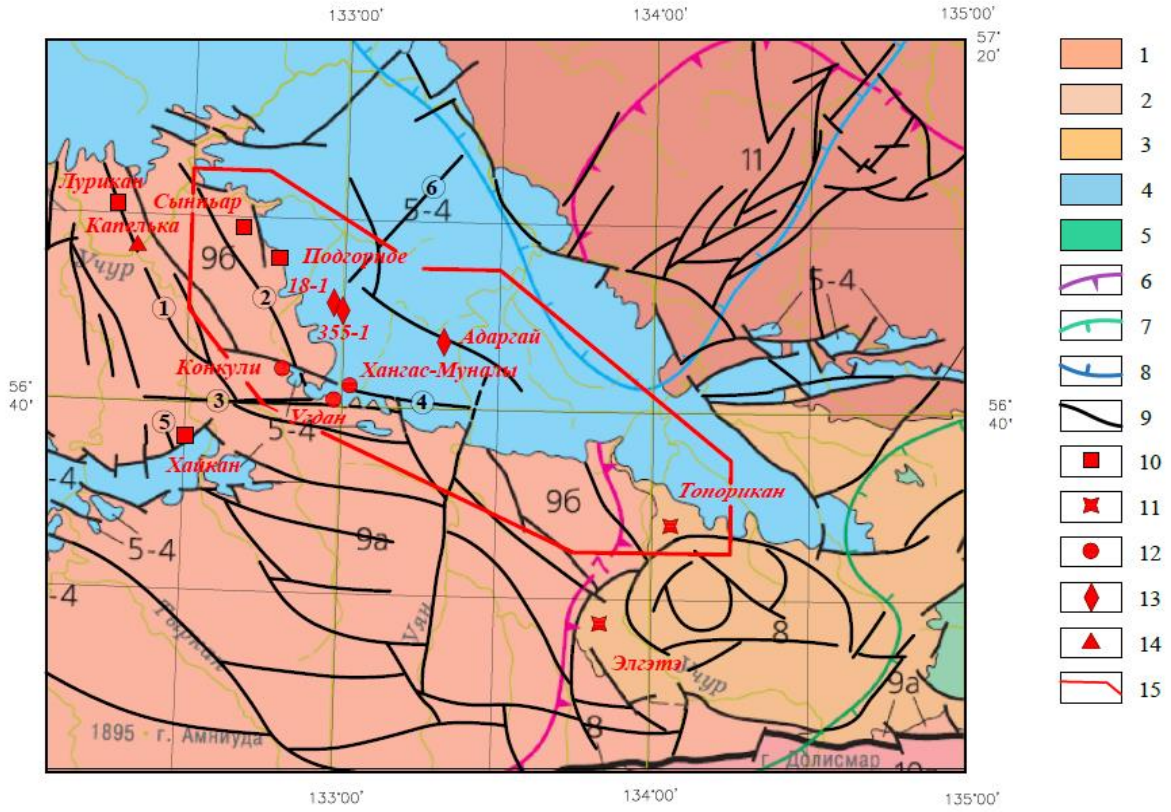


Рис. 5. Расположение рудопроявлений урана (с учетом данных Дымовича В.А. и др., 2012).

1-2 – структуры архейского кристаллического фундамента: 1 – Батомгский выступ (11); 2 – выступы Алдано-Станового щита (9а Тырканский блок, 9б Лурикканский блок); 3 – Улканский терригенно-вулканогенный прогиб (8); 4 – Учурская зона прогибов (5-4); 6 – Верхнеучурская вулкано-плутоническая зона Сибирской платформы; 7 – Предджугджурский вулкано-плутонический ареал; 8 – Кет-Капский вулкано-плутонический ареал; 9 – основные разломы: 1. Хайканский. 2. Сыннярский. 3. Угданский. 4. Толукский. 5. Хайканский. 6. Учуро-Майский; 10-14 – рудопроявления урана: 10 – раннепротерозойской металлогенической эпохи; 11-14 – позднепротерозойской металлогенической эпохи в зонах ССН; 11-14 – позднепротерозойской металлогенической эпохи: 11 – в основании нижнепротерозойской улканской серии; 12 – на юго-западной границе Учурской зоны прогибов, выполненной терригенными отложениями RF_1; 13 – на контакте отложений конкулинской и адаргайской свит платформенного чехла; 14 – в зонах эйситизации в разломах архейского фундамента; 15 – контуры исследуемой площади

Перспективы промышленной рудоносности урановых формаций архея оцениваются отрицательно. Однако они имеют важное значение, т.к. *фиксируют первый этап мобилизации и перераспределения рудогенных элементов в истории геологического развития Алданского щита с формированием мелких рудоконцентраций, которые могут принимать участие в рудогенерирующих процессах последующих металлогенических эпох.*

К раннепротерозойской металлогенической эпохе в границах изучаемой территории относятся рудопроявления урана Подгорное и Сынньар, а за ее пределами – проявления Лурикан и Хайкан. Для данных

проявлений характерно их расположение в относительной близости от границы ССН, в зонах влияния крупных разломов, испытавших неоднократную активизацию. Рудовмещающими породами являются катаклазированные крупнозернистые и пегматоидные граниты, на которые наложены процессы кремнещелочного метасоматоза, жилы биотит-полевошпатовых и амфибол-полевошпатовых пегматитов. Подчиненное значение имеет оруденение, локализованное в зонках рассланцевания и биотитизации по биотит-амфиболовым гнейсам. Установлена тесная связь урановой минерализации с наложенной биотитизацией [Горошко и др., 1999ф].

Размер рудных линз и гнезд от десятков сантиметров до первых метров, содержание в них урана крайне неравномерное – от первых сотых процента до 1%. Радиоактивные минералы представлены уранинитом, торитом, ортитом, гидроокислами урана, казолитом, кюритом, урансодержащим апатитом, цирконом и циртолитом.

Радиологический возраст оруденения, определенный уран-свинцовым методом, варьирует в интервале 1700-2500 млн лет [2].

Ураноносность позднепротерозойской металлогенической эпохи связана с тремя типами урановых проявлений:

- в зонах структурно-стратиграфических несогласий между архейским кристаллическим фундаментом и перекрывающими его породами платформенного чехла;
- в зонах эйситизации в разломах архейского фундамента;
- в массивах ультраосновных и щелочных пород позднепротерозойского магматического цикла.

Среди урановых проявлений первого типа (связанных с зонами ССН) выделен ряд разновидностей, различающихся как своей геолого-структурной позицией, так и структурно-морфологическими чертами.

К первой разновидности типа «несогласия» отнесены урановые, молибден-урановые проявления в основании нижнепротерозойской улканской серии. На северной оконечности Улканского протовулканогена вблизи зоны ССН предраннепротерозойского возраста известно рудопроявление Топорикан (рис. 6), а за пределами изучаемой территории – проявление Элгэтэ. Для этих объектов характерно развитие оруденения вдоль крупных разрывных тектонических структур, проявление оруденения на нескольких гипсометрических и структурных уровнях, в том числе и в породах фундамента, а также масштабное проявление низкотемпературной аргиллизации вмещающих пород. Урановая минерализация прожилково-вкрапленного типа представлена настураном, гидроокислами и фосфатами урана. Определения возраста уранового оруденения укладываются в интервал 1080-1350 млн лет [2].

Рудопроявление Топорикан по структурной позиции оруденения, характеру эпигенетических новообразований, наличию древних метаморфизованных кор выветривания может быть сопоставлено с

месторождениями района Биверлодж (месторождение Мартин) урановорудной провинции Атабаска. Содержание урана в рудах рудопроявления Топорикан варьирует от 0,01 до 0,73%. Рудные минералы – торбернит, метаторбернит, фосфуранилит и настуран.

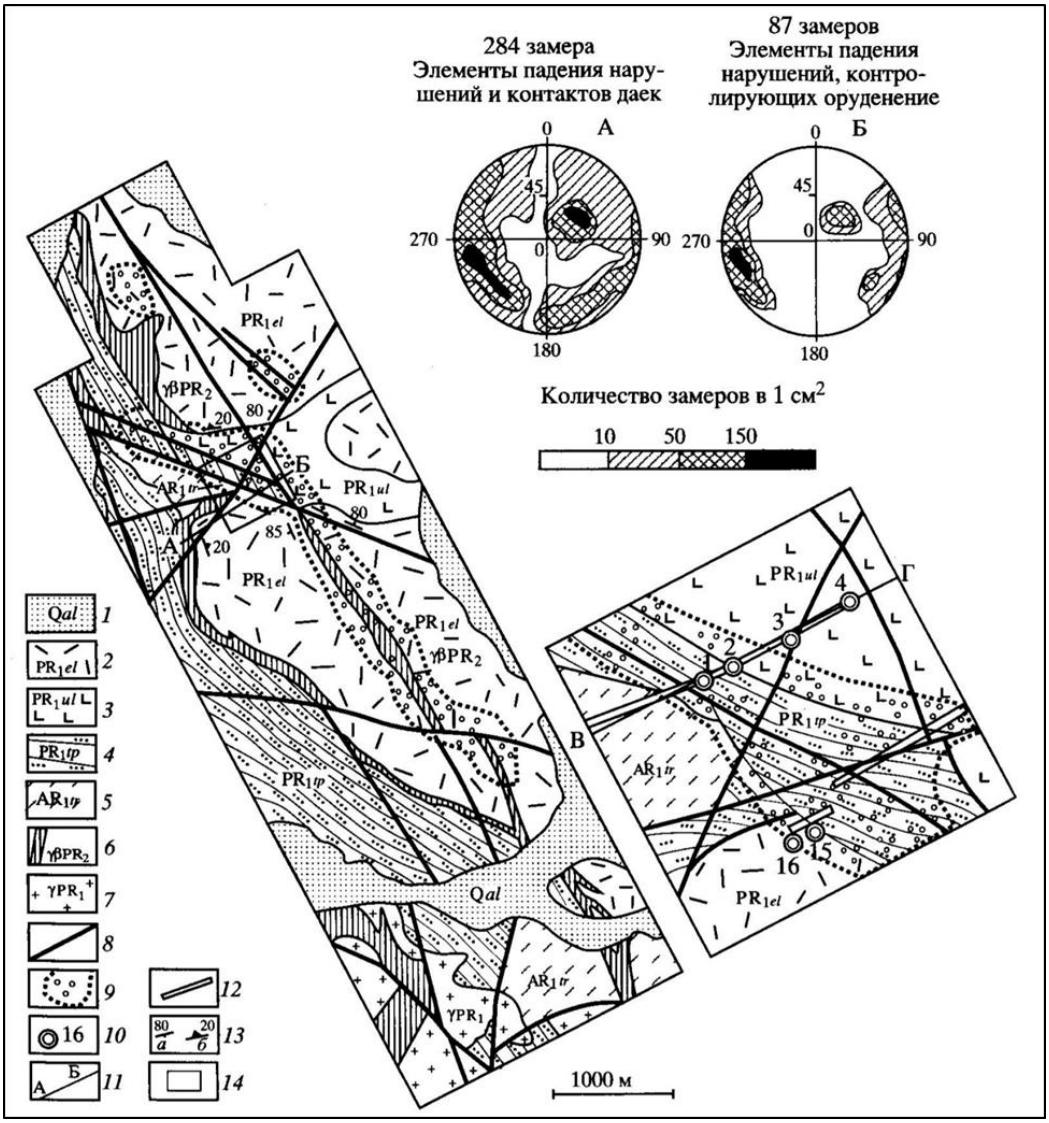


Рис. 6. Геологическая карта рудопроявления Топорикан (по Кириллову, 1994).
1 – четвертичные аллювиальные отложения; 2 – трахириолиты и трахириодациты элгэтэйской свиты; 3 – базальты и трахибазальты улкачанской свиты; 4 – кварцевые песчаники топориканской свиты; 5 – графит- и гранатсодержащие биотитовые гнейсы тырканской свиты; 6 – дайки долеритов маймаканского комплекса; 7 – граниты улканского комплекса; 8 – разрывные нарушения; 9 – ореолы аргиллизит-березитовых изменений; 10 – скважины и их номера; 11 – линии разрезов; 12 – траншеи; 13 – элементы падения разломов (а) и слоистости (б); 14 – участок детальных работ (показан справа)

Проявления второй разновидности сосредоточены в Учурской зоне прогибов. К ним относятся проявления Конкули (рис. 7), Угдан (рис. 8) и аномальный участок Хангас-Муналы.

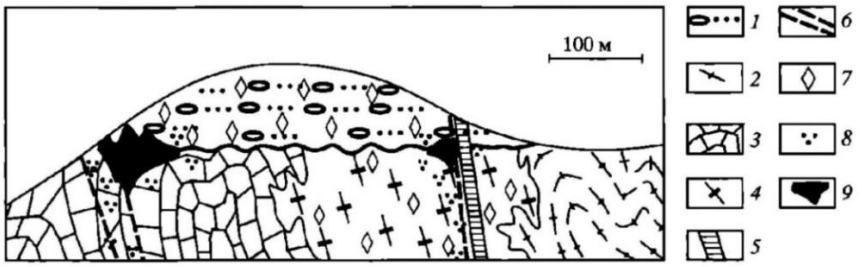


Рис. 7. Схематическая модель положения уранового оруденения на рудопроявлении Конкули (по Горошко, Кириллову, 1994).
1 – базальные отложения конкулинской свиты; 2 – биотитовые графитсодержащие гнейсы; 3 – мраморы; 4 – гранито-гнейсы; 5 – дайки субщелочных базальтоидов; 6 – зоны дробления; 7 – доломитизация; 8 – участки березит-аргиллизитовых изменений; 9 – рудные тела

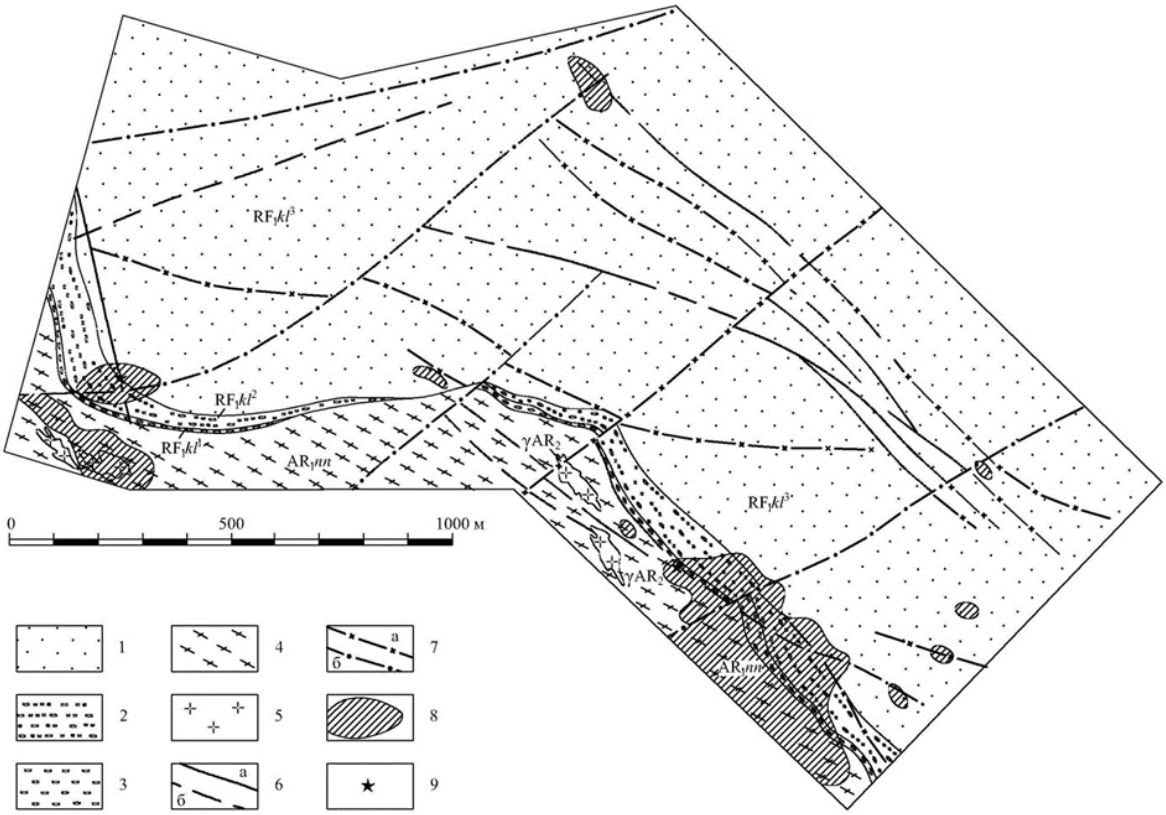


Рис. 8. Схематическая геологическая карта рудопроявления Угдан (по Горошко, 2001).
1-3 – нижний рифей, конкулинская свита: 1 – верхний горизонт (RF_1kl^3). Переслаивание мелкозернистых и гравийных кварцевых и кварц-полевошпатовых песчаников; 2 – базальный горизонт, слой 2 (RF_1kl^2). Кварцевые, полевошпат-кварцевые гравелиты с частой плавающей галькой кварца; 3 – базальный горизонт, слой 1 (RF_1kl^1). Переслаивание кварцевых конгломератов с валунами до 30 см и полевошпат-кварцевых гравелитов; 4 – нижний архей, ниендинская свита (AR_1nn). Гнейсы графит-гранат-биотитовые, амфибол-биотитовые, плагиогнейсы; 5 – интрузивные породы (γAR_2). Граниты лейкократовые, крупнозернистые, розовато-белые; 6 – тектонические нарушения: а) установленные, б) предполагаемые по геологическим признакам; 7 – тектонические нарушения: а) предполагаемые по геофизическим данным, б) предполагаемые по данным дешифрирования аэрофотоснимков; 8 – литохимические ореолы аномальных концентраций урана (> x+3σ); 9 – пересечения руд с кондиционными параметрами

Для данных объектов характерны приуроченность оруденения к крупным тектоническим структурам непосредственно в зоне ССН, пространственная связь повышенных концентраций урана с графитсодержащими породами фундамента, интенсивное проявление околорудных гидротермально-метасоматических изменений (альбитизации, окварцевания, аргиллизации) [2]. Рудная минерализация представлена вторичными минералами урана, образующими прожилковые выделения. Проявления второй разновидности сосредоточены в Учурской зоне прогибов. К ним относятся проявления Конкули (см. рис. 7), Угдан (см. рис. 8) и аномальный участок Хангас-Муналы. Для данных объектов характерны приуроченность оруденения к крупным тектоническим структурам непосредственно в зоне ССН, пространственная связь повышенных концентраций урана с графитсодержащими породами фундамента, интенсивное проявление околорудных гидротермально-метасоматических изменений (альбитизации, окварцевания, аргиллизации) [2]. Рудная минерализация представлена вторичными минералами урана, образующими прожилковые выделения.

Проявления выделенной разновидности характеризуются комплексным характером руд – в пределах урановорудных зон установлены повышенные концентрации ванадия, молибдена, цинка, серебра. Возраст уранового оруденения 1185-1400 млн лет [2].

Отдельную разновидность представляют рудопроявления урана в платформенном чехле Адаргайского рудного узла, гипсометрически оторванные от поверхности ССН. Они в общем плане контролируются Улканским глубинным разломом и локализуются в однотипной литолого-структурной обстановке, на контакте конкулинской свиты кварцевых и олигомиктовых песчаников и адаргайской свиты переслаивающихся песчаников, алевролитов, доломитов и кремнисто-карбонатных пород. Вдоль контактов свит развиваются пологие тектонические нарушения, выполненные тектонической глиной, и интенсивные, многостадийные гидротермально-метасоматические изменения с проявлением на заключительном этапе кварц-гидрослюдистых метасоматитов. В зонах пологих разломов выявлены проявления урановой минерализации Адаргай (рис. 9), аэроаномалии № 355-1 и 18-1. Уран на данных объектах концентрируется в пелитовом веществе цемента песчаников и новообразованных минералах. Сведений о результатах определения абсолютного возраста в опубликованной и фондовой литературе на встречено.

Урановые объекты позднепротерозойского возраста в связи с зонами эйситизации в разломах фундамента представлены проявлением минерализации Капелька, находящимся западнее изучаемой площади. В геолого-структурном плане проявление расположено в пределах Луриканского блока архейского кристаллического фундамента, локализуясь в субмеридиональной Нучинской зоне глубинных разломов.

Вмещающими породами являются графитсодержащие мигматизированные биотитовые, биотит-пироксеновые, биотит-пироксен-амфиболовые гнейсы нючинской свиты.

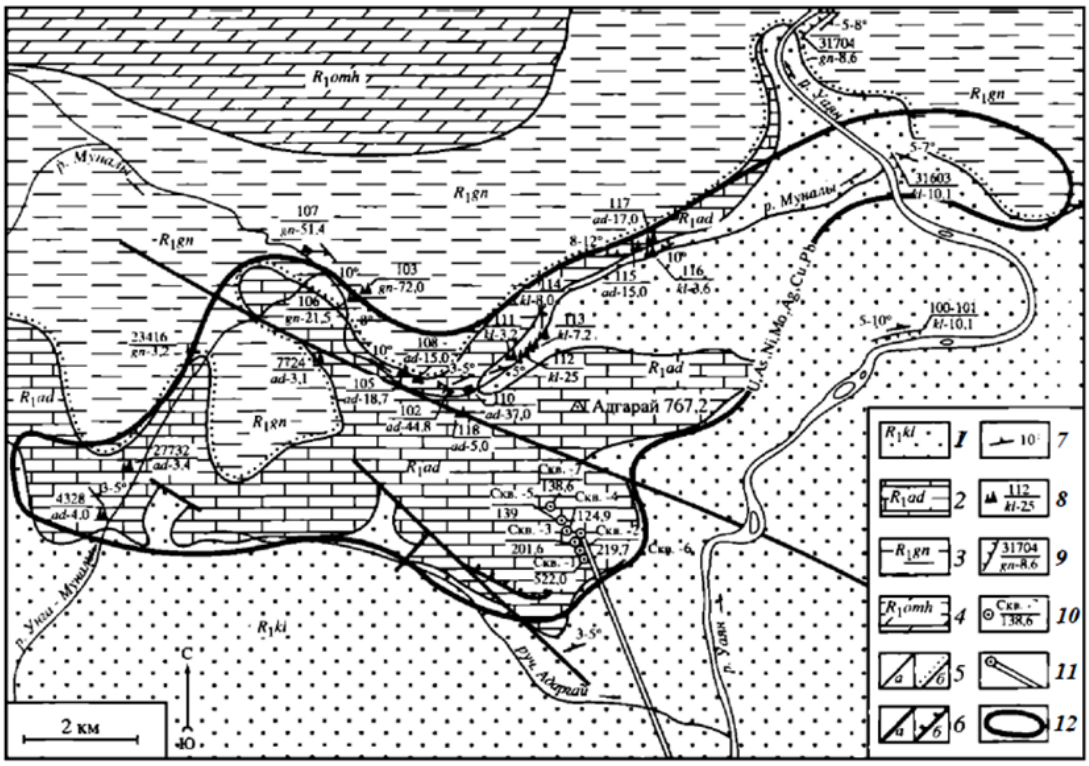


Рис. 9. Схематическая геологическая карта участка Адаргай
(по Карсакову, Гурьянову, Горошко, 2002).
1-4 – нижнерифейские осадочные образования: 1 – конкулинская свита *(*RF_1*kl),* 2 – адаргайская свита *(*RF_1*ad),* 3 – гонамская свита (RF_1gn), 4 – омахтинская свита (RF_1*omh),* 5 – геологические границы: *а* – согласные, *б* – несогласные; 6 – разрывные нарушения: *а* – с вертикальным падением сместителя, *б* – надвиги; 7 – элементы залегания слоистости пород; 8 – выходы коренных пород, в числителе – номер выхода, в знаменателе – индекс свиты и ее мощность в коренном залегании; 9 – выходы коренных пород значительной протяженности; 10 – буровые скважины, в числителе – их номера, в знаменателе – глубина скважин, м; 11 – линия сейсморазведочного профиля; 12 – комплексные ореолы рассеяния рудных элементов (U, Pb, Mo, Ag, Ni, Co, As, Cu, V) > x + 3σ

Рудовмещающие нарушения представлены зонами интенсивной трещиноватости, дробления, катаклаза и швами тектонических брекчий общей мощностью до 10 м. Участки тектонической проработки характеризуются интенсивной степенью метасоматических изменений (альбитизации, апатитизации, карбонатизации, хлоритизации и сульфидизации) с повышенными содержаниями урана. Урановая минерализация представлена редкой вкрапленностью зерен уранинита в агрегатах диопсида и пренит-графитовых выделениях; тонкие включения уранинита отмечены в пирите, пирротине и молибдените.

Урановое оруденение в связи с массивами ультраосновных и щелочных пород позднепротерозойского магматического цикла представлено радиоактивными проявлениями массива Арбарастах, расположенном западнее изучаемой площади, в пределах Идюмо-Хайканского блока нижнеархейских метаморфических пород, в узле пересечения Аимо-Токинского разлома с тектоническими нарушениями широтного и северо-западного направлений. В плане массив имеет округлую форму площадью около 38 км^2 с грубоконцентрическим строением. Он прорывает метаморфические породы арбарастахской свиты с образованием в них ореола фенитизированных пород мощностью до 1700 м.

Рудные зоны с аномальными концентрациями урана, тория, ниобия и тантала выявлены в центральной части Арбарастахской интрузии и на западном фланге массива. Установлена приуроченность аномальных содержаний урана и ниобия западной зоны к карбонатитам и альбитизированным породам. Руды в альбититах характеризуются более высокими содержаниями урана (до 0,28%) и ниобия (до 2,5%) по сравнению с рудами в карбонатитах.

Определения возраста уранового оруденения варьируют в интервале 609-797 млн лет [2].

Анализируя результаты предшествующих работ, проведенных в пределах Учурской зоны прогибов и Улканского прогиба, для данной территории был определен комплекс критериев выявления месторождений типа несогласия, а также прямых признаков ураноносности.

В числе важнейших критериев выделены следующие.

1) Наличие крупных региональных депрессий архейского фундамента.

2) Развитие в архейском фундаменте пачек графитовых гнейсов и кристаллических сланцев.

3) Признаки пенепленизации архейского фундамента (коры выветривания, по минеральному и химическому составу сходные с корами латеритного профиля). Широкое развитие платформенных отложений рифейского возраста, представленных в основном красноцветными олигомиктовыми песчаниками. Наличие признаков контроля предрудных процессов зонами предрифейского ССН.

4) Зоны крупных разломов древнего заложения, проявленные как в фундаменте, так и в породах платформенного чехла. Узлы пересечения минерализованных разломов преобладающей СЗ ориентировки с разломами иных направлений. Сопровождение разрывных нарушений дайками пород основного состава.

5) Низкотемпературный характер околорудных гидротермально-метасоматических изменений (формации аргиллизитов). Для околорудных изменений Учуро-Майской площади характерна аргиллизация гидрослюдистого типа с калиевым составом гидрослюд.

6) Моноэлементные и комплексные ореолы аномальных концентраций элементов-спутников урана. Приуроченность геохимических ореолов элементов-спутников урана к узлам пересечения разрывных структур.

7) Проявление урановой минерализации в фундаменте и чехле с возрастом 1400-1000 млн лет [2].

Поисковые признаки проявлений типа несогласия:

- ореолы аномальных концентраций урана по данным АГСМ (1:10 000);
- геологические и тектонические контакты пород фундамента и перекрывающих платформенных отложений;
- зоны интенсивной гидротермально-метасоматической проработки (аргиллизации);
- ореолы повышенных содержаний урана и его элементов-спутников по данным геохимической съемки;
- выявление рудной (урановой и сопутствующей) минерализации;
- аномалии повышенной гамма-активности по данным наземной и шпуровой гамма-съемки и гамма-спектрометрии;
- аномалии эманационно-трековой, ИПМ- и лито-геохимической съемки;
- зоны минимумов $\rho_к$ над минерализованными разломами фундамента, проявленные в тектонических контактах кристаллического фундамента с породами платформенного чехла, а также поля минимумов $\rho_к$ над графитсодержащими комплексами архея;
- линейные зоны минимумов естественного электрического поля, связанные с зонами и ореолами сульфидизации вдоль рудоносных разломов и в зонах ССН;
- аномалии минимумов магнитного поля над зонами и полями гидрослюдизации;
- аномалии максимумов магнитного поля над зонами даек, сопровождающих крупные разломы древнего заложения.

При анализе особенностей геологического строения Учуро-Майской впадины Сибирской платформы был выделен ряд структурно-тектонических позиций, сходных с аналогичными позициями района Атабаска Северо-Американской платформы.

К числу сходных особенностей (черт) относится возраст заложения сравниваемых региональных структурных единиц – рубеж раннего протерозоя и рифея. В обоих случаях до начала формирования рифейских отложений разнородный архей-раннепротерозойский фундамент впадин подвергся интенсивному выветриванию с образованием кор, сходных с современными латеритами.

Возобновление тектонических движений в протерозое и опускание вдоль крупных разломов блоков фундамента в пределах рассматриваемых структур привели к накоплению морских и аллювиальных отложений значительной мощности. Ранне- и позднепротерозойские платформенные отложения бассейна Атабаски представлены горизонтально залегающими

среднезернистыми кварцевыми песчаниками с маломощными базальными конгломератами в основании и редкими прослоями глинистых сланцев (формация Атабаска). Базальные конгломераты и нижние горизонты песчаников интенсивно гематитизированы. Наиболее молодые толщи бассейна Атабаска датируются средним рифеем.

Нижняя часть отложений фундамента Учуро-Майской впадины (улканская, уянская и учурская серии) красноцветная, с выдержанным горизонтом базальных ярко-вишневых конгломератов и гравелитов в основании; выше разрез меняется на сероцветный. Сероцветные отложения, как и в бассейне Атабаска, отличаются большей тонкозернистостью, для них типично присутствие доломитов и фосфоритоносных пород. В пределах Учуро-Майской впадины установлены сохранившиеся от эрозии верхнерифейские отложения [Горошко и др., 1999ф].

Отложения формации Атабаска прорываются серией даек диабазового состава северо-западного простирания. Возраст диабазов датируется в 1150 и 1000 млн лет. Рифейские отложения Учуро-Майской впадины также прорваны интрузиями и дайками пород основного состава. Возраст пород, определенный самарий-неодимовым методом, 942±19 млн лет [2].

Сходные позиции уранового оруденения в пределах выделенных участков Учуро-Майской впадины и впадины Атабаска представляются следующим образом.

1) На месторождениях района Атабаска урановое оруденение приурочено к крутопадающим разломам фундамента вблизи поверхности структурно-стратиграфического несогласия. На некоторых крупных месторождениях (Сигар-Лейк, Макклин и др.) отдельные рудные тела оторваны от поверхности несогласия, локализованы в пределах зон крутопадающих разрывных структур в чехле, и в ряде случаев проявлены на земной поверхности. На урановых проявлениях Учуро-Майской впадины отмечена аналогичная приуроченность оруденения к зоне структурно-стратиграфического несогласия, локализация оруденения в крутопадающих разломах фундамента, и проявление в виде малоинтенсивных ореолов в перекрывающих красноцветных олигомиктовых песчаниках. На рудопроявлении Топорикан оруденение в основном проявлено в песчаниках, в меньшей мере прослежено в перекрывающих вулканитах и в образованиях фундамента. На участке Адаргай оруденение оторвано от поверхности ССН и локализовано в тектонической зоне на контакте конкулинской и адаргайской свит платформенного чехла, однако масштабные ореолы гидротермально-метасоматических изменений позволяют предполагать наличие промышленного оруденения на глубине [Горошко и др., 2001ф].

2) Общепринято, что формирование уранового оруденения канадских месторождений обусловлено наличием в фундаменте восстановителей в виде графитистых или пиритоносных пород в комплексе с системами

разломов или трещинных зон, пересекающих поверхность несогласия. В выделенных проявлениях Учуро-Майской впадины также отмечен контроль оруденения зонами графитизации в породах фундамента и крупными разломами, проникающими в чехол. На рудопроявлении Конкули это широтные и север-северо-западные зоны разломов и графитизации, на рудопроявлениях Угдан и Топорикан – северо-западные и север-северо-восточные разрывные структуры [Горошко и др., 2001ф].

3) Характерным для канадских месторождений типа «несогласия» является сопровождение урановорудных тел комплексными геохимическими ореолами с нетипичными для других типов гидротермальных урановых месторождений элементами-спутниками (никель, кобальт, ванадий, золото, медь и др.). В рудных телах и ореолах на участках Конкули, Адаргай, Топорикан в аномальных количествах обнаружены ванадий, молибден, свинец, цинк, медь, мышьяк, золото, серебро, никель, барий. На участке Конкули содержания ванадия достигают промышленных концентраций; на участке Топорикан урановые рудные тела сопровождаются высокими содержаниями молибдена.

4) Для урановых месторождений района Атабаска типичны низкотемпературные гидротермальные изменения: аргиллизация, серицитизация, хлоритизация, окремнение. Для участков Учуро-Майской впадины наиболее характерна аргиллизация гидрослюдистого типа с калиевым составом гидрослюд.

5) Изотопные возрасты урановых руд «несогласия» провинции Атабаска 1650–1600, 1350–1150 и 1050–900 млн лет; они отвечают как завершению процессов формирования основной массы богатого оруденения, так и эпохам активизационной регенерации руд [2,4]. Абсолютный возраст уранового оруденения проявления Топорикан 1236±20 млн лет, возраст гидрослюд из метасоматитов – 1210-1164 млн лет [2]. На проявлении Конкули возраст оруденения 1300 ± 50 млн лет [2].

Положение месторождений района Атабаска и проявлений урана юго-западной зоны Учуро-Майского прогиба относительно поверхности ССН показано на рис. 10.

Схематический геологический разрез с радиологическим возрастом уранового оруденения показан на рис. 11.

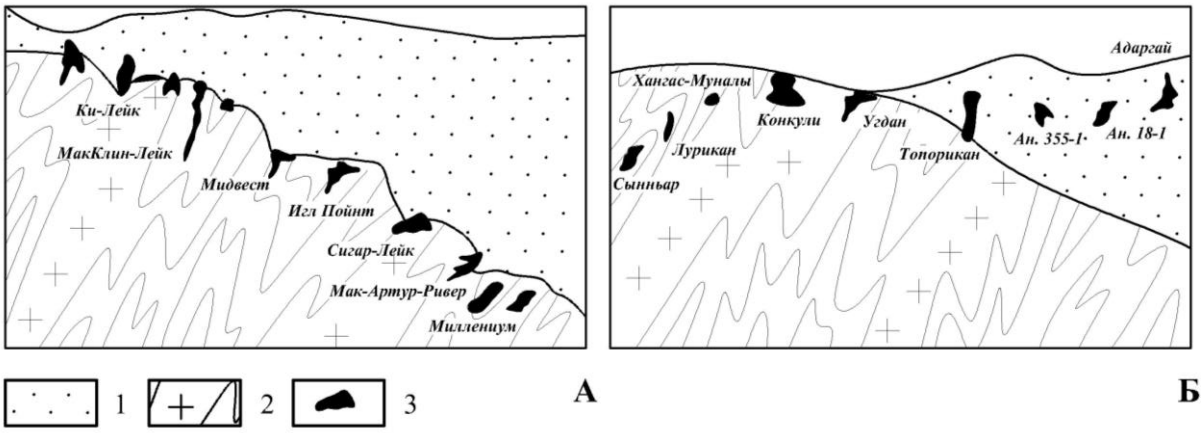


Рис. 10. Положение урановых месторождений района Атабаска (А, по Тарханову А.В., Бугриевой Е.П., 2010) и проявлений урана юго-западной границы Учуро-Майского прогиба (Б) относительно поверхности ССН.
1 – осадочные образования чехла, 2 – породы фундамента; 3 – урановорудные объекты

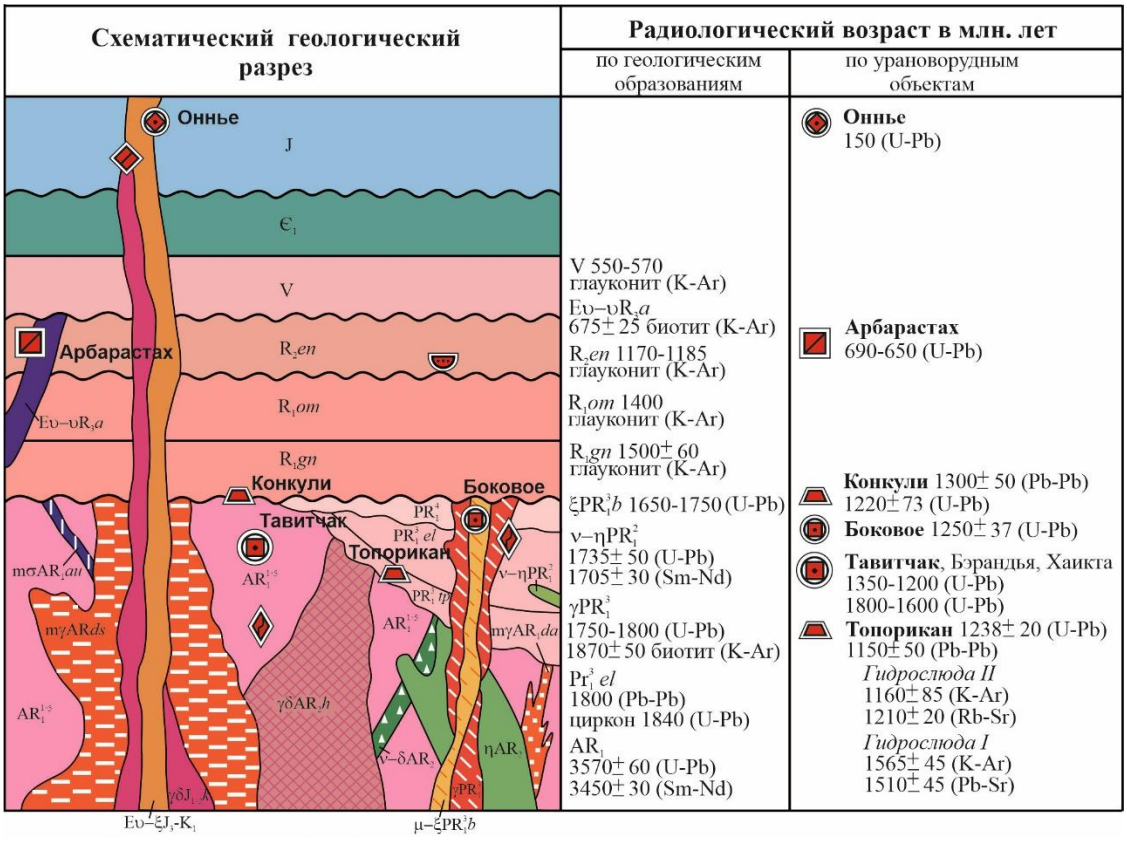


Рис. 11. Схематический геологический разрез Восточно-Алданского района с положением урановорудных объектов (А.М. Коршунов, Н.Н. Румянцев, 2004)

Заключение

В пределах контура исследуемой территории по сформулированному комплексу поисковых критериев и признаков для первоочередного изучения рекомендованы следующие участки: 1. Конкулинский; 2. Угданский; 3. Адаргайский; 4. Топориканский. Следует подчеркнуть, что при постановке поисковых работ в пределах Топориканского участка особое внимание рекомендуется уделить изучению ураноносности предраннерифейской зоны ССН севернее собственно рудопроявления Топорикан, т.к. именно эта зона отвечает условию наложения рудолокализующей толщи рифейского возраста на высоко радиогеохимически специализированные отложения раннего протерозоя.

Выделенные проявления характеризуются структурно-тектоническими, литолого-фациальными, геохимическими, гидротермально-метасоматическими и геохронологическими признаками, аналогичными признакам уранового оруденения провинции Атабаска и перспективны на выявление промышленных месторождений «типа несогласия» с возрастом оруденения 1350-1200 млн лет.

Литература

1. Горошко М.В., Гильманова Г.З. Литолого-структурные условия локализации рудных месторождений Учуро-Майской мезо-неопротерозойской впадины (Сибирская платформа). Тихоокеанская геология, 2013, том 32, № 4, с. 52-67.

2. Горошко М.В., Малышев Ю.Ф., Кириллов В.Е. Металлогения урана Дальнего Востока России. Ин-т тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН. – М.: Наука, 2006. – 372 с.

3. Дымович В.А., Васькин А.Ф., Опалихина Е.С., Кисляков С.Г. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Дальневосточная. Лист О-53 – Нелькан. Объяснительная записка. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2012 г. 364 с. + 2 вкл.

4. Лаверов Н.П., Смилкстын А.О., Шумилин М.В. Зарубежные месторождения урана. М.: Недра. 1983. 320 с.

5. Молчанов А.В. Металлогения урана Алданского и Анабарского щита. Автореферат на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук, Л., ВСЕГЕИ, 2004.

6. Молчанов А.В., Толстов А.В., Ефимов С.А. Металлогения урана древних щитов // Проблемы прогнозирования, поисков и изучения месторождений полезных ископаемых на пороге XXI века. Материалы региональной научно-практической конференции «Актуальные проблемы геологической отрасли АК «АЛРОСА» и научно-методическое обеспечение их решений, посвященной 35-летию ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА». 2003, Воронежский ГУ. С. 666-675.

ГЕОЛОГИЯ И ГЕНЕЗИС УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

ГЕОЛОГИЯ СТРАТЕГИЧЕСКИХ ВИДОВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ В ПРОГРАММЕ ПОДГОТОВКИ МАГИСТРАНТОВ

А.А. Верчеба, П.А. Игнатов
МГРИ, г. Москва

В целях воспроизводства минерально-сырьевой базы твердых полезных ископаемых, в том числе их стратегических видов в 2021 году за счет средств федерального бюджета в Российской Федерации проводилось геологическое изучение недр и геологоразведочные работы на почти 100 видов полезных ископаемых.

Экономическое значение МСБ стратегических видов полезных ископаемых определяется как геологическими, природными факторами, так и сложностью геотехнологии разработки и глубокой переработки минерального сырья, развитием инфраструктуры районов добычи полезных ископаемых и конъюнктурой цен сырья на мировом рынке. Особое место в МСБ России занимают энергоносители, к важнейшим из которых относятся добываемые из недр уголь, нефть, газ и уран [1, 2].

Минерально-сырьевая безопасность нашей страны во многом определяется состоянием и развитием именно энергетических отраслей материального производства. Энергетический баланс в мире выглядит следующим образом: уголь 28%, нефть 31%, газ 22%, на другие источники приходится 18%.

Сравнительное экономическое значение энергоносителей определяется стоимостью их ресурсов, разведанных на территории России, по информации Минприроды РФ оцененных в (трлн рублей): нефть – 74,5; газ – 14,1; уран – 3,9, коксующийся уголь более 2,0.

В мире с 1945 года было произведено около 3000 тыс. тонн урана. Запасы российского урана по стоимостной категории 130 $/kg составляют 414 тыс. тонн, а мировые запасы 6142 тыс. тонн. При мировой добыче 54 тыс. U_3O_8 в год потребность превышает 65 тыс. тонн. В России добыча урана существенно ниже потребностей ядерной энергетики.

После распада СССР в РФ начался резкий спад работ по разведке и добыче и переработке урановых руд. Прекратилась и целенаправленная подготовка специалистов для ядерной отрасли в связи с сокращением специальностей подготовки горных инженеров. Хотя по запасам урана и тория в недрах Россия занимает третье место в мире (после Австралии и Казахстана), по качеству запасов уступает всем его ведущим производителям.

Есть ли решение проблемы истощения запасов урана для обеспечения экономической и минерально-сырьевой безопасности России? Где именно с расчетом на перспективу нужно вести опережающие поисковые и разведочные работы, требующие существенных финансовых вложений?

На период 2022 г. планируется проведение ГРР на ТПИ за счёт средств федерального бюджета на сумму 5,2 млрд. руб. ежегодно. Работы будут направлены на стратегические и ликвидные виды ТПИ, в том числе в пределах

приоритетных территорий опережающего развития РФ. Прогнозируется прирост прогнозных ресурсов категории P_1+P_2: золота – 267 т, урана – 15 тыс. т, меди – 790 тыс. т, свинца – 930 тыс. т, цинка – 2170 тыс. т [3].

На ближайшее время предусмотрено наращивание минерально-сырьевой базы урана за счёт увеличения инвестиционной привлекательности горных и геологоразведочных работ всех стадий, роста качества прогнозирования и поисков новых месторождений, повышения эффективности освоения известных, в том числе неразрабатываемых, месторождений путём внедрения современных технологий переработки, обогащения и комплексного извлечения полезных компонентов, и в целом повышение уровня геологической изученности страны. Это потребует изменений в развитии образовательных траекторий высшего геологического образования в России и формирования отраслевой системы непрерывного геологического образования на базе создания специализированных базовых кафедр и центров компетенций при вузах, научно-исследовательских и производственных организациях.

В геологическом образовании также произошли изменения и в 2020 году Минобрнауки России был утвержден Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования (ФГОС ВО-2020) по направлению подготовки Прикладная геология, являющийся ориентиром формирования высококвалифицированных кадров для воспроизводства, развития и использования минерально-сырьевой базы страны на длительный период.

Например, по Прикладной геологии подготовка специалистов будет осуществляться по следующим специализациям выпускников:

- геологическая съемка, поиски и разведка месторождений твердых полезных ископаемых;
- разведка и оценка стратегических видов полезных ископаемых;
- прикладная геохимия, минералогия и геммология.

К сожалению, в ФГОС ВО-2020 не нашлось места программам по подготовке геологов по разведке руд редких и радиоактивных элементов. Это является, по моему оценочному мнению, причиной того, что за последние 20 лет с момента упразднения специальностей подготовки геологов в рудной геологии наблюдается сокращение поискового задела и истощение запасов стратегических видов минерального сырья.

Учитывая исторический опыт создания минерально-сырьевой базы урана в нашей стране и объективную роль в этом созидательном процессе советского инженерного геологического образования, актуально возродить подготовку инженеров-уранщиков в российских вузах [2].

Решение проблемы состояло в создании учебно-научных кластеров на базе университетов и ведущих предприятий отрасли.

Подготовка магистров по направлению «Геология» – профиль «Геология месторождений радиоактивного сырья» проводится с использованием материальной и научно-методической базы «Урановой геологии» в Томском политехническом университете в основном для предприятий «Казатома».

Как пилотный проект была создана базовая кафедра комплексной оценки месторождений в ведущем отраслевом научно-исследовательском институте ФГБУ «ВИМС» по подготовке и переподготовке обучающихся, в том числе для урановой геологии. Базовая кафедра реализует двухлетнюю магистерскую программу «Геология месторождений стратегических видов полезных ископаемых», которая прошла государственную аккредитацию в 2020 г. Ежегодно по программе обучаются 6-8 магистрантов, в том числе из иностранных государств, что подтверждает востребованность подготовки специалистов данной сферы. Хотя очевидно, что за два года невозможно подготовить профессионального геолога, тем более что на магистерскую программу «Геология» поступают бакалавры непрофильных направлений подготовки, не имеющие представления о геологии.

В образовательные программы полноценной инженерной подготовки уранщиков следует включить дисциплины по развитию навыков выявления слабопроявленного уранового оруденения с применением инновационных методик комплексного геофизического картирования с выделением урансодержащих метасоматитов, минералогического картирования на основе рентгенофазового анализа, использования аэро-гаммаспектрометрических и радиоизотопных методов, в том числе изотопно-почвенного метода, разработанного в ВИМС.

Так, на решение этих проблем направлены новые образовательные программы высшего образования по прикладной геологии, разработанные в МГРИ, составленные на основании федерального государственного стандарта высшего образования в 2021 г. – специалитет по направлению подготовки 21.05.02 Прикладная геология предусматривает организацию обучения по специализации «Разведка и оценка стратегических видов полезных ископаемых» с привлечением научно-технических работников базовых кафедр отраслевых и академических организаций**.**

Перспективы наращивания минерально-сырьевой базы энергоносителей, в том числе урана, и создание условий для обеспечения страны энергетическим сырьем должны быть увязаны с кадровой обеспеченностью отрасли совместными усилиями организаций высшего образования, академических, отраслевых институтов, недропользователей в системе подготовки специалистов-геологов.

Литература

1. Верчеба А.А., Рихванов Л.П., Язиков Е.Г. Урановая геология и её кадровый потенциал. Материалы Четвертого международного симпозиума «Уран: геология, ресурсы, производство» 28-30 ноября 2017 г. М.: ФГБУ «ВИМС», 2017, 121 с. ISBN 978-5-9500949-6-5. С. 18-20.

2. Геология будущего. Геологическая отрасль Российской Федерации к началу 2050-х годов. Информационно-аналитические материалы. М.: АО «Росгеология», 2017. 84 с.

3. Итоги работы федерального агентства по недропользованию в 2019 году. // Информационно-аналитические материалы. М.: Минприроды. 2020. – 56 с.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СВЯЗЬ ПОЗДНЕДОКЕМБРИЙСКИХ УРАНОВОРУДНЫХ ОБЪЕКТОВ С БАЗИТОВЫМ МАГМАТИЗМОМ ЮЖНОЙ ГРАНИЦЫ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Н.А. Гребёнкин, Е.Н. Карманов, Н.В. Леденёва, С.И. Мельников
ФГБУ «ВИМС», г. Москва

Известно, что большинство крупных месторождений урана гидротермального генезиса сформированы в пределах геоблоков, сложенных породами, специализированными на этот металл и являющимися его источником на этапе рудообразования. В то же время остается дискуссионным вопрос пространственно-временной связи уранового оруденения с магматизмом, в т. ч. и на месторождениях типа «несогласия», отличающихся богатыми рудами. Для месторождений этого типа, развитых как во впадине Атабаска (Канада), так и в районе Аллигейтор-Риверс (северная Австралия), характерны тела базитового магматизма. На территории России одной из перспективных на выявление месторождений типа «несогласия» является граница юга Сибирской платформы с Саяно-Байкальской складчатой областью, где также установлена пространственная связь рифейских урановых руд и тел базитов. Эта граница объединяет ряд потенциальных урановорудных районов (ПУРР) – Присаянский, Акитканский, Тонодский и Чарский (рис. 1).

Присаянский ПУРР в геотектоническом плане занимает юго-западный край платформы в области сопряжения двух основных её сегментов, разделенных зоной Присаянского глубинного разлома: Присаянского выступа во фронтальной части и собственно Сибирской плиты с мощным покровом отложений чехла в тыловой. В пределах выступа в роли ядерных структур, сложенных архейской кварцит-карбонатно-амфиболит-сланцевой толщей, выделяются: Булунский и Мангатгольский блоки и Бирюсинская глыба. Блоки разделены Урикско-Туманшетским прогибом, выполненным углеродсодержащей карбонатно-терригенно-вулканогенной толщей карельского возраста. Его северо-западная половина осложнена наложенным Присаянским краевым прогибом с терригенно-карбонатными осадками средне-верхнерифейского возраста. В юго-восточной части он осложнен узким линейным Урикско-Ийским грабеном, осевая часть которого выполнена молассоидами протоплатформенного чехла нижнего рифея. С северо-востока образования Присаянского выступа перекрыты венд-фанерозойскими терригенно-карбонатными отложениями платформенного чехла.

С нижне- и верхнерифейским этапами тектоно-магматической активизации (ТМА), маркируемыми широко развитыми дайками и силлами габброидов, традиционно связывается проявление гидротермальной урановой минерализации в структурах

кристаллического цоколя и нижнерифейских песчано-конгломератовых отложениях протоплатформенного чехла (рис. 2). К настоящему времени в Присаянье выявлено более девяти десятков урановых объектов, в том числе два малых месторождения, Столбовое и Ансах, относимые к геолого-промышленному типу «несогласия».

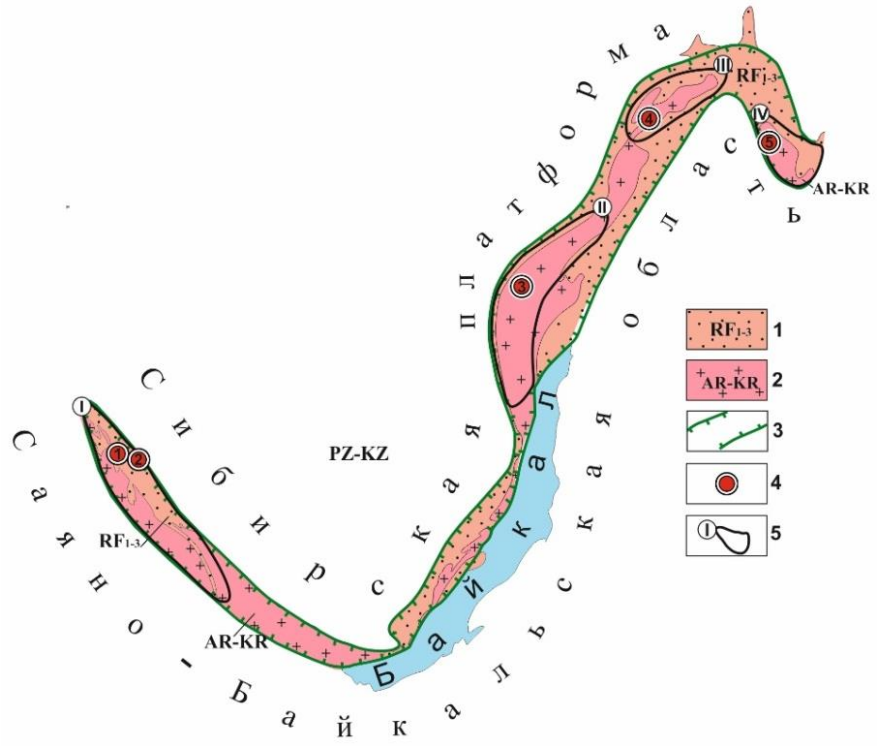


Рис. 1. Схема размещения позднедокембрийских гидротермальных месторождений урана в пределах южной границы Сибирской платформы [11, с изменениями].
1 – осадочные породы чехла (RF_{1-3}); 2 – гранит-метаморфические и вулканические образования фундамента (AR-KR); 3 – области проявления рифейского магматизма основного состава; 4 – месторождения урана: Столбовое (1), Ансах (2), Безымянное (3), Туюкан (4), Чепок (5); 5 – потенциально урановорудные районы (ПУРР): I – Присаянский, II – Акитканский, III – Тонодский, IV – Чарский

Работы последних лет, проведенные на месторождении Столбовое, подтвердили существование генетической взаимосвязи рифейских базитов с рудно-метасоматическими образованиями и позволили убедиться в их полихронном формировании, происходившем в два этапа – ранне- и позднерифейском. В геологическом строении рудного поля месторождения Столбовое выделяется два структурных этажа – гранит-метаморфический фундамент и перекрывающий его субплатформенный чехол, сложенный средне-верхнерифейскими гравелитистыми песчаниками шангулежской свиты с конгломератами и гравелитами в основании.

Гранит-метаморфический фундамент насыщен многочисленными протяженными дайками базитов, для которых характерно как крутопадающее, так и пологое залегание. В породах чехла развиты силлы габбро-долеритов (рис. 3). Все тела выделяются в магнитном поле. Развитые

на площади базиты до недавнего времени рассматривались в составе единого нерсинского комплекса, несмотря на их различное временное положение в разрезе по отношению к породам проточехла (рис. 4).

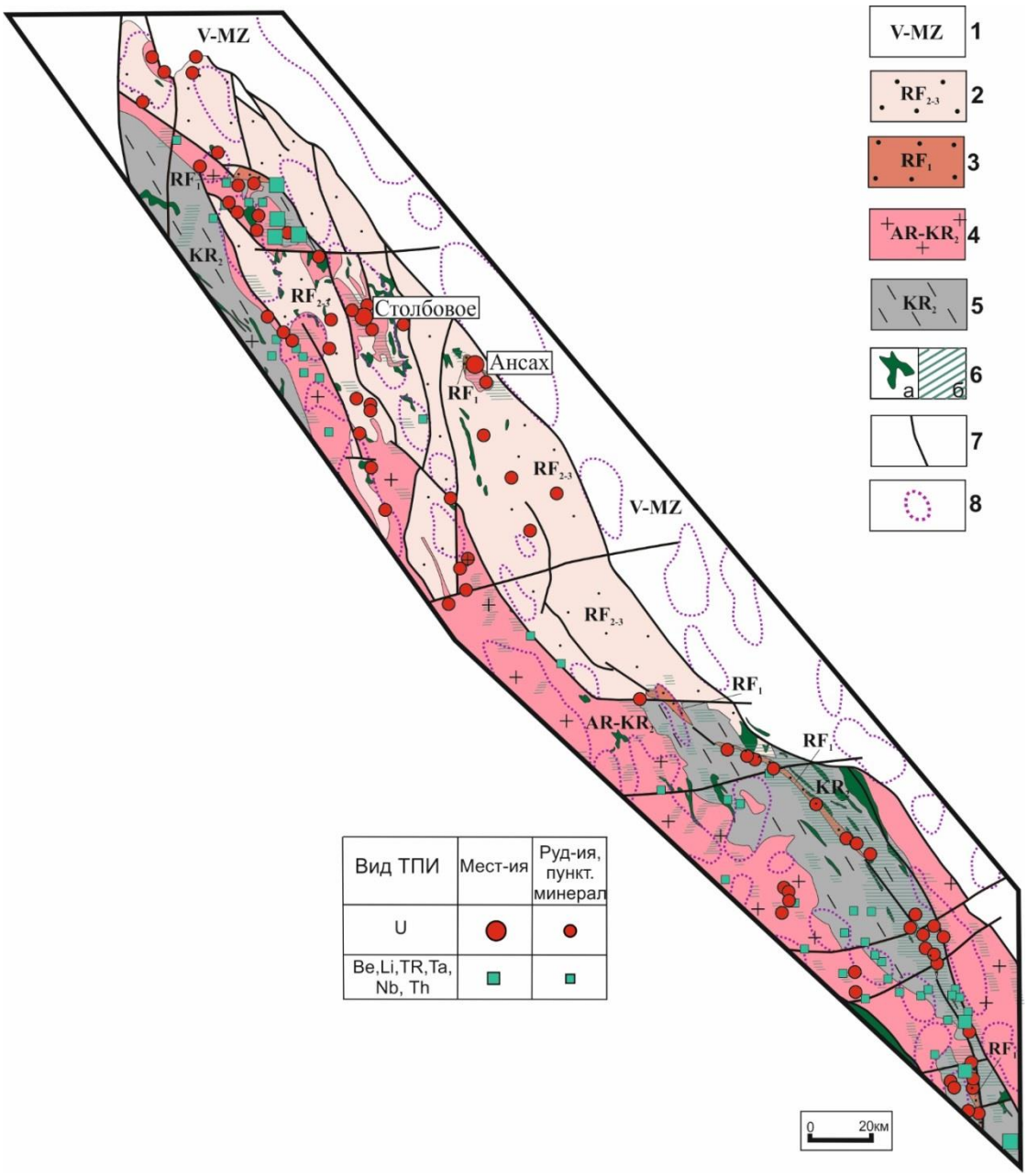


Рис. 2. Положение позднедокембрийских гидротермальных месторождений и проявлений урана на геологической схеме Присаянского ПУРР [3, с изменениями]. 1 – нерасчлененные осадочные отложения (V-MZ); 2 – терригенно-карбонатные отложения карагасской и оселковой серий (RF_{2-3}); 3 – метаконгломераты и метапесчаники ермосохинской свиты (RF_1); 4 – нерасчлененные гранитизированные породы ($AR-KR_2$); 5 – метаморфиты сублукской серии (KR_2); 6 – массивы и силлы основного состава протерозойского возраста (а), а также области скопления базитовых даек (б); 7 – главные разломы; 8 – гранито-гнейсовые купола

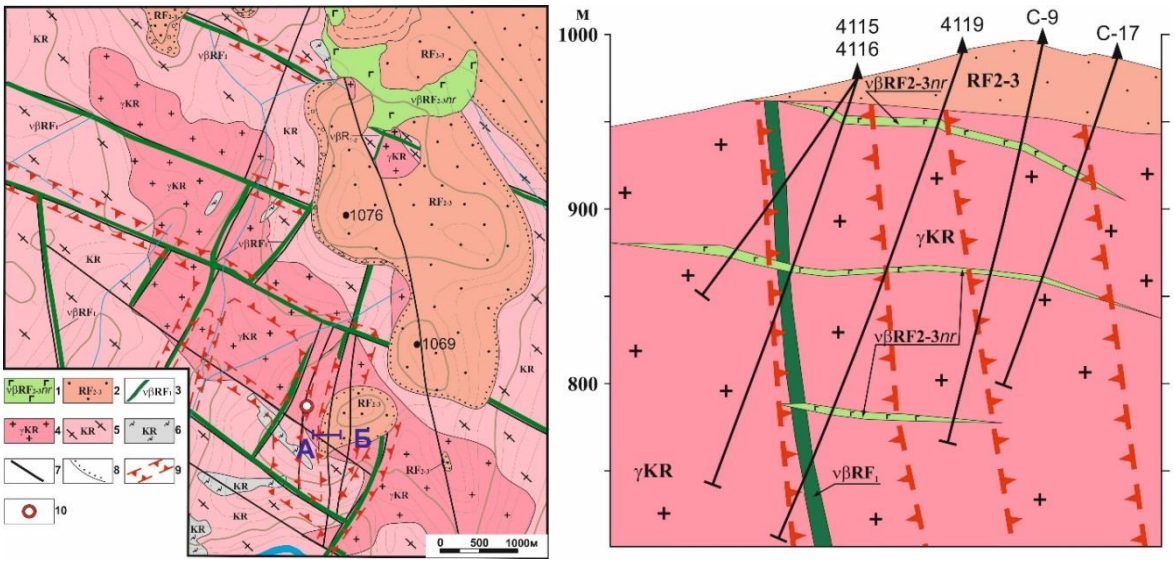


Рис. 3. Месторождение Столбовое. Схематическая геологическая карта [9, с изменениями] и разрез по линии А – Б.

1 – базиты нерсинского комплекса (RF_{2-3}); 2 – гравелитистые песчаники шангулежской свиты (RF_{2-3}); 3 – базиты «дошангулежского» комплекса ($RF_{1?}$); 4, 5 – гранитоиды саянского комплекса (KR): 4 – массивные, 5 – гнейсо-граниты; 6 – кристаллосланцы сублукской серии (KR), 7 – разрывные нарушения; 8 – граница ССН; 9 – потенциально урановосные и урановорудные зоны в фундаменте; 10 – условный центр месторождения Столбовое

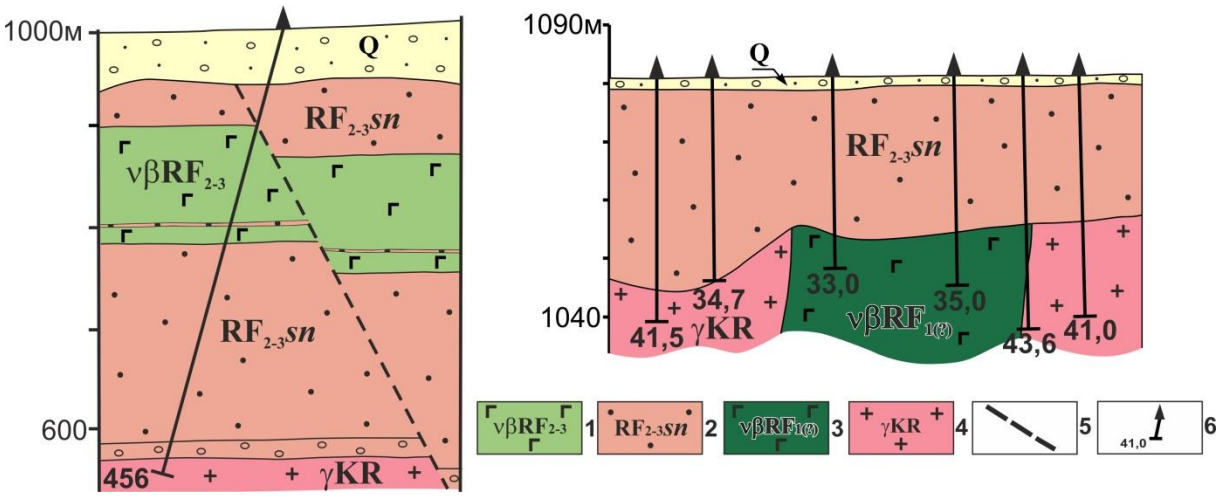


Рис. 4. Характер залегания и временные соотношения базитовых интрузий с вмещающими породами на месторождении Столбовое (по Митрофанову Е.А. и др., 2004).

1 – базиты нерсинского комплекса (RF_{2-3}); 2 – гравелистые песчаники шангулежской свиты (RF_{2-3}); 3 – базиты «дошагулежского» комплекса ($RF_{1?}$); 4 – гранитоиды саянского комплекса (KR); 5 – разрывные нарушения; 6 – глубина скважин

В последнее время преобладает точка зрения, что на рассматриваемой территории по совокупности признаков развиты, по меньшей мере, два комплекса базитов, здесь и далее по тексту поименованные как «дошангулежский» – раннерифейский (?) и собственно

нерсинский, геологический и радиологический возраста которого достоверно определены. Образования нерсинского комплекса прорывают отложения карагасской серии и не встречаются в отложениях оселковой серии, охарактеризованных по органическим остаткам как позднерифейские (Галимова Т.Ф. и др. Объяснит. зап. к листу N-47, ВСЕГЕИ, 2012). В этой же работе, ссылаясь на Д.П. Гладкочуба и др., указан абсолютный возраст нерсинского комплекса – 760–740 млн лет.

По условиям залегания базитовые дайки «дошангулежского» комплекса имеют крутое падение. Базиты нерсинского комплекса образуют пологозалегающие тела в фундаменте и силлы среди осадочных пород чехла. По внешнему облику, структурно-текстурным особенностям, петрографическому составу эти породы схожи между собой. Незначительные различия проявляются в их петрохимическом составе, что обусловлено повышенным количеством Na в базитах нерсинского комплекса. Базиты с повышенной щелочностью натриевой специализации установлены также на прилегающем с севера участке Пихтовый. Генезис установленных пород соответствует геодинамической обстановке внутриплитного магматизма (рис. 5, 6).

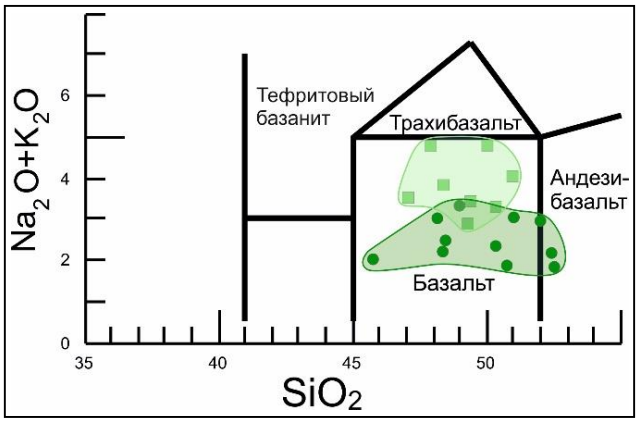


Рис. 5. Классификационная TAS диаграмма (Na_2O+K_2O)-SiO_2 [12]

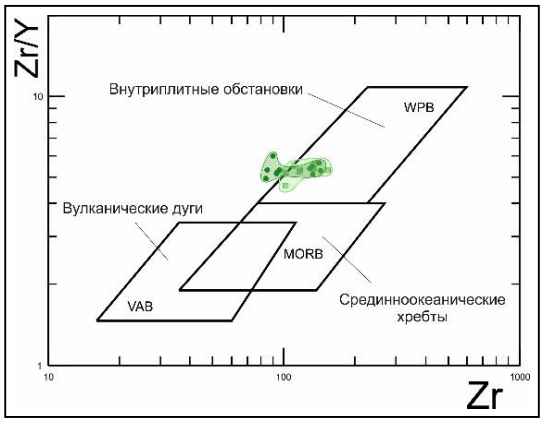


Рис. 6. Классификационная диаграмма Zr/Y-Zr [15]

Основная часть выявленной на Шангулежской площади урановой минерализации, включая механические развалы глыб оруденелых пород с содержаниями урана 2-3% и более, связана с крутопадающими тектоно-метасоматическими зонами субмеридионального и северо-западного направлений, тяготея в разрезе к «предшангулежскому несогласию». Основным эпигенетическим изменением пород, проявленным в урановорудных зонах, является развитие светлых тонкочешуйчатых слюд, образующих околорудные ореолы серицитизации. Оруденение внутри ореолов локализуется в сериях прожилков халцедоновидного кварца и сопровождается скоплениями пирита, реже сульфидами Cu, Pb и Zn. Одним из элементов зон являются субвулканические тела основного состава, в которых встречаются участки с наложенной урановой минерализацией и

березитовидными метасоматитами. Это предопределило необходимость не только установления геологического возраста тел базитов, последовательности их внедрения, но и их роли в рудообразующих процессах. С этой целью проводилось изучение минерального состава околорудных метасоматитов методом Vis-NIR-SWIR спектроскопии по образцам из керна месторождения Столбовое; в результате было выделено два типа метасоматитов – березитов и гидрослюдизитов [5].

Для березитов характерными минералами являются тонкие калиевые слюды – фенгит и мусковит, железистый хлорит и карбонаты – доломит и сидерит. Для второго типа – гидрослюдизитов – характерны иллиты фенгитового и мусковитового составов, монтмориллонит, наряду с которыми развиты натриевые разновидности – парагонит, парагонит-иллит, нонтронит, а также железисто-магнезиальный и магнезиальный хлорит, анкерит, реже кальцит.

Метасоматиты первого типа развиты в виде широких ореолов, объединяющих сближенные рудоносные зоны, и нередко тяготеют к крутопадающим дайкам долеритов «дошангулежского» комплекса. Метасоматиты второго типа проявлены более локально, образуя маломощные ореолы на фоне березитовых изменений, концентрируясь вблизи пологопадающих даек и силлов нерсинского комплекса. Присутствие в них натриевых слюд, иллита и смектита указывает на связь метасоматитов с базитовым магматизмом второго этапа ТМА, также имеющим щелочную натриевую специализацию (рис. 7).

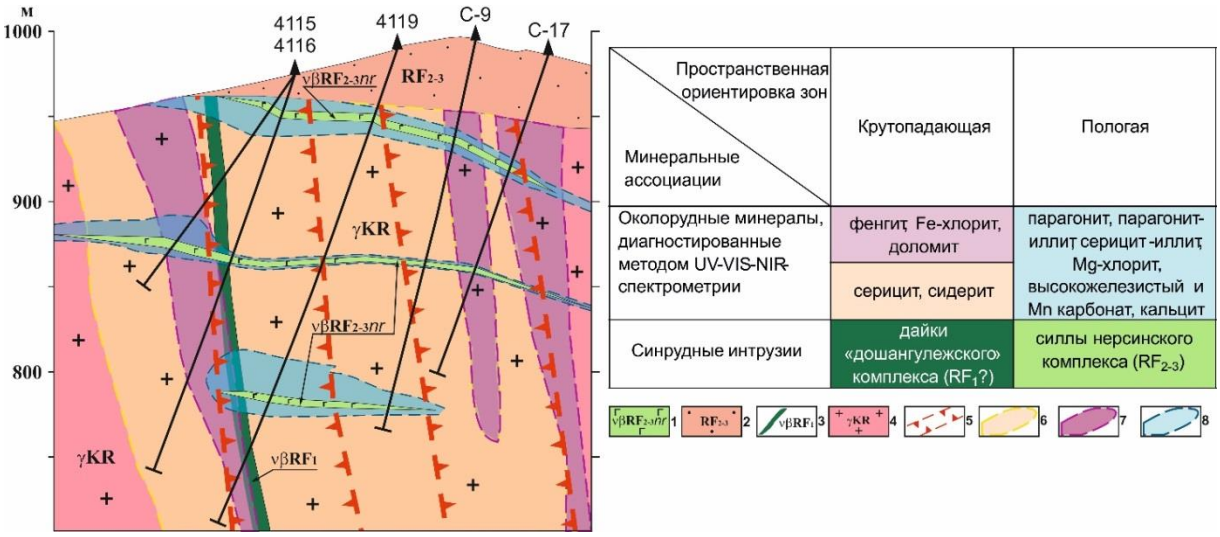


Рис. 7. Схема пространственного распределения
гидротермально-метасоматических изменений горных пород.
1 – базиты нерсинского комплекса (RF_{2-3}); 2 – гравелистые песчаники шангулежской свиты (RF_{2-3}); 3 – базиты «дошангулежского» комплекса ($RF_{1?}$); 4 – гранитоиды массивные саянского комплекса (KR); 5 – урановорудные зоны; 6-8 – минеральные ассоциации: 6 – мусковит, сидерит; 7 – фенгит, Fe-хлорит, доломит; 8 – парагонит-иллит, монтмориллонит, Mg-хлорит, Mn-кальцит

Урановая минерализация на месторождении Столбовое представлена настураном и коффинитом. Главным, наиболее распространенным на месторождении урановым минералом является настуран, наблюдающийся в виде колломорфных прожилковидных выделений или почковидных, образующих рассеянные и гнездово-вкрапленные скопления в прожилково-брекчиевых и прожилково-метасоматических зонках пирит-криптокварцевого состава (рис. 8). Серии сближенных зонок формируют рудоносные зоны с единым ореолом березитовых изменений. Радиологический возраст настурана, полученный термоизохронным Pb-Pb методом, составил 1350 млн лет (ФГБУ «ВИМС», аналитик Сумин Л.В), а U-Pb методом – 1313±23 млн лет (ИГЕМ РАН, аналитик Голубев В.Н.), что отвечает границе нижнего-среднего рифея.

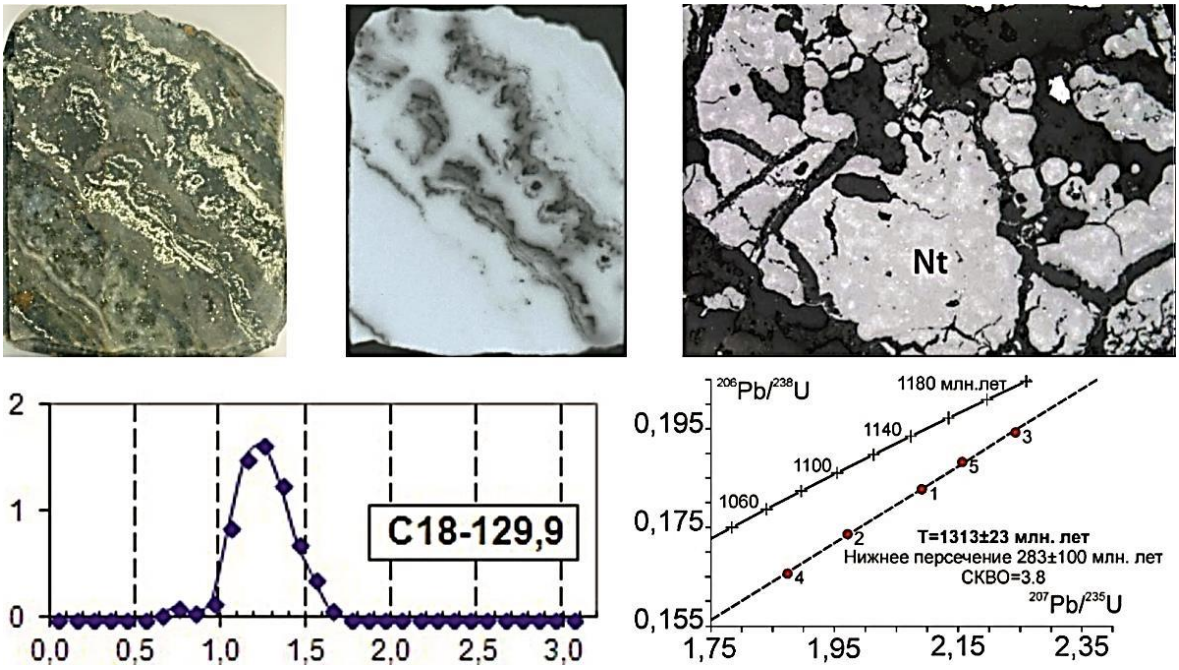


Рис. 8. Колломорфные выделения настурана в срастании с пиритом в зальбандах криптокварцевого прожилка. Фото образца в натуральную величину и радиографии с экспоз. 18 час. На фото справа – скопления почек настурана (Nt) в криптокварце (РСМА). На фото внизу – результаты определения абсолютного возраста настурана, полученные Pb-Pb- и U-Pb методами

Коффинит распространен менее широко. Он появляется только там, где метасоматиты второго типа телескопированы на рудные зоны с оксидом урана. В тех случаях, когда гидрослюдистые метасоматиты имеют самостоятельное развитие и не наследуют урановорудные зоны I этапа, они безрудны. Это свидетельствует о том, что гидротермально-метасоматические образования второго этапа не являются рудогенерирующими, а способствуют лишь частичному переотложению оксидноурановой минерализации с образованием коффинита. Коффинит обычно отлагается в краевых частях выделений настурана, частично его

корродируя, реже образует микропрожилки и вкрапленность в кварце, часто ассоциируя с марказитом, галенитом, сфалеритом, халькопиритом и арсенопиритом, а также флюоритом. Радиологический возраст коффинита, измеренный термоизохронным Pb-Pb методом, составил около 750 млн лет (ФГБУ «ВИМС», аналитик Сумин Л.В).

В рудно-метасоматических образованиях относительно вмещающих пород отмечается концентрация следующих элементов: U, As, W, Y, Mo, V, Co, Ni, Cr, Pb, Bi, Zn, Se, Cu. Наличие таких элементов как Co, Ni, V, Cr может косвенно указывать на участие в урановорудном процессе флюидов, связанных с базитовым магматизмом.

Схожие по составу изменения наблюдались в Урикско-Ийском грабене на рудопроявлении Ильмигинское в нижнерифейских метаконгломератах с браннерит-настурановой минерализацией. Здесь в одной из рудоносных гидротермально-метасоматических зон, в составе которых главная минерализация также представлена криптокварцем, серицит-гидрослюдистыми агрегатами, железистым хлоритом и карбонатами, измеренный термоизохронным Pb-Pb методом радиологический возраст настурана составил 1,35 млрд лет, что соответствует основному, продуктивному этапу уранового рудообразования в Восточном Присаянье. Как и на месторождении Столбовое, отдельные оруденелые зоны с серицит-гидрослюдистыми изменениями приурочены к крутопадающим значительно измененным дайкам основного состава.

Акитканский ПУРР расположен в пределах одноименного вулканогенного пояса, сформировавшегося в раннем карелии и принадлежащего Чуйскому геоблоку Байкало-Патомской складчатой области (рис. 9). Его границами считаются скрытые региональные разломы восток-северо-восточного простирания – Акиткано-Джербинский краевой шов на западе и Чуйский разлом на востоке. Акитканский вулканоген сложен раннекарельскими осадочно-вулканогенными образованиями акитканской серии, в основании которых залегают зеленокаменные породы большеминьской толщи. Его восточную и центральную части занимают массивы гранитоидов ирельского и других комплексов, являющихся комагматами акитканских вулканитов.

В пределах вулканогена и вдоль ограничивающих его структур развита серия надвигов, фронтальная ориентировка которых совпадает с направлением краевых швов. Широкое развитие надвиговых структур обусловило скрытый характер региональных разломов, ограничивающих Акитканский вулканоген.

В районе выявлено более 50 проявлений урана и одно малое месторождение – Безымянное. Большинство урановых проявлений контролируется крупными разломами восток-северо-восточного простирания в узлах их пересечения со структурами более высокого порядка, трассируемыми дайковыми телами основного состава. К числу

наиболее перспективных рудных узлов Акитканского ПУРР принадлежит Безымянско-Домугдинский узел с мелким месторождением Безымянное и рудопроявлениями Мотылёк, Озёрное, Парусное.

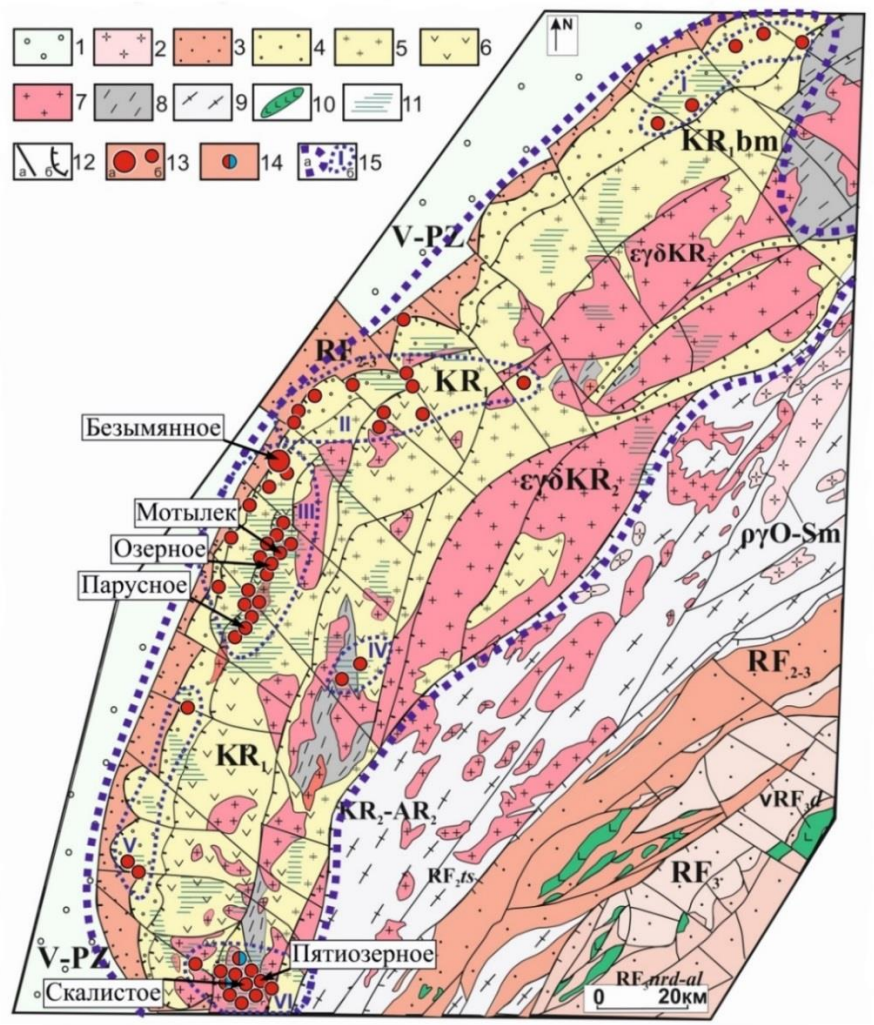


Рис. 9. Положение позднедокембрийских урановых гидротермальных месторождений и проявлений на геологической схеме Акитканского ПУРР [2, с изменениями].

1 – карбонатные отложения плитного комплекса Сибирской платформы (V-PZ); 2 – граниты и пегматиты мамского комплекса (ργO-Sm); 3 – терригенно-осадочные отложения Прибайкальского прогиба (на западе) и Олокитского палеорифта (на востоке) (RF_2-RF_3); 4-7 – образования Акитканского вулканогена: 4 – песчаники, конгломераты, туфы, трахириолиты и трахириодациты окуньской и чайской свит (KR_2ok-cs), 5 – субщелочные вулканиты кислого состава (трахириолиты, трахидациты и др.) и их туфы хибеленской и домугдинской (KR_2hb-dm) свит, 6 – нормально- и субщелочные вулканиты среднего состава (андезиты и трахиандезиты) куленянской свиты (KR_2kl), 7 – комагматы вулканитам (граносиениты, граниты, диориты и др.) ($\varepsilon\gamma\delta KR_2$); 8 – вулканогенно-осадочные образования большеминской толщи (KR_1bm); 9 – мигматито-гнейсы Чуйского блока (KR_2-AR_2cs); 10–11 породы основного состава (νKR_2-RF_3): 10 – массивы, 11 – области проявления даек; 12 – сдвиги и прочие разрывные нарушения (а) надвиги и взбросы (б); 13 – месторождение урана Безымянное (а) и рудопроявления (б); 14 – торий-урановая минерализация; 15 – Акитканский ПУРР (а) и рудные узлы (б): I – Чайский, II – Кутимо-Рассохинский, III – Безымянско-Домугдинский, IV – Большеминский, V – Савкинский, VI – Окунайский

В Безымянско-Домугдинском рудном узле урановые объекты сконцентрированы в двух разобщенных полях, линейно вытянутых вдоль наиболее крупных структур района. Одно из них (Безымянское) протягивается вдоль краевого шва Сибирской платформы, другое (Домугдино-Черепаниховское) расположено в зоне Миньского разлома во внутренней части вулканогена. В обоих рудных полях урановое оруденение связано с зонами щелочных метасоматитов. В зоне краевого шва (месторождение Безымянное) оруденение локализовано в ореолах калиевых метасоматитов, в зоне Миньского разлома на проявлении Парусное и других – в низкотемпературных натриевых метасоматитах. Щелочные метасоматиты во всех случаях образуют пластообразно-линзовидные тела, локализованные в пологих нарушениях предположительно надвигового типа, проявленных в вулканитах и вулкано-терригенных породах. Положение отдельных рудопроявлений и аномальных ореолов в рудных полях контролируется узлами пересечения главных разломов с крутопадающими структурами более высокого порядка с преобладающей северо-западной ориентировкой. Рудные концентрации урана связаны с участками наиболее интенсивной тектонической проработки.

В Акитканском районе и его обрамлении широко распространены многочисленные дайки, силлы и тела базитов кутимского, чайского, довыренского и жаровского комплексов, формировавшихся в различные периоды: от позднего карелия до среднего палеозоя. Что касается уранового оруденения, то отмечается, что в пределах рудных полей Безымянско-Домугдинского рудного узла во вмещающей толще и вблизи оруденелых зон развиты силлы и дайки долеритов, наследующие северо-западные структуры. Абсолютный возраст дофанерозойских пород основного состава, по литературным данным, варьирует в пределах 1674±29 – 673±22 млн лет (Sm-Nd метод) (Митрофанова Н.Н. и др. Объяснит. зап. к листу О-49, ВСЕГЕИ, 2012).

По петрохимическим данным, базиты Миньской зоны разломов отвечают базальтам субщелочной спецификации, а по геодинамической обстановке – породам внутриплитного генезиса (рис. 10, 11).

Рудопроявление Парусное считается одним из эталонных объектов, локализованных в низкотемпературных натриевых метасоматитах. Урановое оруденение размещается в узлах пересечения разнонаправленных разрывных нарушений, но концентрируется в пологопадающих зонах рассланцевания и трещиноватости. Внутри зон альбитизации урановое оруденение сконцентрировано в линзо- и жилообразных телах, приуроченных к тектонизированным участкам максимально проработанных метасоматитов (рис. 12).

Параметры рудных тел в плане составляют десятки метров на первые сотни метров. Мощность рудных швов по канавам 0,5-7 м, а суммарная мощность сближенных швов (залежи) в поверхностных

горных выработках достигает 22-62,5 м. Содержание урана во вскрытых канавами рудных интервалах варьирует от 0,01 до 0,27 %, в штуфных пробах – до первых процентов.

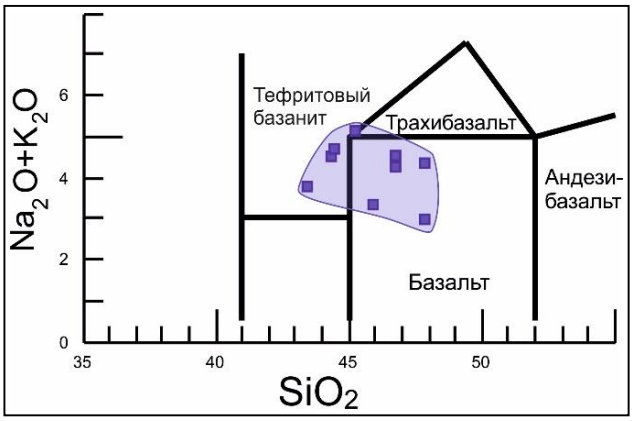


Рис. 10. Классификационная TAS диаграмма (Na_2O+K_2O)-SiO_2 [12]

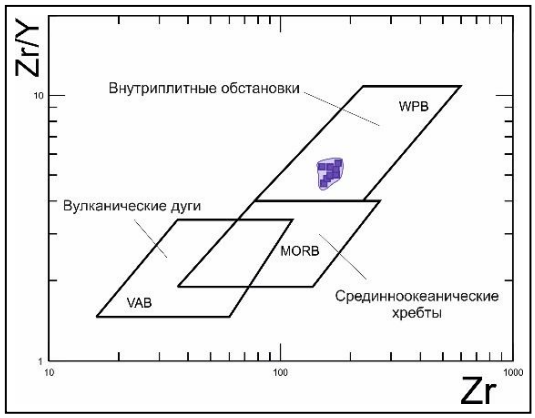


Рис. 11. Классификационная Zr/Y-Zr диаграмма [15]

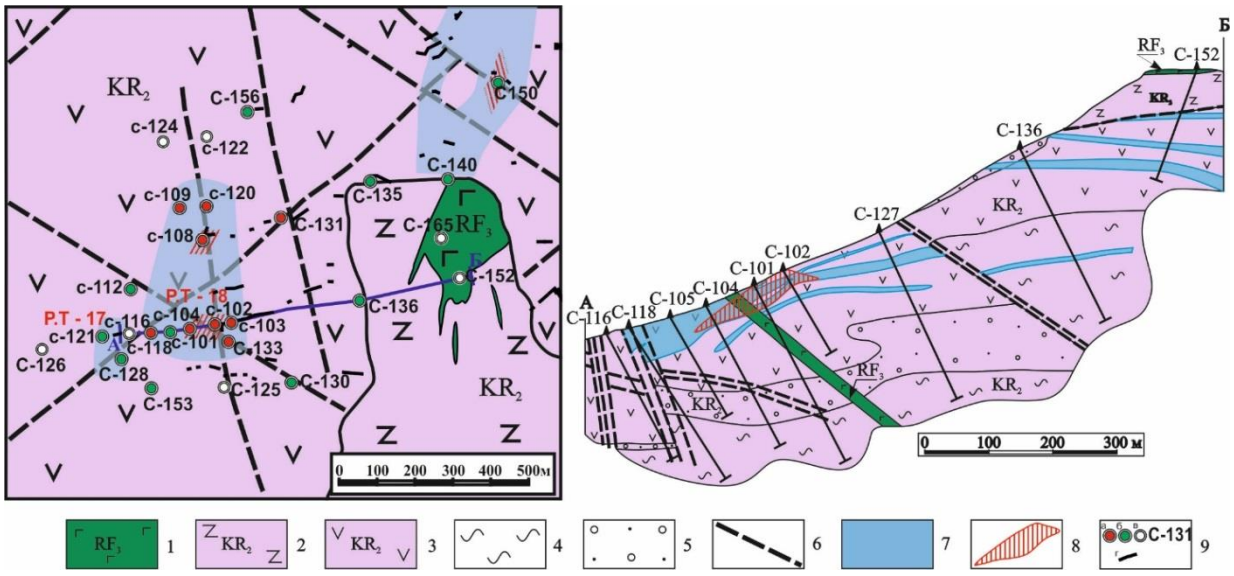


Рис. 12. Схематические геологическая карта и разрез по линии А-Б рудопроявления Парусное.

1 – дайки и силлы габбро-долеритов; 2 – трахиандезитовые порфиры, их туфы с прослоями лав; 3 – трахиандезитовые порфиры, их туфы, туфопесчаники; 4 – игнимбриты и лавы трахиандезитовых порфиров; 5 – туфопесчаники; 6 – тектонические нарушения; 7 – альбитизация; 8 – хлорит-гематитовая рудосопровождающая минеральная ассоциация; 9 – горные выработки: скважины и их номер: а) с кондиционным оруденением, б) с некодиционным оруденением, в) безрудные, г) канавы и расчистки

В толще вулканитов, вскрытой скважинами (до глубины порядка 600 м), ореолы альбититов с урановым оруденением развиты на небольших глубинах от дневной поверхности в виде пологих зон максимальной протяженностью до первых сотен и мощностью до первых десятков метров. Альбитизация внутри ореолов неравномерная, с сохранением

участков и линз слабоизмененных пород. Мощность урановорудных тел в альбититах варьирует от первых десятков сантиметров до первых метров, иногда до 15 м. Оруденение бедное и рядовое (0,05-0,2 %). Процентное содержание урана отмечалось только в штуфных пробах.

Рудно-метасоматические образования сложены несколькими последовательно проявленными минеральными ассоциациями с тремя генерациями браннерита и настурана; присутствуют также коффинит и урансодержащий гель-циркон. Характер выделений урановой минерализации вкрапленный, прожилково-вкрапленный (рис. 13). Настуран второй генерации образует относительно богатые руды, накладываясь на гематит-браннеритовую минерализацию (рис. 14). В рудно-метасоматических образованиях отмечается увеличение содержаний U, Pb, V, F, Se, Cu, Y относительно вмещающих вулканитов.

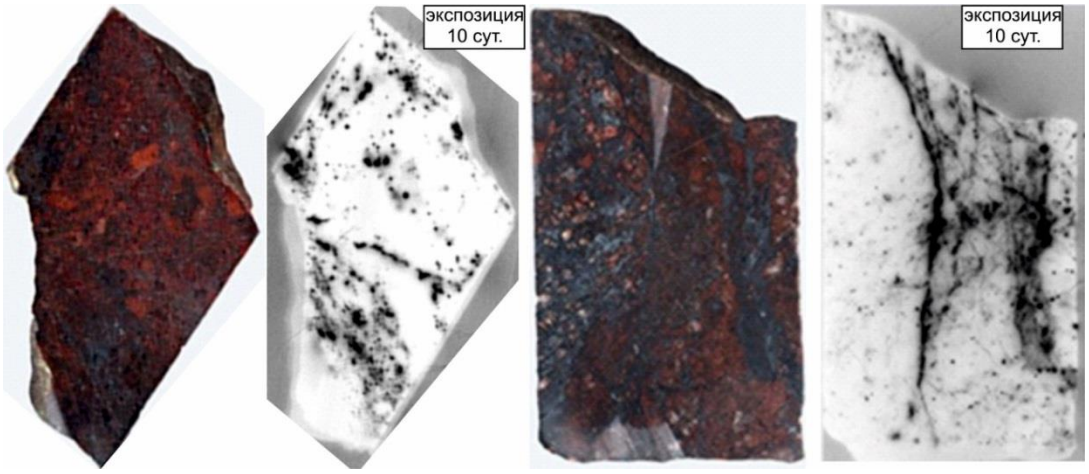


Рис. 13. Характер выделения урановой минерализации: вкрапленный (слева), прожилково-вкрапленный (справа).
Фото рудных образцов керна с радиографиями, в натур. величину

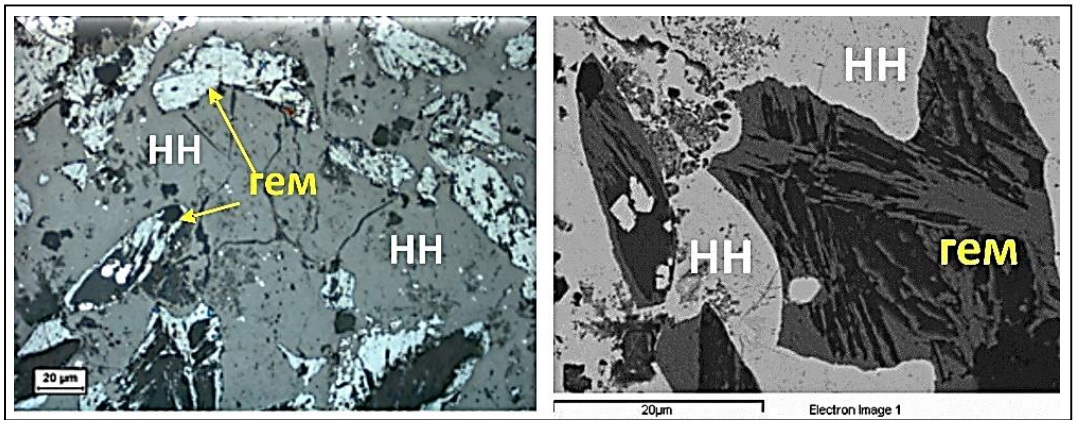


Рис. 14. Цементирование и замещение настураном (НН) гематита (гем). Последний относится к ранней гематит-браннеритовой ассоциации. Слева фото аншлифа в отраженном свете, без анализатора. Справа фото в отраженных электронах, РСМА

По результатам определения абсолютного возраста (термоизохронный Pb-Pb метод, ВИМС) время образования браннерита около 700 млн лет, а развивающегося по нему настурана – около 600 млн лет (рис. 15).

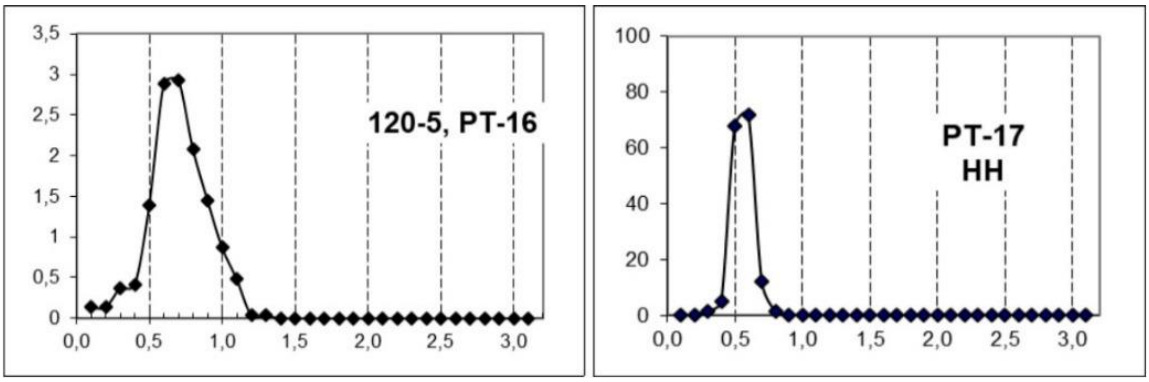


Рис. 15. Абсолютный возраст урановой минерализации, измеренный Pb-Pb термоизохронным методом (ФГБУ «ВИМС», аналитик Сумин Л.В).
Слева – для браннерита, справа – для настурана

Чарский ПУРР расположен на стыке Нечерского поднятия, сложенного раннепротерозойскими гранит-метаморфическими комплексами Саяно-Байкальской складчатой области, западной оконечности Алданского щита, представленного архейской Чарской глыбой, и Березовского прогиба Сибирской платформы, выполненного рифей-вендскими отложениями. Геологический разрез района характеризуется наличием двух структурных этажей: гранит-метаморфического фундамента карельского возраста и перекрывающего его со структурно-стратиграфическим несогласием рифейского осадочного чехла (рис. 16). Структурный план района определяется сочленением крупных региональных зон разломов северо-западного (Ченчинского и Ствотах-Юсюряхского), северо-восточного (Атбастах-Торгойского) и субмеридионального (Жуинского) направлений.

Гранит-метаморфический фундамент сложен кристаллосланцами кодарской серии и прорывающими их гранитоидами, в порядке возрастной последовательности представленными куандинским, кодарским и ничатским комплексами, которые некоторыми исследователями относятся к 3 фазам единого кодаро-удоканского комплекса. Они слагают крупные гранито-гнейсовые купола, по периферии обрамленные скиалитами биотитовых, в том числе углеродистых, кристаллосланцев, кварцитов с апатитоносными прослоями.

В основании чехла по породам фундамента развита кора выветривания хлорит-гидрослюдистого состава, сменяющаяся вверх по разрезу нижнерифейскими метаконгломератами и метагравелитами пурпольской свиты с палеороссыпной редкометально-редкоземельной минерализацией, а также спорадически картируемыми в северной части Нечерского поднятия и

по его восточному борту метаконгломератами медвежевской свиты. Далее по разрезу терригенные породы раннего и среднего рифея сменяются средне-позднерифейскими карбонатными отложениями.

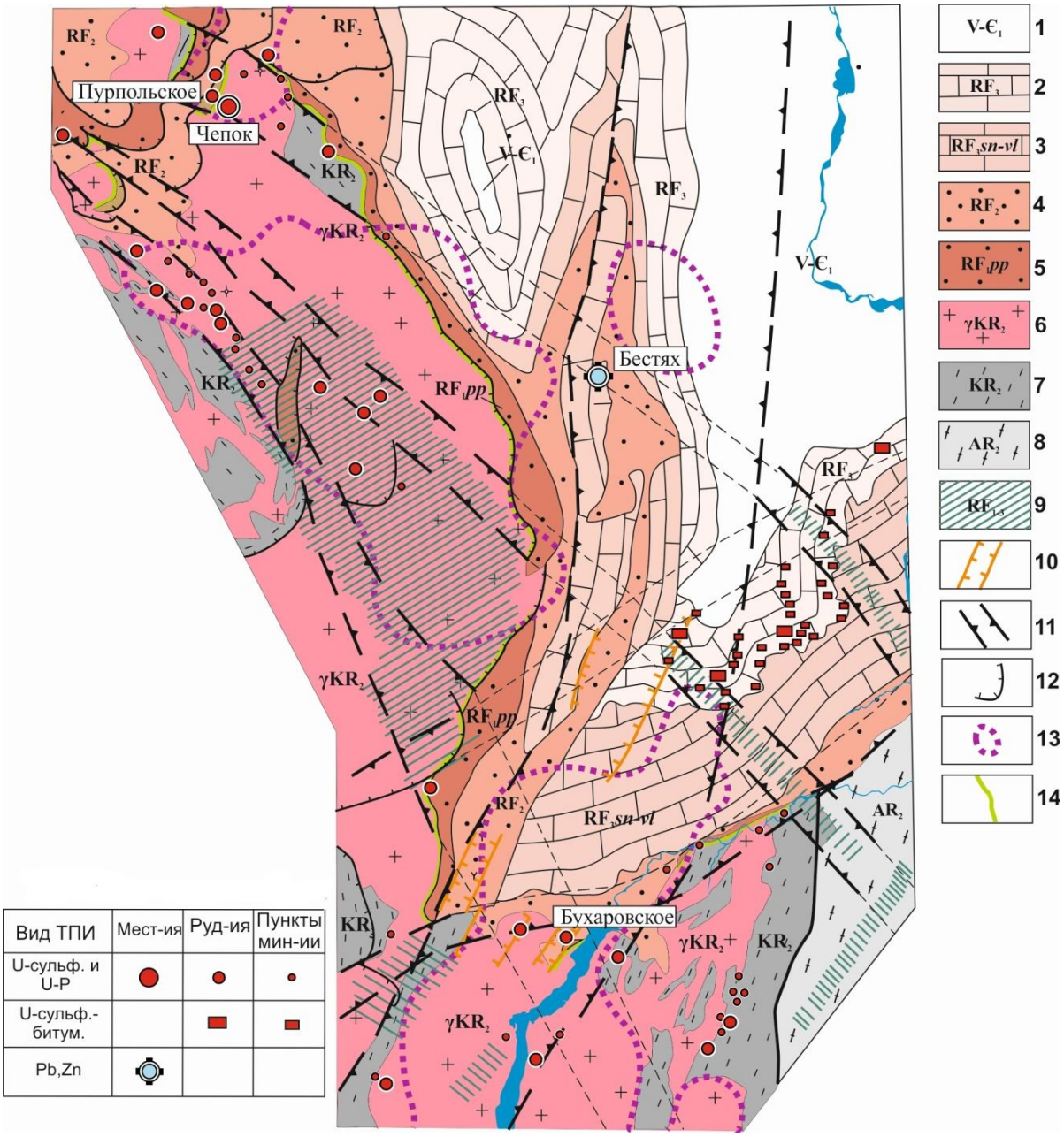


Рис. 16. Положение позднедокембрийских урановых гидротермальных месторождений и проявлений на геологической схеме Чарского ПУРР [3, с изменениями].

1 – нерасчлененные терригенно-карбонатные отложения ($V\text{-}Є_1$); 2 – известняки и мергели торгинской свиты (RF_3); 3 – доломиты сеньской свиты и углеродистые сланцы валюхтинской свиты ($Rf_3sn\text{-}vl$); 4 – нерасчлененные терригенно-карбонатные отложения (RF_2); 5 – песчаники, гравелиты и пирофиллитовые сланцы пурпольской свиты (RF_1pp); 6 – граниты и гранито-гнейсы кодаро-удоканского комплекса (γKR_2); 7 – метаморфиты кодарской серии (KR_2); 8 – нерасчлененные гранит-метаморфические образования (AR_2); 9 – области проявления рифейского основного магматизма; 10 – области проявления мезозойского щелочного магматизма; 11 – региональные зоны разломов; 12 – надвиги; 13 – гранито-гнейсовые купола; 14 – предрифейская кора выветривания

В районе широко проявлен полиэтапный магматизм основного и щелочного составов в виде даек, силлов и малых тел. Базиты распространены в основном на Нечерском поднятии в кристаллическом фундаменте, но встречаются также и среди отложений проточехла платформы. Дайки и малые тела щелочных пород верхнеюрского-раннемелового возраста контролируются региональным Жуинским разломом.

Среди пород основного состава выделяются долериты, кварцевые долериты, а также, по литературным данным, оливин-содержащие габброиды. Несмотря на их обилие на площади, время образования, в том числе относительно друг друга, подавляющего большинства из них неясно. В литературе на базе данных других районов Патомского нагорья они отнесены к образованиям чайского, доросского и патомского комплексов с радиологическими возрастами соответственно 1330-1020 млн лет (K-Ar метод, при этом подчеркнуто, что последняя цифра является заниженной в результате проявления наложенных процессов), 1055±69 млн лет (Sm-Nd метод) и 460–302 млн лет (K-Ar метод) [4].

Непосредственно по геологическим наблюдениям в Чарском районе выделяются два комплекса. К относительно раннему, «доросскому» в качестве представителя отнесены несколько крупных немагнитных даек габбро-долеритов на юго-западном фронтальном окончании Березовского прогиба. Обе локализованы в метапесчаниках пурпольской свиты нижнерифейского возраста, а со стороны восточного борта сопровождаются мелкими телами среди отложений балаганахской серии среднерифейского возраста.

К относительно более позднему «патомскому» комплексу отнесены протяженные северо-западного направления дайки базитов, по геолого-аэрогеофизическим данным прорывающие позднерифейские карбонатные отложения сеньской и торгинской свит и в свою очередь перекрывающиеся соответственно торгинскими и венд-кембрийскими осадочными отложениями. В отличие от «доросского» комплекса данные базиты хорошо проявлены в магнитном поле в виде вытянутых положительных аномалий. Жуинский разлом, имеющий меридиональное направление в отложениях Березовского прогиба, трассируется не только дайками и мелкими массивами щелочных мезозойских пород, но также и вышеуказанными дайками базитов предположительно «доросского» комплекса.

В ходе проводившихся работ по западному обрамлению Березовского прогиба были отобраны и изучены образцы различных даек базитов, схожих по облику и петрографическому составу. Однако по петрогеохимическим данным эти породы, отобранные в прибортовой полосе Жуинской зоны разломов (предположительно «доросский» комплекс), оказались различными. Одна их часть относится к пикробазальтам, другая к андезито-базальтам, сформировавшимся в условиях островодужной и внутриплитной геодинамических обстановок соответственно (рис. 17, 18).

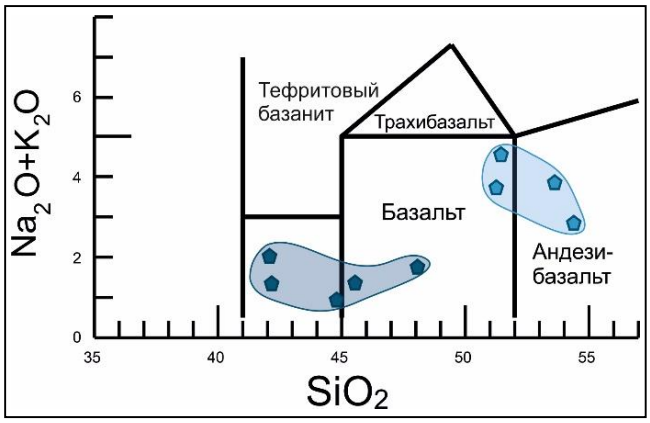


Рис. 17. Классификационная TAS диаграмма (Na_2O+K_2O) – SiO_2 [12]

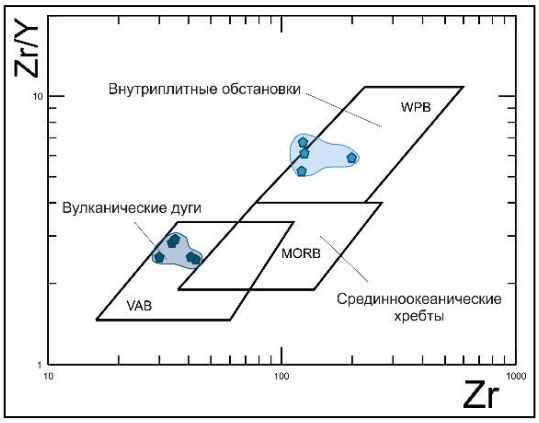


Рис. 18. Классификационная Zr/Y-Zr диаграмма [15]

Таким образом, несмотря на то, что базиты Чарского района недостаточно датированы достоверными методами, геологические данные свидетельствуют о проявлении здесь в рифейское время цикличного (полихронного) базитового магматизма.

Подавляющее большинство выявленных в районе многочисленных торий-урановых и урановых объектов ранга точек минерализации и рудопроявлений контролируются Ствотах-Юсюряхской, Лево- и Право-Ченчинской зонами разломов северо-западного направления. С последней на северо-западе района пространственно связано мелкое месторождение урана Чепок, локализованное в фундаменте вблизи границы его раздела с породами чехла, а ураноносные зоны расположенного рядом рудопроявления Пурпольское, образующего вкупе с Чепком рудный узел, вскрыты бурением непосредственно под толщей нижнерифейских песчаников пурпольской свиты.

Месторождение Чепок локализовано в дезинтегрированных тектонизированных раннепротерозойских гранитоидах фундамента с ксенолитами биотитовых сланцев и гнейсов. В его северной части картируются небольшие участки древней коры выветривания, на которой залегают останцы нижнепурпольских кварцитовидных гравелитов и песчаников. Урановое оруденение локализовано в фундаменте, пространственно тяготея к зоне ССН.

В структурном плане месторождение приурочено к осложненному поперечными тектоническими нарушениями участку крупной радиогеохимической ураноносной Ченчинской зоны разломов. Руды центральной части месторождения монометальные, в северной части кроме урана в рудах присутствует молибден в промышленных концентрациях, до 0,1–0,3 %, при содержании урана 0,2–0,9 %. В южной части месторождения вскрыты самостоятельные интервалы с ториевым оруденением (до 0,082 % в штуфных пробах).

Урановое оруденение приурочено к швам милонитов, катаклазитов, проработанных кварц-биотит-серицит/фенгит-хлорит-апатитовыми

метасоматитами с вкрапленными сульфидами (пирит, пирротин, реже халькопирит). Урановая минерализация прожилковая и гнездово-вкрапленная, представлена настураном, коффинитом, с редкими реликтами мелкокристаллического уранинита и браннерита.

Установлено, что радиологический возраст руд урановых объектов Чарского ПУРР, в том числе и руд месторождения, полихронный, обусловленный телескопированием в одних и тех же структурах различных по составу и по времени урановорудных концентраций, сформированных за счет многократного проявления тектоно-магматической активизации в данном и других районах Прибайкалья [10].

Дополнительным аргументом в пользу этого явились результаты работ 2007–2010 гг. на Ничатской площади, где изучались урановорудные объекты, локализованные в гранит-метаморфическом фундаменте на южной оконечности Березовского прогиба, а также урановая минерализация в отложениях торгинской свиты в Березовском прогибе.

В породах фундамента, в том числе на рудопроявлении Бухаровское (рис. 19), выявлены рядовые и бедные вкрапленные и прожилково-брекчиевые браннерит-коффинит-настурановые с сульфидами руды, сопровождаемые однотипными ореолами хлорит-светло-слюдистых изменений во вмещающих гранитоидах и сланцах. В целом, в рудно-метасоматических образованиях относительно неизмененных вмещающих пород наблюдаются повышенные концентрации U, Pb, Mo, S, Se, Cd, As, Zn, Yb, Nb, Y.

Во вкрапленных рудах скопления настурана и коффинита тяготеют к пириту, развиваясь в межзерновом пространстве породы. Абсолютный возраст настурана (Pb-Pb термоизохронный метод) составляет 1350 млн лет с вероятным переотложением урана на рубеже около 1000-1200 млн лет (рис. 20).

Наряду с бедным прожилково-вкрапленным оруденением, занимающим краевые части рудно-метасоматических зон, в сланцах фундамента в центральных частях зон отмечаются прожилково-брекчиевые коффинит-настуран-сульфидные (сфалерит, галенит, пирит, халькопирит) руды в ореолах хлорит-светлослюдистых изменений. Здесь же в надрудных частях отмечается обильная флюоритизация. Абсолютный возраст образования настуран-коффинитовых прожилков, определенный Pb-Pb термоизохронным методом, колеблется в пределах 600–750 млн лет (рис. 21). Сульфидно-урановый тип выделен в качестве перспективного на обнаружение промышленных урановых руд эндогенного происхождения [8].

В пределах Березовского прогиба в области распространения базитовых интрузий северо-западного простирания отмечаются многочисленные уран-битумные проявления. Одним из представителей этого типа является Александровское рудопроявление, где рудные тела образуют в разрезе серию пластов и линз согласно слоистости на глубинах 100–300 м от дневной поверхности. Они характеризуются мощностью 0,1–2,9 м, содержаниями урана от 0,01 до 0,038 % и локализуются

в карбонатных породах с повышенной восстанавливающей способностью за счет обогащенности органическим веществом, в т.ч. антраксолитом [6]. Максимальная мощность рудной пачки, объединяющей несколько сближенных рудных тел, составляет 8,2 м при среднем содержании урана 0,01 %. В плане рудный пласт образует эллипсовидную залежь, вытянутую на 2 км при ширине 200-400 м с падением на северо-запад под углом 5-10°.

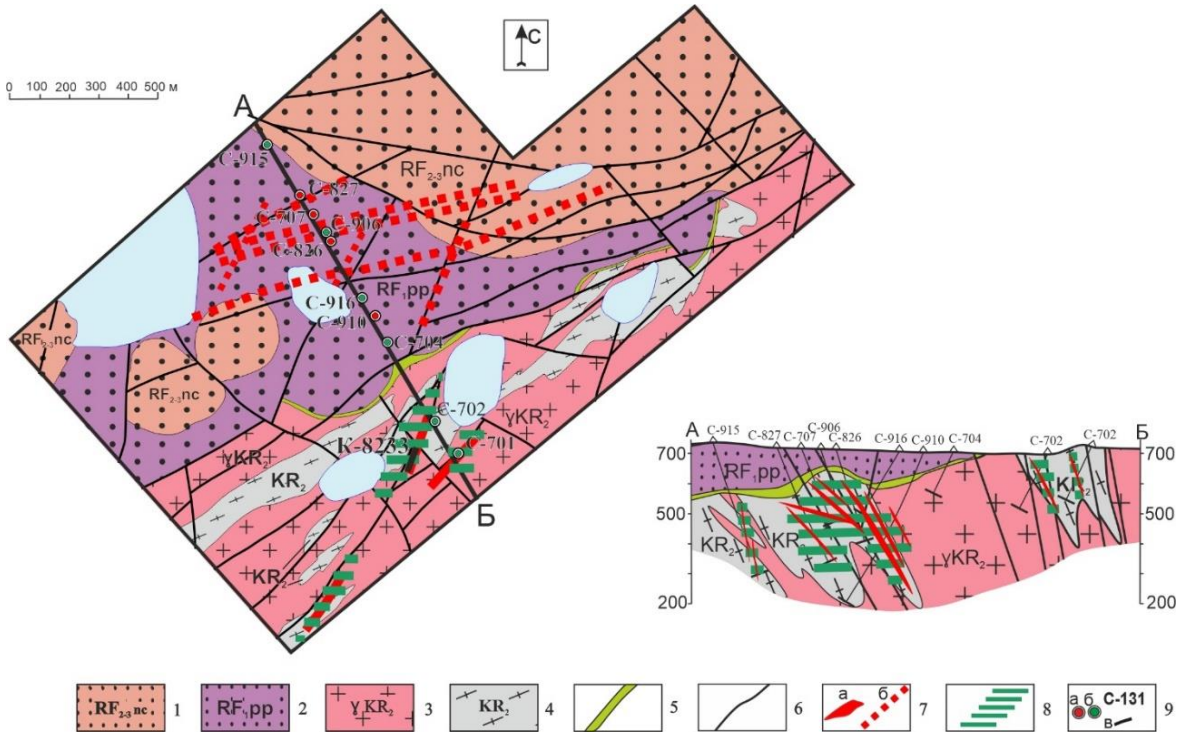


Рис. 19. Рудопроявление Бухаровское. Схематические геологическая карта и разрез по линии А – Б (по Зайцеву С.У. и др., 2010 .г, с изменениями).
1 – когломераты, гравелиты, метапесчаники ничатской свиты ($R_{2-3}nc_1$) ; 2 – метагравелиты и метапесчаники, хлорит-серицитовые сланцы пурпольской свиты (R_1pp); 3 – граниты лейкократовые (PR_1); 4 – полевошпат-кварц-биотитовые сланцы (PR_1); 5 – предрифейские коры выветривания; 6 – разломы; 7 – урановорудные тела и зоны (а) и их проекция выхода с горизонта +500 м на дневную поверхность (б); 8 – рифейские метасоматиты с U-сульфидной минерализацией; 9 – некоторые буровые скважины, вскрывшие: кондиционное (а) и забалансовое урановое оруденение (б)



Рис. 20. Гнездово-вкрапленная урановая минерализация в сланце и ее абсолютный возраст (Pb-Pb метод, ФГБУ «ВИМС», аналитик Сумин Л.В). Фото обр. из скважины 916, глубина 194,2 м

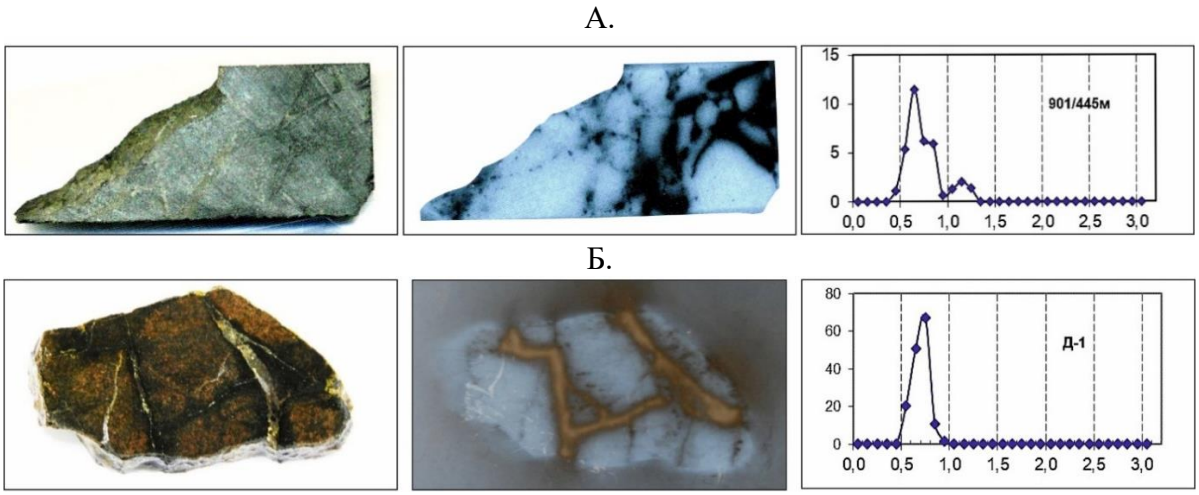


Рис. 21. Прожилково-брекчиевая коффинит-настурановая минерализация в кристаллических сланцах, абсолютный возраст, который отвечает 600-750 млн лет (Pb-Pb метод). А – экспозиция радиографии 5,5 суток, скв. 901, глуб. 445 м; Б – экспозиция радиографии 41 час, канава 8233, обр. Д-1

Минералого-петрографическими исследованиями, проведенными Тархановой Г.А. и Авиловой О.В., установлено, что урановые минералы представлены колломорфными тонкодисперсными кубическими оксидами урана размером до первых микрон, реже тонкодисперсным и призматическим коффинитом. Урановая минерализация приурочена к темно-серым известнякам, в т. ч. к онколитам и другим разновидностям водорослевых остатков, обогащенных органическим веществом, к отдельным выделениям антраксолита и битумов, к дисульфидам железа и к сутуро-стилолитовым швам (рис. 22, 23). В оруденелых известняках относительно вмещающих пород отмечаются повышенные концентрации U, Pb, Zn, Ag, V, Cu, As, Ba, Sr, Cd и Ge.

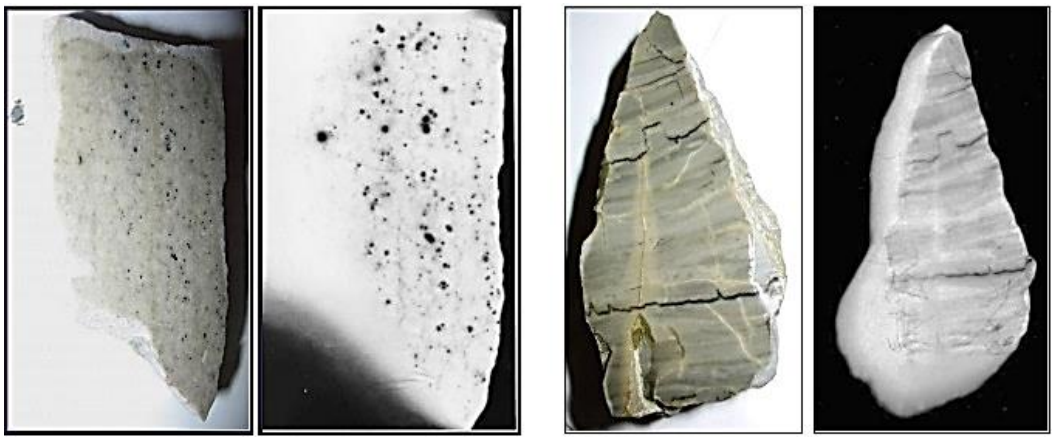


Рис. 22. Характер распределения урановой минерализации в отложениях торгинской свиты; экспозиция радиографий 20 и 22 сут.

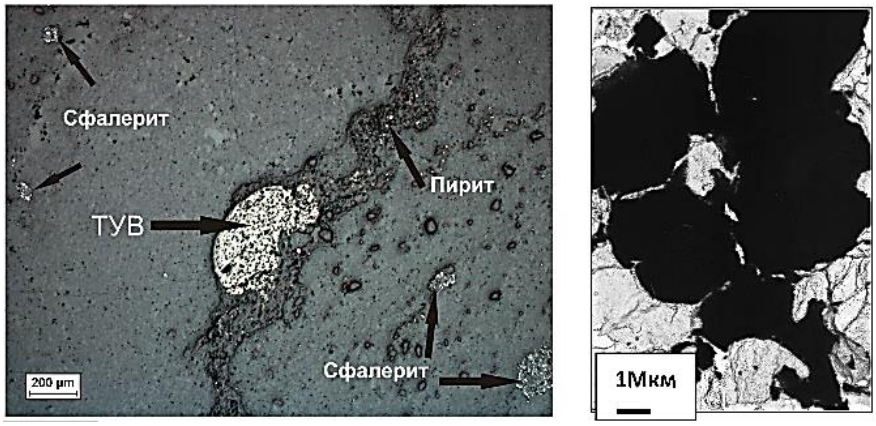


Рис. 23. Слева – выделение твердого углеродистого вещества (ТУВ), сопровождаемое вкрапленностью пирита и сфалерита в сутуро-стилолитовом шве. Отраженный свет. Справа – обособление оксида урана; реплика с извлечением, ПЭМ

Относительно возраста образования урановых концентраций полученные данные неоднозначны. По данным, приведенным в работе Макарьева Л.Б. [7], возраст настурана с рудопроявления Александровское не древнее 195–190 млн лет (U-Pb метод). Возраст настурана из других рудных проб, определявшийся кинематическим термоизохронным Pb-Pb методом (аналитик Сумин Л.В., ФГУП «ВИМС»), составил 600–750 млн лет, что близко по времени формирования, с одной стороны, с отложением пород торгинской свиты, а с другой – со временем локализации северо-западных даек, прорывающих отложения торгинской свиты (рис. 24).

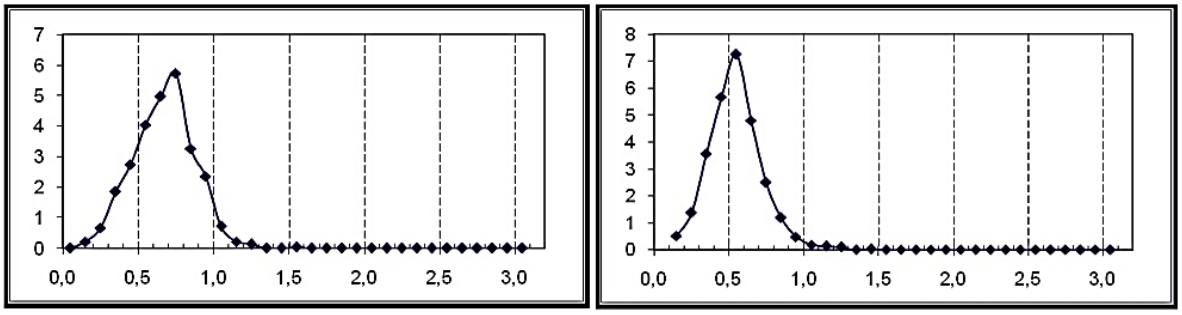


Рис. 24. Радиологический возраст урановой минерализации из сутуро-стилолитовых швов 600–750 млн лет (Pb-Pb метод, ФГБУ »ВИМС», аналитик Сумин Л.В)

Вероятно, что позднерифейское стратиформное урановое оруденение с битумами формировалось в процессе длительной (на протяжении десятков, а возможно и сотни млн лет) пульсации гидротерм в условиях морского бассейна. Участие гидротермальных процессов в формировании уранового оруденения с битумами подтверждается следующими фактами:

- близкий позднерифейский возраст (600–750 млн лет) уран-битумного и уран-сульфидного оруденения Чарского района, а также с дайками основного состава;

- пространственная близость многочисленных уран-битумных проявлений, аномалий и даек базитов;

- присутствие в урановых рудах проявлений Александровское и Бухаровское сульфидной минерализации (пирита, халькопирита, галенита и клейофана) и, соответственно, аномальных содержаний Pb, Zn, As и Cd.

В свою очередь, участие экзогенных процессов в образовании уран-битумной минерализации обусловлено:

- близким возрастом формирования (600–750 млн лет) известняков торгинской свиты с уран-битумной минерализацией;

- стратиформным характером залегания урановорудных залежей в слоистых рудовмещающих породах;

- приуроченностью оруденения к участкам, обогащённым органическим веществом, образованным в процессе жизнедеятельности сине-зеленых водорослей;

- дисперсностью и слабой степенью раскристаллизации рудной минерализации.

Сравнение абсолютных возрастов рифейских урановых руд и базитовых интрузий, проявленных в пределах южной границы Сибирской платформы, а также в северной и центральной частях Канадского щита. Анализ зарубежных и российских публикаций по геологическому строению и рудоносности показал, что во впадине Атабаска**,** да и в целом в северной и центральной частях Канадского щита также наблюдаются многочисленные разновозрастные рои даек, образованных в протерозое. Характерно, что радиологические датировки оксидов урана с месторождений впадины Атабаска соответствуют этапам проявления базитового магматизма (табл. 1).

Заключение

Образование позднедокембрийских урановорудных объектов южной границы Сибирской платформы продолжалось в период 1350–1200 и 750–600 млн лет. На каждом последующем этапе в пределах ранее сформированных рудно-метасоматических зон происходило обогащение урановых руд. Внедрение базитовых интрузий в пределах рассматриваемой территории длилось многоэтапно в условиях континентального рифтогенеза, в периоды 1350–1100 и 800–600 млн лет (табл. 1). Таким образом, образование полихронных позднедокембрийских урановорудных объектов типа «несогласия» практически всегда в пространстве и во времени сопровождалось магматизмом основного состава в пределах радиогеохимически специализированных на уран геоблоков.

Таблица 1

Сравнение абсолютных возрастов рифейских урановых руд и базитовых интрузий,
проявленных в пределах южной границы Сибирской платформы, а также в северной и центральной частях Канадского щита*

Провинция Атабаска	Северная и центральная части Канадского щита	Южная граница Сибирской платформы	Присаянский ПУРР	Акитканский ПУРР	Чарский ПУРР
главные урановые минералы, вариации значений их абс. возрастов (млн лет)	абсолютный возраст базитов, млн лет (метод)		главные урановые минералы, вариации их датировок возраста (млн лет)		
оксид урана (900–800)	725–716 779	637 ± 22 (Pb-Pb) 707 ± 40 (Pb-Pb) 725 ± 9 (U-Pb) 726 ± 18 (U-Pb) 728 ± 3 (U-Pb) 741 ± 2 (Ar-Ar) 743 ± 47 (Sm-Nd) 758 ± 4 (Ar-Ar) 787 ± 21 (Ar-Ar) 810 ± 19 (Sm-Nd) 812±19 (Sm-Nd)	Настуран, коффинит (~750)	Браннерит (700), настуран (600)	Настуран и коффинит (750–650)
оксид урана (1350–1100)	1085–1140 1240–1270 1353 ± 2 1380	1050 ± 70 (Sm-Nd) 1258 ± 5 (U-Pb) 1338 ± 2,9 (U-Pb) 1339+54 (Sm-Nd) 1350 ± 6 (U-Pb)	Настуран (1350–1200)		Браннерит, коффинит (Y), настуран, (1350–1200)

*Использованы данные: Шумилин М.В., 2020 [13]; Гладкочуб Д.П. и др., 2019 [1]; Ernst R.E. et al., 2016 [14]; Simon M. Jowitt et al., 2012 [16]; Митрофанова Н.Н. и др., 2012 (Объяснит. зап. к листу О-49); Макарьев Л.Б. и др., 2010 (Объяснит. зап. к листу О-50).

Наличие многочисленных разновозрастных базитовых интрузий в позднем докембрии, образовавшихся в рифтогенных условиях, свидетельствует о длительном существовании повышенного теплового режима в земной коре, что явилось благоприятным фактором для продолжительной циркуляции гидротермальных растворов.

Базитовый магматизм позднего докембрия, проявленный в пределах южной границы Сибирской платформы, необходимо относить к одному из главных критериев прогнозирования, доказывающих возможность обнаружения месторождений урана в зоне ССН в этой области. Однако масштабное проявление здесь позднерифейских базитов и урановых руд близкого возраста является отличительной особенностью отечественных объектов от классических месторождений этого типа в бассейне Атабаска.

Литература

1. Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Эрнст Р.Е. и др. Новое событие базитового магматизма эктазийского возраста в южной части Сибирского кратона // Доклады Академии наук, 2019, т. 486, № 3. С. 326–330.

2. Гребенкин Н.А., Леденева Н.В., Тюленева В.М. Вещественный состав и особенности формирования полихронного уранового оруденения в Акитканском районе Прибайкалья / Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов. – М., ВИМС, 2017, вып. 160. С. 50–67.

3. Гребенкин Н.А., Мельников С.И. Урановоносность и металлогения позднего докембрия Южно-Сибирской мегазоны // Разведка и охрана недр, № 7, 2018. С. 22–30.

4. Докембрий Патомского нагорья / Иванов А.И., Лифшиц В.И., Перевалов О.В. и др. – М., Недра, 1995. 351 с.

5. Карманов Е.Н., Леденева Н.В. Применение гиперспектральных исследований с целью картирования урановоносных гидротермалитов на месторождении Столбовое (Восточное Присаянье): Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы VI Международной конференции. Томский политехнический университет, 20-24 сентября 2021 г. С. 216-219.

6. Коноплев А.Д., Авилова О.В., Тарханова Г.А., Кусов В.А., Ткаченко И.М., Стародубцев С.Г. Геолого-генетический тип уранового оруденения в рифейских известняках Березовского прогиба (Чарский потенциально урановорудный район): Тезисы Третьего международного симпозиума «Уран: геология, ресурсы, производство». – М.: ВИМС, 2013. С. 68.

7. Макарьев Л.Б., Павлов М.В. Урановоносные известняки Березовского прогиба (Западный Алдан) / Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов. – М., ВИМС, 2009, вып. 153. С. 78-87.

8. Мельников С.И., Гребенкин Н.А., Дубинчук В.Т. и др. Радиоактивная минерализация Ничатской площади (рудно-формационные типы, их размещение, перспективы на обнаружение промышленных скоплений урана) / Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов. – М., ВИМС, 2011, вып. 156. С. 105–115.

9. Паршин А.В., Гребенкин Н.А., Морозов В.А., Ржевская А.К., Шикаленко Н.Ф. Первые результаты методических работ по применению беспилотных аэрогеофизических технологий на стадии поисков месторождений урана // Разведка и охрана недр, 2017, № 11. С. 59–64.

10. Тюленева В.М., Чистякова Н.И., Дубинчук В.Т., Ружицкий В.В. Минеральные ассоциации, эпохи и эволюция уранового рудогенеза в Северном Прибайкалье // Разведка и охрана недр, 2009, № 3. С. 25–32.

11. Царук И.И. Ураноносность зоны предрифейского структурно-стратиграфического несогласия на юге Сибирской платформы / Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов. – М., ВИМС, 2005, вып. 148. С. 88–105.

12. Шарпенок Л.Н., Костин А.Е., Кухаренко Е.А. Детализация диаграммы сумма щелочей – кремнезем (TAS) для химической классификации вулканических пород // Региональная геология и металлогения, 2008, № 35. С. 48–55.

13. Шумилин М.В. Урановые месторождения типа несогласия: геология, генетическая модель, поисковые методы и перспективы выявления в России. – М., ВИМС, 2020. 178 с.

14. Ernst R.E., Hamilton M.A., et al. Long-lived connection between southern Siberia and northern Laurentia in the Proterozoic. Nature geoscience, vol 9, June 2016.

15. Pearce J.A., Norry M.J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks. Contributions to Mineralogy and Petrology. 1979. 69 (1). P. 33–47.

16. Simon M. Jowitt, Ernst R.E. Geochemical assessment of the metallogenic potential of Proterozoic. Lithos 174 (2013) 291–307.

УРАНОНОСНОСТЬ ПОРОД И ФЛЮИДОВ ПРИПЯТСКОГО ПРОГИБА (БЕЛАРУСЬ)

Я.Г. Грибик
Институт природопользования НАН Беларуси,
г. Минск, Республика Беларусь

Припятский прогиб расположен в южной части Беларуси и представляет собой отрицательную глубинную геологическую структуру широтного направления размерами 750×150 км, являющуюся северо-западным продолжением Днепровско-Донецкого авлакогена. На юге прогиб на всём протяжении граничит с Украинским кристаллическим щитом (УКЩ), вдоль южного краевого глубинного разлома. На севере он отделяется северным глубинным разломом от Белорусского и Воронежского кристаллических массивов через плечевые синеклизные структуры. На западе он довольно спокойно переходит в Полесскую седловину с вклинившимся в средней части Микашевичско-Житковичским выступом (рис. 1).

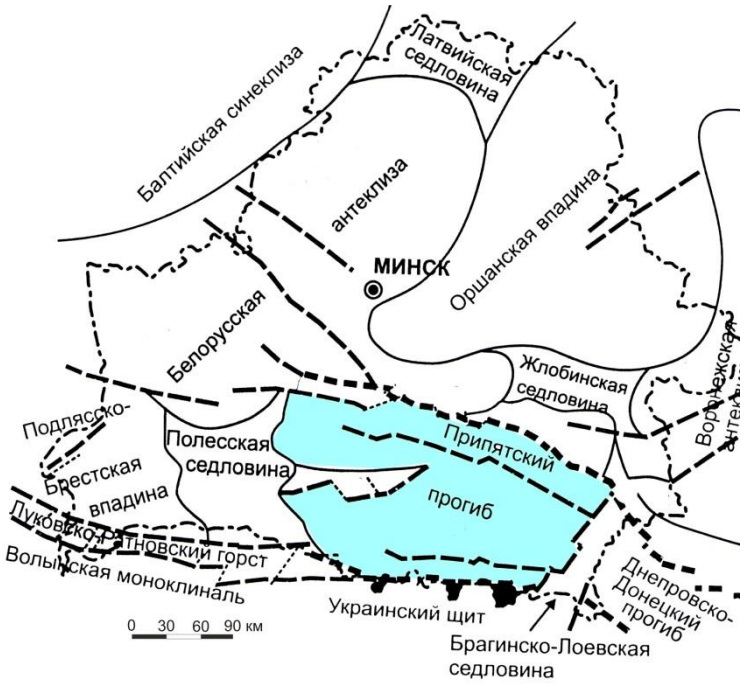


Рис. 1. Тектоническая карта Беларуси

Геологический разрез Припятского прогиба сложен (снизу вверх) породами кристаллического фундамента, залегающими на глубине от 50–100 м (Микашевичско-Житковичский выступ) до глубин 5,5–6,0 км в погруженных частях в районе крупноамплитудных региональных разломов. Породы представлены преимущественно гранитами, гранодиоритами, гнейсами. На эродированной поверхности кристаллического фундамента залегают породы осадочного чехла общей мощностью до 6,0 км с уменьшением до 1,5 в западной и восточной частях. Разрез осадочной толщи

представлен верхнепротерозойскими, девонскими, каменноугольными, мезозойскими и кайнозойскими отложениями. Значительную часть осадочного чехла слагают девонские отложения, в которых выделяются нижняя и верхняя соленосные толщи, подразделяющие геологический разрез на подсолевой, межсолевой и надсолевой комплексы.

Радиогеологические исследования Припятского прогиба следует анализировать с двух позиций. Первое направление – общее геологическое изучение при выполнении всех видов геологоразведочных работ и реализация по этой теме задания – массовые поиски радиоактивных элементов. Эти исследования проводились при всех геологоразведочных работах, обобщались и пополняли общие геологические данные по региону. В эту группу обобщения и анализа включены результаты массовых поисков радиоактивных элементов при региональных и поисковых работах на нефть, угли, сланцы, соли, строительные материалы, подземные воды и другие полезные ископаемые в Припятском прогибе.

Второе направление изучения ураноносности Припятского прогиба, специализированное по направлению и технологии работ, выполнялось Кировским ПГО (г. Киев) в 1960–1988 гг. По результатам этих работ на территории Припятского прогиба в осадочном чехле выявлено девять горизонтов с проявлениями урана. Их характеристика и геологические условия уранопроявлений детально приведены в [1], а настоящее обобщение базируется в основном на материалах исследований по программе «массовые поиски» и охватывает более широкий стратиграфический разрез Припятского прогиба по вещественному, породному и флюидному составу.

Распределение радиоактивных элементов в осадочных отложениях и породах кристаллического фундамента Припятского прогиба изучено сравнительно невысоко. Большинство определений радиоактивных элементов лабораторными методами выполнено для пород надсолевых отложений, а радиоактивность залегающих ниже горизонтов изучена преимущественно по гамма-каротажу. По этому параметру невысокой гамма-активностью (2-4 мкр/час) характеризуются соленосные отложения лебедянского и ливенского горизонтов. Несколько более высокая гамма-активность характерна для карбонатных верхнедевонских горизонтов задонско-елецкого, саргаевского, семилукского горизонтов, представленных ангидритами, доломитами, известняками с незначительной примесью глинисто-мергелевых образований. Более высокой гамма-активностью (6-8 мкр/час) характеризуются терригенные разрезы в нижней части межсолевого комплекса и в подсолевом терригенном комплексе всего Припятского прогиба. Все эти характеристики по гамма-активности определяются реальным отражением распределения в породах радиоактивных элементов – урана и тория. По результатам многочисленных лабораторных анализов определены закономерности распределения урана и тория в осадочных породах Припятского прогиба (табл. 1.).

Таблица 1

Граничные, средние и медианные содержания урана и тория в породах Припятского прогиба, $n \cdot 10^{-4}$ %

Комплекс, возраст, разрез	Порода	Колич. определений	Уран		Торий	
			граничное / среднее	медианное	граничное / среднее	медианное
Межсолевой D_3zd-el						
карбонатный	Известняки доломиты	30	$\frac{<2-4,5}{1,5}$	1,20	$\frac{2-3}{1,6}$	1,00
терригенный	Песчаники	15	$\frac{<2-10}{3,06}$	2,95	$\frac{2-20}{9,2}$	7,59
	Известняки	11	$\frac{<2-6}{1,90}$	1,87	$\frac{2-6}{3,3}$	2,80
Подсолевой D_3sr+sm+vr+ev	Известняки доломиты	30	$\frac{<2-4,5}{1,5}$	1,20	$\frac{2-11}{2,48}$	1,3
карбонатный						
Подсолевой терригенный		9	$\frac{<2-6}{1,6}$	1,26	$\frac{2-12}{2,9}$	2,44
D_3p-kn	Песчаники	8	$\frac{<2-6}{2,1}$	1,26	$\frac{2-14}{6,1}$	4,00
D_2st	Глины	7	$\frac{2-6}{2,3}$	2,89	$\frac{7-13}{8,86}$	10,00
D_2pr-nr	Песчаники	10	$\frac{2-6}{3,05}$	2,89	$\frac{2-14}{6,2}$	6,00
PR_3		13	$\frac{2-8}{3,95}$	1,7	$\frac{2-6}{2,89}$	2,80
Фундамент AR_{1+2}	Грано-диориты, гнейсы	26	$\frac{2-9}{2,1}$	2,35	$\frac{2-18}{6,75}$	7,13

По распределению концентраций урана и тория в породах Припятского прогиба установлена более высокая обогащенность ими терригенных осадков и метаморфизованных пород по сравнению с карбонатно-галогенными типами разрезов.

Весомую составляющую в радиогеохимическую обстановку разреза Припятского прогиба вносит также и флюидная составляющая, в которой концентрируются радиоактивные элементы. В Припятском прогибе изучено распределение радиоактивных элементов в подземных водах и нефти.

В разрезе осадочной толщи Припятского прогиба с учетом литологических особенностей выделяется ряд водоносных комплексов, характеризующихся соответствующими гидродинамическими,

гидрохимическими, геотермическими условиями, определяющими характер радиоактивности подземных вод. Распределение радиоактивных элементов в подземных водах подчиняется определенной закономерности, выражающейся в большей обогащенности радием вод межсолевого и подсолевого комплексов по сравнению с надсолевыми. В распределении урана в общих чертах наблюдается тенденция к уменьшению его концентрации с глубиной, контролируемая в значительной степени составом водовмещающих пород.

Подземные воды Припятского прогиба характеризуются закономерным изменением состава от гидрокарбонатно-сульфатно-кальциевых (магниевых) до хлор-кальций-натриевых. Каждому гидрогеологическому комплексу свойственны соответствующие содержания радиоактивных элементов, определяемые радиенасыщенностью, состоянием радиоактивного равновесия, миграционной способностью и другими особенностями элементов.

Абсолютное содержание урана в подземных водах Припятского прогиба изменяется в пределах $n\cdot10^{-6}$–$n\cdot10^{-7}$ г/дм^3, составляя в большинстве случаев последнее значение и достигая в единичных случаях $n\cdot10^{-5}$ г/дм^3. Содержание радия увеличивается от $n\cdot10^{-12}$ г/дм^3 (надсолевые отложения) до $n\cdot10^{-9}$ г/дм^3 (межсолевые и подсолевые отложения), и отмечается тенденция его роста с увеличением глубины.

Коэффициент радиоактивного равновесия характеризует степень нарушения равновесия между ураном и его промежуточным продуктом распада – радием и является показателем направленности изменения концентрации этих элементов в системе порода – вода. Чем выше величина отношения (Ra/U) $3{,}4\cdot10^{-7}$, тем в большей степени подземные воды обогащены радием.

В подземных водах Припятского прогиба радиоактивное равновесие значительно нарушено в сторону радия, и в межсолевых и подсолевых отложениях смещение достигает трех-четырех порядков.

В водах урановых месторождений содержание радия достигает $n\cdot10^{-10}$ г/л, и при этом равновесие нарушено в сторону урана. Обращает на себя внимание тот факт, что для всех типов вод, кроме вод, связанных с аномальными концентрациями урана в горных породах, радиоактивное равновесие нарушено в сторону радия. Это свидетельствует о высоких миграционных свойствах радия в водах, что характерно также и для подземных вод Припятского прогиба.

Коэффициент радиенасыщенности представляет собой отношение абсолютного содержания радия в воде к величине минерализации, умноженное на 10^{12}. В водах палеозоя ДДВ с фоновым содержанием радия величина отношения не превышает 4,0-4,4, а для вод, непосредственно связанных с залежами углеводородов, она изменяется в пределах 4,6-20. В отдельных случаях отмечается такое же изменение коэффициента радиенасыщенности и для подземных вод Припятского прогиба.

Коэффициент водной миграции урана и радия представляет собой относительную характеристику элементов и показывает их миграционные свойства в зависимости от геохимических условий.

Для оценки интенсивности миграции элементов предложен [3] показатель водной миграции $К_х$, равный отношению содержания химического элемента в минеральном остатке воды к его содержанию в горных породах. Расчетная формула для определения коэффициента представляется в виде:

$$K_x = \frac{m_x \cdot 100}{a_x \cdot n_x},$$

где: m_x – содержание элемента x в воде, г/л; $а_x$ – сумма минеральных веществ в воде, г/л; n_x – содержание элемента x в горной породе, г/г.

Чем выше значение коэффициента, тем интенсивнее водная миграция элемента. Коэффициент водной миграции урана в окислительных условиях во всех случаях больше единицы [3] и по интенсивности попадает в одну зону с кальцием, натрием и магнием. Величина коэффициента миграции урана в восстановительной среде весьма низкая и не превышает 0,01.

В зоне окисления для миграции радия благоприятными являются, с одной стороны, повышенная минерализация вод при низкой сульфатности, а с другой – слабоминерализованные воды со средним содержанием сульфатов.

В восстановительных условиях благоприятными факторами выщелачивания радия являются высокая минерализация рассолов, хлоридный состав, застойность недр.

По результатам анализа для Припятского прогиба полученные значения коэффициента водной миграции урана изменяются от 11,8 в водах палеоген-неогеновых отложений до $1{,}2 \cdot 10^{-4}$ и ниже в подсолевых и межсолевых отложениях. Порядок числовых значений для радия укладывается в пределах 0,09-19,3, принимая максимальные значения в верхней части разреза (табл. 2) В залегающих ниже комплексах величина коэффициента миграции радия составляет в среднем 0,43-2,01 (рис. 2).

По радиогеохимическим характеристикам подземные воды Припятского прогиба определяются следующими показателями:

– концентрация урана возрастает от $2\text{-}6 \cdot 10^{-7}$ г/дм^3 в подсолевом и межсолевом комплексах до $n \cdot 10^{-6}$ г/дм^3 в надсолевом комплексе;

– радиоактивное равновесие в нижних горизонтах значительно нарушено в сторону радия, составляя 3300-3500 в подсолевом и межсолевом комплексах, и в меньшей мере нарушено либо практически не нарушено в верхней части разреза в надсолевом комплексе, изменяясь в пределах 1,5-140.

Распределение проанализированных радиогеохимических параметров по разрезу Припятского прогиба приведено на рис. 2.

Таблица 2

Усредненные радиогеохимические свойства подземных вод Припятского прогиба

Комплекс, возраст	Уран, $n \cdot 10^{-7}$ г/дм^3	Радий, $n \cdot 10^{-12}$ г/дм^3	Коэффициенты			
			радио-активного равновесия	радие-насыщен-ности	водной миграции	
					уран, $n \cdot 10^{-3}$	радий
Грунтовые воды Pg, Ng, O	0,8-44	1-6,0	1,5-187 / 76	3,8-31	75-8000	1,2-9,6
Верхний надсолевой Mz, P	<1-57	<1-126	22-535 / 140	0,1-1,87 / 0,85	4,0-15 / 7,5	0,05-0,6 / 0,22
Нижний надсолевой D_3d, c	1,6-32	8-870	137-3620	0,31-5,5 / 1,73	0,2-21	0,05-0,9 / 0,35
Верхнесоленосный D_3lb	<1-6,5	177-446	977-2400	0,57-1,5 / 0,82	0,2-0,45	0,2-0,5 / 0,28
Межсолевой D_3zd-el						
нефтяные месторождения	<1-6,5	230-2630	2100-34000	0,1-6,93 / 2,01	0,1-0,75	0,05-3,46 / 1,0
подсолевые структуры	<1-5,6	16-818	480-18300	0,1-1,84 / 1,11	0,1-0,29	0,05-0,92 / 0,55
непродуктивные структуры	<1-7,3	63-180 / 80	397-1832 / 987	0,19-0,7 / 0,42	0,16-1,1 / 0,50	0,09-0,35 / 0,21
Подсолевой карбонатный						
нефтяные месторождения	<1-5,6	180-1830	880-25000	0,5-5,03 / 1,93	0,09-0,60	0,25-2,6 / 1,86
поисковые структуры	<1-3,26	75-750	401-13000	0,09-1,87 / 0,75	0,09-0,4	0,05-0,95 / 0,37
непродуктивные структуры	<1-3,0	57-294 / 145	1600-8700 / 3320	0,20-1,0 / 0,55	0,12-0,45 / 0,30	0,1-0,55 / 0,27
Подсолевой терригенный						
поисковые структуры	<1-65	36-2800	70-82000 / 6707	0,03-8,3 / 0,98	0,04-3,5 / 0,40	0,01-2,8 / 0,33
непродуктивные структуры	1,6-9,0	33-1020	723-5325 / 2290	0,3-3,65 / 1,14	0,1-0,60 / 0,22	0,1-1,28 / 0,41

Примечание. Числитель – граничные, знаменатель – средние значения.

В настоящее время в пределах Припятского нефтегазоносного бассейна установлено 90 месторождений нефти, содержащие более 250 залежей нефти. По физико-химическим свойствам установленные нефти условно можно разделить на две большие группы. К первой и основной группе относятся парафинистые, смолистые, мало- и среднесернистые, легкие по плотности (0,82-0,89 г/дм^3) разности. Они в основном характерны для нефтяных залежей северной части Припятского прогиба. Нефти центральной и южной частей характеризуются как смолистые, со средним и повышенным содержанием серы, тяжелые по плотности (более (0,90 г/дм^3).

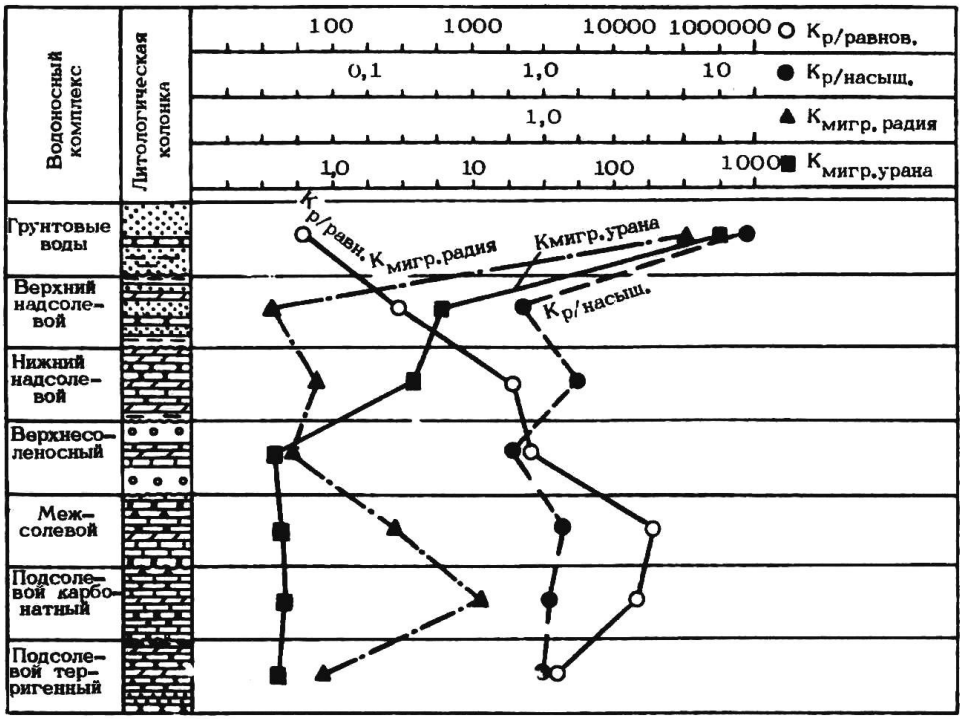


Рис. 2. Схема радиогеохимических свойств подземных вод Припятского прогиба

Ранее [2] выполнено определение содержания урана в нефтях Припятского прогиба (54 пробы) методом f-радиографии и содержание радия в 7 пробах нефти.

Содержание радия в нефтях межсолевых отложений Речицкого (скв. 135), Осташковичского (скв. 14б), Давыдовского (скв. 23) и Мармовичского (скв. 2, 8) месторождений изменяется от 166 х 10^{-14} до $2 \cdot 10^{-14}$ %. Для Осташковичского и Речицкого месторождений радиоактивное равновесие нарушено в сторону радия (К = 20-30), а на Давыдовском и Мармовичском месторождениях радий находится почти в равновесии с ураном (К = 1-7).

В нефтях подсолевых отложений содержание урана ниже и изменяется от $5{,}2 \cdot 10^{-8}$ % (Тишковская 95) до $17{,}9 \cdot 10^{-8}$ % (Речицкая 47). По составу нефти менее смолистые, менее сернистые, содержат больше быстровыкипаюших фракций, более легкие и более парафинистые. В наибольшей степени ураном обогащены нефти Речицкого месторождения, в пределах которого отмечается также весьма четкое распределение его по залежи, т.е. обогащение приконтурных частей по сравнению со сводовыми. Нефти центральной части Речицко-Вишанской зоны характеризуются низким содержанием урана (Тишковская, Сосновская, Давыдовская, Мармовичская площади), составляющим $(5{,}2\text{-}11{,}7) \cdot 10^{-8}$ %, а в западной части содержание его опять несколько повышается до $(13\text{-}14) \cdot 10^{-8}$ % (Вишанская, Восточно-Вишанская площади).

По результатам выполненного анализа по радиоактивности осадочного разреза Припятского прогиба можно сделать следующие основные выводы:

Распределение урана и радия в залежах нефти и приконтурных пластовых водах характеризуются значительным смещением радиоактивного равновесия в сторону радия как в приконтурных пластовых водах, так и в залежах нефти. Вместе с тем смещение равновесия в сторону радия в нефти не обеспечивается концентрацией урана в нефти. Это склоняет к варианту формирования аномальных концентраций радия в подошвенных водах за счет концентрационного его перераспределения из горных пород залежи через связанную воду в подошвенные пластовые воды. Регулятором такого перемещения служат объемные концентрации радия в местах перехода элемента из породы в водную фазу.

Литература

1. Москалев О.М. Ураноносность осадочных и кристаллических пород Беларуси. Мн., Беларуская навука, 2021. – 209 с.

2. Богомолов Г.В., Грибик Я.Г. Радиоактивность подземных вод как поисковый критерий нефтегазоносности (на примере Припятского прогиба). Мн., Наука и техника, 1982. – 148 с.

3. Евсеева Л.С., Перельман А.И., Иванов К.Е. Геохимия урана в зоне гипергенеза. М., Атомиздат, 1974. – 280 с.

ПАРАДОКСЫ ПРИРОДНОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ОКЛО

В.А. Домаренко
ЗСФ РАЕН, г. Томск

ОКЛО (Oklo) – крупное **месторождение урана** в **Габоне**, расположено между гг. Франсвиль и Ластурвиль. Открыто в 1968 г., эксплуатируется с 1977 г. Месторождение находится в западной части Франсвильского бассейна вблизи его границы с кристаллическим архейским **фундаментом**, в зоне влияния крупного **разлома**.



Рис. 1. Местоположение природного ядерного реактора Окло [1]

2 миллиарда 600 миллионов лет назад на территории нынешнего Габона и сопредельных с ним африканских государств образовалась огромная гранитная плита протяженностью во много десятков километров. (Эту дату, так же, как и другие, о которых пойдет речь, определили с помощью радиоактивных часов: по накоплению аргона из калия, стронция – из рубидия, свинца – из урана.)

В течение последующих 500 миллионов лет эта глыба разрушалась, превращаясь в песок и глину. Они смывались реками и в виде осадков, насыщенных органическим веществом, слоями оседали в дельте древней громадной реки. За десятки миллионов лет толщи осадков настолько увеличились, что нижние слои оказались на глубине в несколько километров. Сквозь них просачивались подземные воды, в которых были растворены соли, в том числе немного солей уранила (ион UO^{22+}). В слоях, насыщенных органическим веществом, были условия для

восстановления шестивалентного урана в четырехвалентный, который и выпадал в осадок. Постепенно много тысяч тонн урана осело в виде рудных «линз» размером в десятки метров. Содержание урана в руде достигло 30, 40, 50% и продолжало расти.

Месторождение стратиформное, рудовмещающая франсвильская серия (PR1) сложена терригенными осадочными породами, крайне невыдержана по сортированности и размерности зёрен. Рудные залежи – грубосогласные уплощённые **линзы** в наклонных (15-40°) **пластах песчаников**. Общая мощность линз в среднем 6-8 м, протяжённость 600х900 м.

На месторождении выделяются два типа руд: песчаники и **конгломераты**, обогащенные органическим веществом (содержат коффинит и **настуран** в ассоциации с **галенитом, халькопиритом**, пиритом), и хлоритовые **аргиллиты** с **уранинитом** и галенитом. **Руды** второго типа, развиты только в зонах «природных реакторов», значительно обеднены ^{235}U. Это явление, получившее название «феномен Окло», объясняется **выгоранием** ^{235}U в процессе работы «природного ядерного реактора» ***около 1,95 млрд лет назад***. Запасы урана – 15 тыс. т (в пересчёте на металл), содержание урана в рудах в среднем 0,4-0,5%, в отдельных участках (зоны «реакторов») 25-60%. Месторождение разрабатывается открытым способом (1984). Мощность вскрыши не более 30 м. Содержание U контролируется во время разработки радиокаротажем **скважин**. Ежегодно на месторождении добывается около 500 т U (в пересчёте на металл). Руда поставляется на предприятие «Мунана», работающее по схеме сернокислотного **выщелачивания** с экстракционным **извлечением** урана. Содержание урана в получаемом **концентрате** 73-74%.

Добычу урана на месторождении Окло осуществляет компания «Compagnie Uranium Francais» – «Comuf». Во время проведения обычного анализа образцов руды обнаружилось, что процентное содержание урана-235 в ней ниже нормы. Затем была зафиксирована недостача около 200 килограммов этого изотопа. Специалисты французского Комиссариата атомной энергетики забили тревогу. Ведь пропавшего вещества вполне достаточно для изготовления нескольких атомных бомб.

Дальнейшие исследования показали, что концентрация урана-235 в руднике Окло такая же, как в отработанном топливе из реактора атомной станции. Так что же это такое? Неужели ядерный могильник с возрастом 2 млрд лет?

Озадаченные атомщики нашли ответ в статье, опубликованной американскими учеными Джорджем Ветриллом и Марком Ингрэмом в 1956 году. Ученые высказали предположение о существовании в далеком прошлом природных ядерных реакторов. А Пол Курода, химик из Арканзасского университета, даже определил необходимые и достаточные условия для того, чтобы в теле уранового месторождения спонтанно возник процесс самоподдерживающегося расщепления.



Рис. 2. Расположение уранового месторождения на месте некогда действовавшего природного ядерного реактора [8-10]

В 1975 году в столице Габона Либревиле состоялась научная конференция, на которой обсуждался феномен Окло. Большинство ученых пришли к выводу, что рудник представляет собой единственный известный на Земле естественный ядерный реактор [1-7].

Что же это за условия? *В дельте реки на крепком базальтовом ложе отложился слой песчаника, богатого урановой рудой. В результате тектонической активности базальтовый фундамент погрузился в землю на несколько километров вместе с урановосным песчаником*. ***Песчаник растрескался, в трещины стала проникать грунтовая вода.***

В руднике Окло так же, как и в ядерных топках АЭС, топливо располагалось компактными массами внутри замедлителя. Замедлителем служила вода. В руде содержались глинистые «линзы». В них концентрация природного урана с обычных 0,5% повысилась до 40%. После того как масса и толщина слоев достигли критических размеров, возникла цепная реакция и установка начала работать.

Вода была естественным регулятором. Поступая в активную зону, она запускала цепную реакцию, которая приводила к испарению воды, уменьшению потока нейтронов и остановке реакции. Через 2,5 часа, когда активная зона реактора остывала, цикл повторялся.

Затем очередной катаклизм приподнял «установку» до прежнего уровня, либо уран-235 выгорел, и реактор прекратил работу.

Изотопная концентрация урана-235 была тогда 4,1%. И в какой-то момент оказались соблюденными все четыре условия, необходимых для начала цепной реакции, о которых рассказано выше. И – природный реактор заработал. В сотни миллионов раз вырос поток нейтронов. Это привело не только к выгоранию урана-235, месторождение Окло оказалось скопищем многих изотопных аномалий.

Заодно с ураном-235 «выгорели» все легко взаимодействующие с нейтронами изотопы. Оказался в зоне реакции самарий – и лишился своего изотопа ^{149}Sm. Если в природной смеси изотопов самария его 14%, то на месте работы природного реактора – всего 0,2%. Такая же судьба постигла

^{151}Eu, ^{157}Gd и некоторые другие изотопы редкоземельных элементов**.** ***Однако в ряду распада не оказалось радия.***

За время работы природный реактор выработал 13 миллионов киловатт-часов энергии, мощность его была невелика. Она в среднем была меньше 100 киловатт, что хватило бы для работы нескольких дюжин тостеров.



Рис. 3. Забой в залежи действующего реактора [10]

Однако в исследованиях маститых ученых просматриваются некоторые нестыковки в интерпретации материалов.

Вот лишь некоторые из них:

Парадокс 1. Оруденение сформировалось на глубине около двух км, в результате тектонических подвижек в рудные залежи попала **грунтовая** вода, что привело к началу работы реактора около 1,95млрд лет назад. Проникновение грунтовой воды на глубины два с лишним км – геологический нонсенс.

Парадокс 2. Содержания урана колеблются в пределах 0,4-0,5%, достигая в залежи реактора 20-60%. Исследователи связывают это со вторым типом руд – хлоритовыми аргиллитами с уранинитом и галенитом, хотя на рис. 3 в забое реактора четко видна вторичная слюдковая минерализация, что говорит о том, что руды выведены на поверхность и сформировали **новую, молодую залежь** с богатыми содержаниями.

Парадокс 3. Известные в мире физики-ядерщики [4-8], не увидели радия, непременного члена в ряду распада. Это является еще одним доказательством того, что возраст природного ядерного реактора Окло не 2 млрд лет, а в десятки раз меньше.

Выводы

Таким образом, на основании внимательного изучения имеющегося обширного материала следует:

- первичное оруденение месторождения Окло с запасами 15 000 т сформировано на глубинах около 2 км 2 млрд лет назад;

- средние содержания урана в первичных рудах колеблются в пределах 0,4-0,5%;

- в результате тектонических подвижек, в том числе и в неоген-четвертичное время, часть залежей была выведена на поверхность (рис. 3) и подвержена окислению с образованием вторичной молодой урановой минерализации с богатыми содержаниями до 20-60%;

- в близповерхностных условиях попадание на богатую вторичную руду грунтовых вод приводило к цепной реакции;

- реактор прекратил работу в связи с тем, что богатые вторичные руды были отработаны;

- соответственно, этому реактору максимум лет 500. И вот еще почему. Для протекания реакции нужны очень специфичные условия. И они должны быть ПОСТОЯННЫМИ! Любое отклонение приведет или к затуханию или к перегоранию со всеми вытекающими последствиями.

Литература

1. Горная Промышленность, №2 1997.
2. Мешик А. (2006). “Древний ядерный реактор”. В мире науки (2): 40–45.
3. Содди Ф. История атомной энергии. М., Атомиздат, 1979.
4. Чоппин Г. и др. Ядерная химия. М., Энергоатомиздат, 1984.
5. Шляхтер А.И. Прямая проверка постоянства фундаментальных констант по данным о естественном ядерном реакторе Окло // Препринт ЛИЯФ. – 1976. – Сентябрь (№ 260).
6. Шуколюков А.Ю. Уран. Природный ядерный реактор / Химия и Жизнь №6, 1980 г., с. 20-24.
7. Kuroda P.K. (1956). “On the Nuclear Physical Stability of the Uranium Minerals”. Journal of Chemical Physics. 25: 781–782, 1295–1296. Bibcode:1956JChPh..25..781K. DOI:10.1063/1.1743058.
8. Meshik A.P. (November 2005). “The Workings of an Ancient Nuclear Reactor”. Scientific American.
9. Shlyakhter A.I. Direct test of the constancy of fundamental nuclear constants (англ.) // Nature. – 1976. – 25 November (vol. 264). – P. 340.
10. http://www.mining-media.ru/ru/article/newtech/1764-yaderno-fizicheskaya-kontseptsiya-formirovaniya-mineralnykh-obrazovanij.

РАДИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ В ПРЕДЕЛАХ ЗАПАДНО-ЗИАЭТДИНСКОЙ УРАНОВОРУДНОЙ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ

М.Н. Жураев, М.М. Жураев, Г.И. Курбанова
ТГТУ им. Ислама Каримова, г. Ташкент, Республика Узбекистан

Западно-Зиаэтдинская перспективная площадь расположена в северо-восточной части Зирабулак-Зиаэтдинского урановорудного района, в 2-15 км к востоку от рудных залежей месторождения урана Северный Майзак. Кызылтепинская (Западно-Зиаэтдинская) площадь приурочена к юго-западной краевой части Зеравшанского артезианского бассейна, ограниченного с северо-востока Нуратинскими, а с юга – Зиаэтдин-Зирабулакскими и Каратепинскими горами [1].

На исследуемой площади работ радиологические особенности уранового оруденения являются типичными для инфильтрационных месторождений учкудукского типа, т.е. характеризуются нарушением радиоактивного равновесия в сторону недостатка радия в урановых рудах и развитием радиевых ореолов на его границах, что определяет довольно сложную картину изучения радиологии руд [2].

На первых этапах изучения урановых руд на площади предусматривалась оценка рудоносности (в отложениях кампанского, сантонского и коньякского горизонтов верхнего мела) с Кpp = 75 %, плотность руд равная 2,0 г/см^3, влажность – 11 %, пересчетный коэффициент – 115 мкР/ч на 0,01 % равновесного урана, поправка на «отжатие» радона – 1,0, плотность бурового раствора – 1,2 г/см^3 [3].

Радиологические особенности уранового оруденения на Западно-Зиаэтдинской площади изучены по результатам анализа керновых проб, а также по данным гамма-каротажа. Аналитические определения U и Ra в пробах выполнены в ЛК ГУП «Уранредметгеология» методами рентгеноспектрального (РСА) и гамма-спектрометрического анализов (ГСА) [5].

Изучение геофизических характеристик Западно-Зиаэтдинской площади, разделение пород разреза на литолого-фильтрационные типы (ЛФТ), определение стратиграфических границ осуществлялись по результатам комплексной интерпретации диаграмм геофизических исследований скважин методами электрокаротажа (КС+ПС), гамма-каротажа (ГК), инклинометрии (ИНК), в качестве дополнительных методов использовались записи кривых кавернометрии, а также керновый материал скважин с целью составления геологического разреза и предварительного изучения промышленной характеристики рудовмещающих горизонтов. Для увязки керна по глубине проводилась радиометрическая документация керна радиометрами СРП-68, СРП-88.

На всех месторождениях урана гидрогенного (песчаникового) типа, формирующихся в проницаемых водоносных горизонтах в зоны пластового окисления (ЗПО), вокруг рудных тел наблюдаются радиевые ореолы, которые характеризуются достаточно высокими значениями интенсивности гамма-излучений, но забалансовыми содержаниями урана [3]. Их следует учитывать по результатам количественных определений. Для оценки достоверности геофизических определений радиевых ореолов необходимо учитывать бортовые значения радия от его среднего значения по данным геологического опробования и установить зависимость CRa бортового от его среднего содержания.

Установить эту зависимость на Западно-Зиаэтдинской площади на данном этапе не представляется возможным, так как для получения достоверной зависимости необходимо иметь достаточное количество аналитических определений содержаний урана и радия у кровли и подошвы рудных интервалов, сгруппированных в зависимости от их принадлежности к геохимическим зонам, литологическим типам, технологическим сортам руд и морфологических особенностей залежей [4]. При этом в каждой группе должно быть не менее 30 определений бортовых и средних содержаний радия (рис. 1). Поэтому при количественной интерпретации данных гамма-каротажа на Западно-Зиаэтдинской площади радиевые ореолы определялись с помощью усредненного графика зависимости бортового содержания радия от его среднего значения в рудном интервале, на основе обобщения многолетних работ на гидрогенных месторождениях Центрально-Кызылкумской и Сырдарьинской урановорудных провинций.

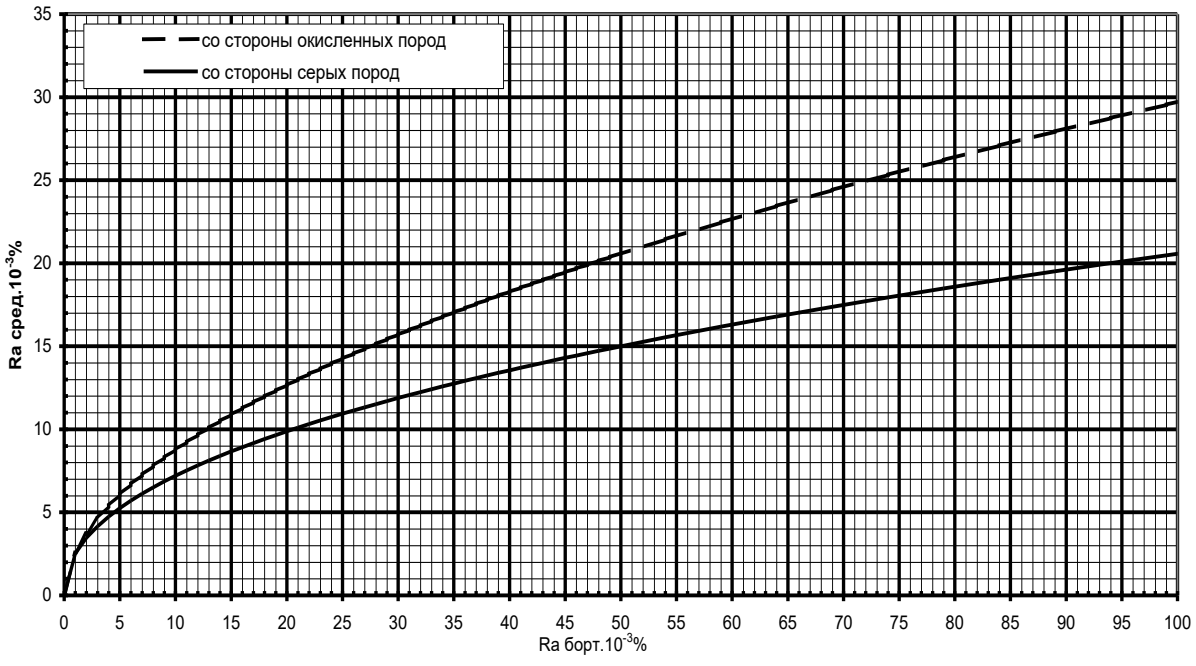


Рис. 1. График зависимости содержаний Ra среднего в рудном интервале: со стороны окисленных пород $y=2.5939x^{0.5294}$, со стороны серых пород $y=2.5222x^{0.4558}$

Плотность, влажность руд и пород рудовмещающих горизонтов определялись по результатам лабораторных исследований монолитов, отобранных при бурении гидрогеологической скважины (11 монолитов из 1 скважины). Монолиты отобраны из керна преимущественно проницаемых пород.

При гамма-каротаже с применением скважинного прибора диаметром 60 мм на гидрогенных месторождениях изменение плотности пород, согласно инструкции, ограничено интервалом 1,5–2,5 г/см^3 [5].

Плотность пород сантонского рудовмещающего горизонта по данным исследований 11 монолитов, отобранных из 1-й гидрогеологической скважины, в целом меняется в интервале 1,32–1,98 г/см^3. В связи с недостаточным (малым) объемом определений водно-физических свойств при количественной интерпретации данных гамма-каротажа плотность рудовмещающих пород была принята равной 2,0 г/см^3, т.е. согласованная проектом работ, которая не вносит погрешности в определение коэффициента $B_к$.

Так как линейные запасы и содержание урана в рудном интервале подсчитываются для воздушно-сухого состояния руды, а гамма-каротаж производится в скважинах непосредственно после бурения, то в результаты количественной интерпретации вводится поправка на влажность. Влажность пород сантонских рудовмещающих отложений по данным исследований 11 монолитов из 1-й гидрогеологической скважины в целом меняется от 10,72 до 15,54 %. В связи с недостаточным (малым) объемом определений водно-физических свойств поправка на влажность при расчетах параметров рудных интервалов была принята равной 17 %, т.е. по данным работ, проведенных на сопредельной площади (участок Северный Майзакского месторождения).

При количественной интерпретации данных гамма-каротажа кроме поправочных коэффициентов влажности (W), плотности руд ($\rho_{руд}$) применяются коэффициенты радиоактивного равновесия между ураном и радием ($К_{рр}$), а также радиоактивного равновесия между радоном и радием ($П_э$).

На Западно-Зиаэтдинской площади в сантонском рудовмещающем горизонте величина $К_{рр}$ изменяется от 0,25 до 1,13, в среднем составляет 0,65 (табл.1). Величина поправки на отжатие радона изменяется от 1,01 до 1,48, в среднем составляет 1,15, табл. 2 [4, 5].

Таблица 1

Таблица вывода средних коэффициентов радиоактивного равновесия по сантонскому горизонту Западно-Зиаэтдинской площади

Рудовмещающий горизонт	Количество интервалов	Сумма мощностей, м	Суммарные метропроценты 10^{-4}%		Средний $К_{рр}$	Средневзвешенный $К_{рр}$	S
			уран	радий			
K_2st	22	20,95	7950,7	5204,3	0,65	0,65	0,23

В следующей таблице приводятся результаты выводов суммарных средних значений коэффициентов эманирования радона ($П_э$) по проницаемым породам сантонского горизонта.

Таблица 2

Сопоставление результатов гамма каротажа и опробования керна на радий по сантонскому горизонту

Наименование	Сумма мощностей м	По опробованию	По гамма-каротажу	Мсоп/Мсгк Поправка на отжатие радона
		mC, Ra 10^{-4}	mC, Ra 10^{-4}	
Рудовмещающий горизонт (K_2st)				
Сумма	15,90	4235,2	3680	1,15
Среднее	1,14	302,51	262,86	
S – сред.квадр. отклонение				0,17

Статистическая обработка результатов сопоставления выполнялась в соответствии с инструктивными требованиями.

Таким образом, на Западно-Зиаэтдинской площади выявлены урановые оруденения в отложениях кампанского, сантонского и коньякского горизонтов верхнего мела, но изучение радиологических свойств касается только сантонского горизонта. По кампанскому и сантонскому горизонтам радиологические свойства не изучены и поправочные коэффициенты не выведены в связи с недостаточным количеством аналитических результатов. Для количественной интерпретации гамма-каротажа коэффициент радиоактивного равновесия (Крр-0,75) и поправка на отжатие радона (Пэ-1,0) приняты согласно проекту. Учитывая вышеизложенное, для изучения представительности в дальнейшем целесообразно предусматривать введение поправочных коэффициентов.

Выводы

- при изучении геофизических характеристик на площади применялся рациональный комплекс различных методов исследований;
- получены данные по определению основных параметров урановых рудных тел (мощность, содержание);
- выполнено литолого-фильтрационное расчленение рудовмещающих отложений уранового оруденения (керновое опробование, электрокаротаж, гамма-каротаж);
- получены объективные сведения о количестве и качестве уранового оруденения, а также фильтрационных особенностях рудовмещающего горизонта.

Литература

1. Головин Е.А., Андреев В.В., Ларкин Э.Д. и др. Геология осадочного чехла Центральных Кызылкумов. М., ВИМС, 1974 г.

2. Печёнкин И.Г., Грушевой Г.В. Металлогения ураноносных осадочных бассейнов Евразии. Монография, М., 2015. 223 с.

3. Оловов Х.Х. и др. Отчет. «Опережающие специализированные поисковые работы на уран в пределах Западно-Зиаэтдинской перспективной площади в северо-западных предгорьях Зиаэтдинских гор». Т., 2020. Фонды ГУП «Уранредметгеология».

4. Рунов Б.Н. и др. Составление комплекта специализированных погоризонтных карт масштаба 1:50 000 рудоносных формаций осадочного чехла по отдельным локальным площадям в пределах Центрально-Кызылкумской провинции. Задание 3-93 за 1996-2002 гг. Т., 2003 г. Фонды НПЦ «Геология драгоценных металлов и урана» ГП НГМК.

5. Инструкция по гамма-каротажу при поисках и разведке урановых месторождений. Госкомгеология, 2007 г.

МИНЕРАГЕНИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ И ГЛАВНЫЕ ЭПОХИ ЭНДОГЕННОГО РУДООБРАЗОВАНИЯ НЕЧЕРСКОГО ПОДНЯТИЯ (СЕВЕРНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

В.А. Калина, Л.Б. Макарьев
ФГБУ «ВСЕГЕИ», г. Санкт-Петербург

Практический интерес к дорифейским поднятиям Байкало-Патомского нагорья, одним из которых является Нечерское, вызван их определившимися перспективами на золото, уран, редкие металлы и реальными предпосылками выявления в промышленных масштабах новых объектов этих и других полезных ископаемых. В статье рассматривается минерагенический потенциал Нечерского поднятия, его рифейского обрамления и анализируются главные эпохи эндогенного рудообразования в известных и прогнозируемых геолого-структурных обстановках.

Общие сведения. Нечерское гранит-метаморфическое поднятие (рис. 1) располагается на сочленении структур Сибирской платформы (Березовского прогиба и Чарского поднятия Алданского щита) и Саяно-Байкальской складчатой области, входит в состав Байкало-Патомской краевой системы, где разделяет рифейские образования Челончено-Жуинского перикратонного прогиба и Мамско-Бодайбинского синклинория [1, 10]. Граница Сибирской платформы и Саяно-Байкальской складчатой области проходит по системе меридиональных разломов Жуинского краевого шва, а границей внешней перикратонной и внутренней синклинорной зон Байкало-Патомской краевой системы служит Чипикетско-Нечерский пограничный разлом (рис. 1 Б).

В геологическом строении Нечерского поднятия (рис. 2, 3) принимают участие позднеархейские метаморфические образования (нечерская серия), раннекарельские осадочно-метаморфизованные отложения (кевактинская серия), ультраметаморфические гранит-мигматиты (Лонгдорский, Олонгдинский массивы) и регионально развитые на Нечерском и других поднятиях позднекарельские гранитоиды чуйско-нечерского комплекса (Ченчинский массив и др.), сформировавшиеся соответственно в обстановках протоплатформы (AR_2), активной континентальной окраины (KR_1) и коллизии (KR_2).

Обрамление поднятия формирует рифейский осадочный чехол, сложенный продуктами эпиконтинентального пенеплена (пурпольская свита, RF_1), рифтогенеза (медвежевский комплекс, RF_{1-2}) и вышележащими терригенно-карбонатными отложениями континентального склона и шельфа пассивной континентальной окраины в составе свит балаганахского (RF_2), дальнетайгинского и жуинского (RF_3) горизонтов. Высокозрелые осадки пурпольской свиты (формация переотложенных кор выветривания) и вулканогенно-осадочные образования медвежевского вулканического комплекса непосредственно обрамляют Нечерское

поднятие и сохранены в его внутренней части в небольших останцах и грабенах [1]. Основание пурпольской свиты маркируется структурно-стратиграфическим несогласием, имеющим региональное развитие и маркирующее значение в краевых структурах Байкало-Патомского нагорья.

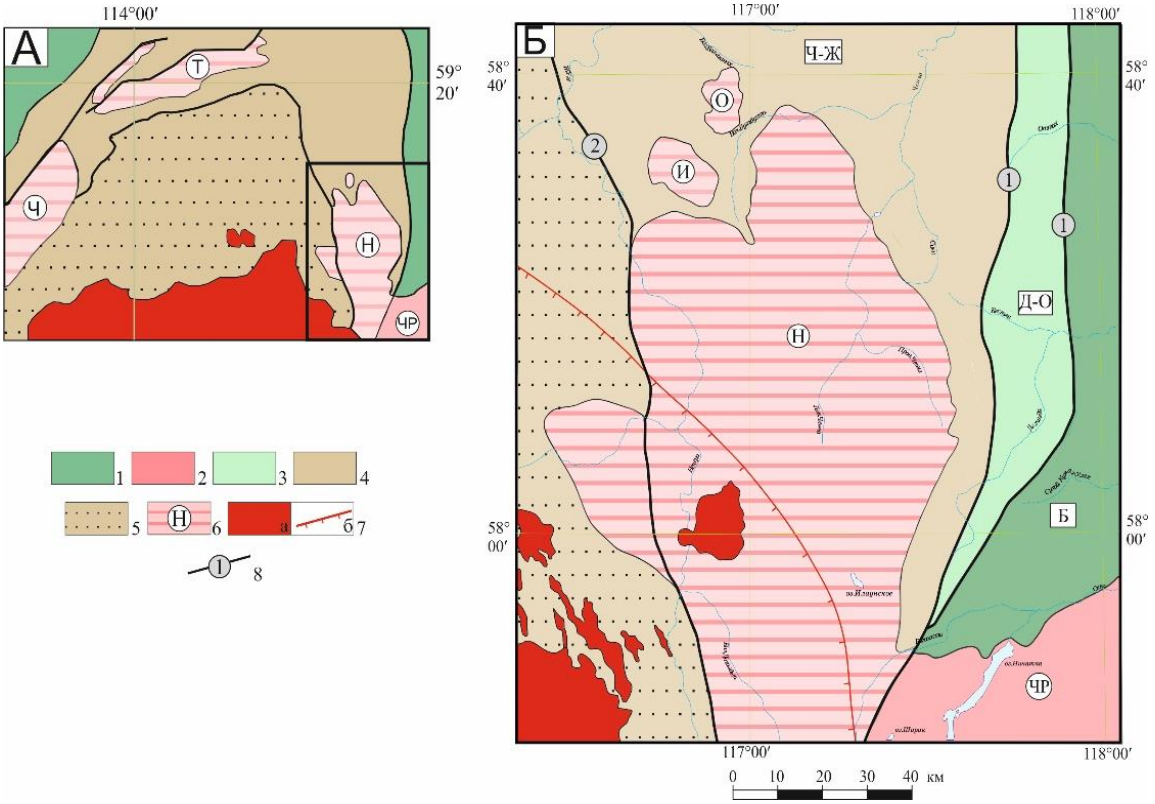


Рис. 1. Схема расположения (А) и тектонического районирования (Б) Нечерского поднятия и его обрамления.

1 – плита Сибирской платформы, в т.ч. Березовский прогиб (Б). 2 – Алданский щит, в т.ч. Чарское поднятие (ЧР). 3 – Пограничный Джелиндинско-Оттахский горст (Д-О) (на рис. Б). 4-6 – Саяно-Байкальская складчатая область, Байкало-Патомская краевая система: 4 – Прибайкало-Патомская перикратонная система, в т.ч. Челончено-Жуинский перикратонный прогиб (Ч-Ж). 5 – Мамско-Бодайбинский синклинорий. 6 – дорифейские поднятия фундамента (Ч – Чуйское, Т – Тонодское и Н – Нечерское, в т.ч. О – Онаевский, И – Истанахский выступы). 7 – массивы палеозойских гранитоидов Ангаро-Витимского ареал-плутона (а) и его границы (б). 8 – структурные швы и их названия на рис. Б: 1 – Жуинский, 2 – Чипикетско-Нечерский

Более поздние геологические события связаны со становлением палеозойского гранитоидного Ангаро-Витимского ареал-плутона и мезозойской тектоно-магматической активизацией Сибирской платформы. На анализируемой территории эти события выражены коллизионными процессами, протекавшими в раннем и позднем палеозое (покровно-складчатые дислокации, зональный метаморфизм силлиманит-кианитового типа, сопряженное ультраметаморфическое гранитообразование, O-S; гранитоидный магматизм, C_3-P_1), а также магматической активизацией в позднемезозойское время (щелочной магматизм, J_3-K_1).

Особенности минерагении. Основной металлогенический потенциал Нечерского поднятия формируют месторождения и рудопроявления урана, россыпного и рудного золота, редких металлов и редкоземельных элементов, а открытые на этой территории месторождения этих металлов составляют минерально-сырьевую базу Северного Забайкалья. Объекты россыпного золота, известные в промышленных масштабах в северной части поднятия (крупные, средние и малые россыпи долины р. Бол. Бульбухта), в рамках данной статьи не анализируются.

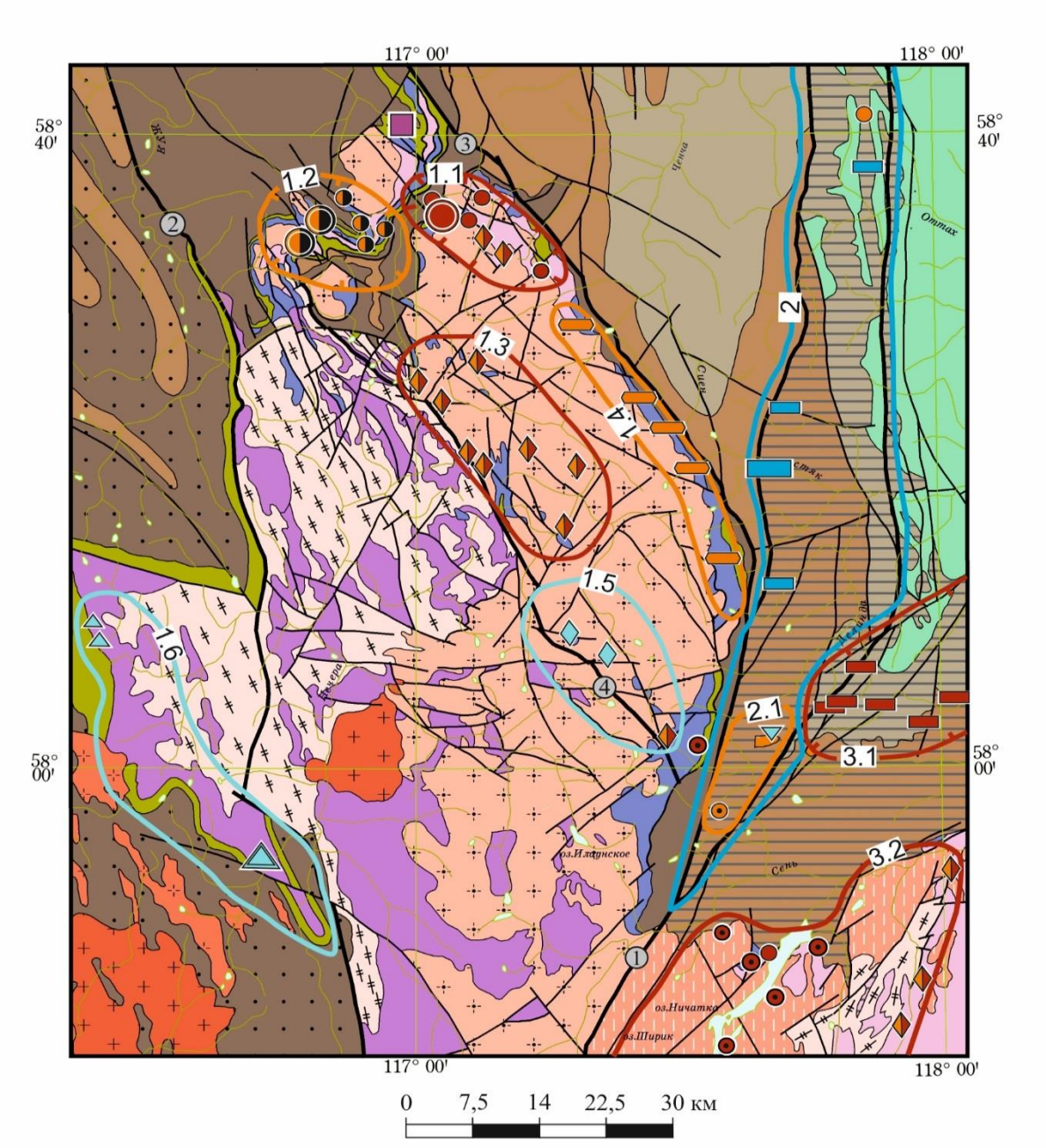


Рис. 2. Прогнозно-геологическая карта Нечерского поднятия и его обрамления (усл. обозн. см. рис. 3)

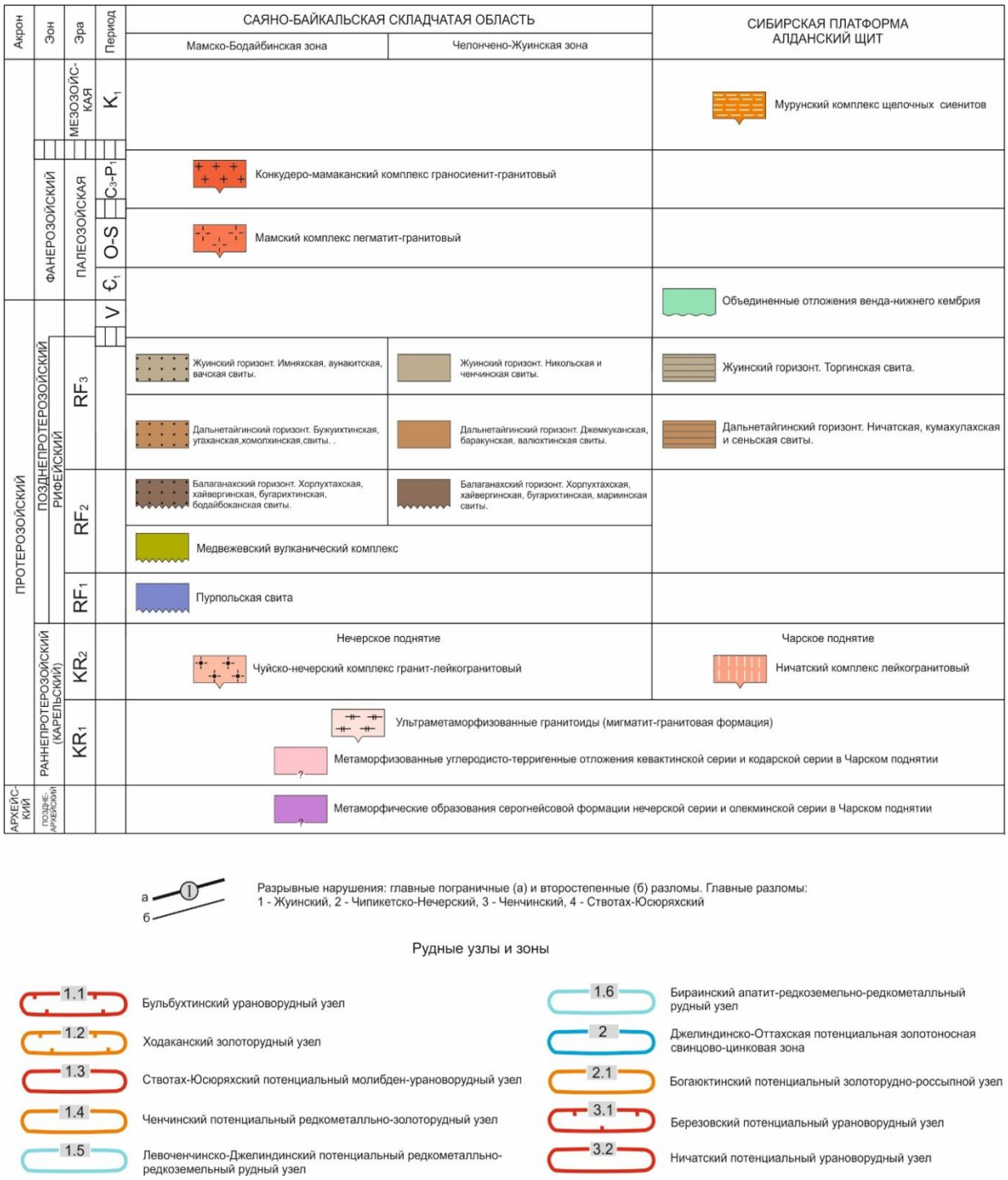


Рис. 3 Условные обозначения к прогнозно-геологической карте (рис. 2)

Уран. Нечерское, а также Тонодское поднятия Байкало-Патомской краевой системы являются определившимися урановорудными территориями. К настоящему времени здесь открыты месторождения урана (Чепок на Нечерском поднятии и Туюканское на Тонодском поднятии) в зонах дробления гранитов и вмещающих пород, относящиеся по классификации МАГАТЭ к жильно-штокверковому гидротермальному геолого-промышленному типу, а также целый ряд урановых и торий-урановых рудопроявлений так называемого «порфирового типа» в кремнещелочных метасоматитах и пегматитах. Урановое оруденение на

этих территориях формировалось на позднекарельском и, частично, ранне-среднерифейском этапах соответственно карельской и байкальской металлогенических эпох, было регенерировано в позднекаледонское и окончательно сформировано в раннегерцинское время [4, 9].

На анализируемой территории известные урановые и комплексные урановые объекты распространены в Нечеро-Ничатском рудном районе [1], охватывающем площадь развития позднекарельских гранитоидов Ченчинского, Ничатского массивов и вмещающих раннекарельских образований, где сгруппированы в Бульбухтинском, Ствотах-Юсюряхском рудных узлах на Нечерском поднятии и в Ничатском узле прилегающего Чарского поднятия (см. рис. 2).

Бульбухтинский урановорудный узел. В локализации уранового оруденения Бульбухтинского рудного узла отчетливо проявлены магматический, литологический, радиогеохимический, структурно-тектонический и гидротермально-метасоматический критерии. Магматический критерий выражен наблюдаемой пространственно-временной связью оруденения с гранитоидами позднекарельского чуйско-нечерского комплекса Ченчинского массива, преимущественно с лейкогранитами умеренной щелочности. Определяющим литологическим фактором рассматриваются вмещающие раннекарельские углеродсодержащие сланцево-метапесчаниковые отложения кевактинской серии (ходоканская свита), к ксенолитам и участкам насыщения которых тяготеют наиболее богатые урановорудные тела. В радиогеохимическом отношении гранитоиды Ченчинского массива и вмещающие породы выделяются выраженной урановой (6-8 г/т) и торий-урановой специализацией. Урановое оруденение контролируется продольными северо-западными тектоническими нарушениями Ченчинской зоны разломов (см. рис. 2) и локализуется в узлах сочленения с разломами меридиональной и северо-восточной ориентировок, представляющих собой ореолы телескопированного проявления раннего кремнещелочного метасоматоза (микроклинизации, альбитизации, грейзенизации) и последующих изменений березитового (пропилит-березитового) типов. Положение Бульбухтинского рудного узла в краевой северо-западной части Нечерского поднятия с широко развитыми здесь перекрывающими отложениями нижнерифейского чехла (пурпольской свиты) считается благоприятным (эрозионно-тектоническим) фактором сохранности уранового оруденения. На площади Бульбухтинского рудного узла известны более раннее метасоматическое оруденение порфирового типа, но основную роль играют урановорудные объекты в березитах, включая месторождение Чепок.

На месторождении Чепок ширина урановорудного поля составляет около 0,5-1,5 км при протяженности более 3 км. Проявлен ранний кремнещелочной метасоматоз, наложенные карбонат-хлорит-альбитовые, кварц-биотит-хлорит-серицитовые и кварц-серицит-гидрослюдистые

изменения. Выявлено около 40 рудных тел прожилкового-вкрапленного типа мощностью до 3,5 м, в том числе с богатым урановым оруденением при содержании урана 0,3-0,735% при среднем его содержании 0,174 %. Рудные тела локализуются в швах милонитов, брекчий, катаклазитов и представлены в основном сближенными жилами и линзами кварц-серицит-биотит(флогопит)-хлоритового состава с уранинитом, браннеритом, настураном, реже коффинитом в ассоциации с апатитом, молибденитом, пиритом, халькопиритом, галенитом и другими сульфидами. Урановое оруденение формировалось в несколько стадий: уранинит-молибденитовую (с титанатами урана), настуран-сульфидную и пострудного окварцевания с кальцитом, флюоритом и образованием микропрожилков коффинита. Уранинит образует густую вкрапленность и гнезда, настуран развивается в виде сетчато-прожилкового выполнения и цемента микробрекчий [1, 4, 5, 12, 15]. Оруденение полихронное и телескопированное с формированием основной массы первичных уранинитовых руд в раннем протерозое [9].

Для уранового месторождения Чепок оценены прогнозные ресурсы урана по категории P_1 в количестве 10,7 тыс. т и по категории P_2 в количестве 16,2 тыс. т. Ресурсы урана центрального блока месторождения категории P_1 в количестве 1,68 тыс. т могут рассматриваться в качестве запасов категории C_2. Для остальных подобных рудопроявлений в сходной структурной обстановке (Куликач, Кульбарокун, Кольцевое) суммарные прогнозные ресурсы составляют 5,1 тыс. т по категории P_1 и 10,4 тыс. т по категории P_2. Общий потенциал урана Бульбухтинского рудного узла оценивается в 58,6 тыс. т, в том числе 15,8 тыс. т по категории P_1, 26,6 тыс. т по категории P_2 и 16,2 тыс. т по категории P_3 [1, 12, 13, 15].

Ствотах-Юсюряхский потенциальный молибден-урановорудный узел характеризуют рудопроявления «порфирового типа» в кремнещелочных метасоматитах и пегматитах, генетически связанных с позднекарельскими гранитоидами чуйско-нечерского комплекса. Оруденение контролируется приразломными бластотектонитами Ствотах-Юсюряхского и субпараллельных северо-западных разломов (см. рис. 2). Представлено линзами кварц-биотит-полевошпатовых, кварц-биотитовых метасоматитов, биотитизированных пегматоидных пород, минерализованных торийсодержащим уранинитом, ураноторитом, молибденитом и апатитом, а также ортитом и монацитом. Урановое оруденение Ствотах-Юсюряхского рудного узла характеризуется в основном бедными урановыми рудами, среди которых присутствуют комплексные молибден-урановые (молибденит-уранинитовые) с кондиционными содержаниями молибдена [2, 5, 8].

Суммарный ресурсный потенциал урана в рудопроявлениях Ствотах-Юсюряхского рудного узла по данным проведенных ПГО «Иркутскгеология» поисковых и поисково-съемочных работ

(Можаровский и др., 1988, Шеметов и др., 1989) составляет 35,3 тыс. т, в том числе по категории P_1 – 17 тыс. т и P_2 – 18,3 тыс. т [1].

На юге Нечерского поднятия имеются прямые признаки проявления мезозойского золото-уранового оруденения в гумбеитах, которое, по данным специализированных исследований ВСЕГЕИ (Дитмар и др., 1983), имеет более масштабное развитие на площади Ничатского потенциального рудного узла, в прилегающей северо-западной части Чарского поднятия [13].

Золото рудное. Характеризуется двумя типами оруденения – определившимся золоторудным (золото-сульфидно-кварцевым) в зонах складчато-разрывных дислокаций (СРД) и золотоносным конгломератовым. Оруденение этих типов распространено в Ходоканском и Ченчинском узлах.

Ходоканский золоторудный узел охватывает площадь развития нижнерифейских отложений пурпольской свиты, обрамляющих на северо-западе Нечерское поднятие и прилегающие Окаевский и Истанахский выступы (см. рис. 2). Данная обстановка выделяется интенсивным проявлением раннепалеозойских покровно-надвиговых (складчато-надвиговых) процессов, определяющих формирование золото-сульфидно-кварцевого оруденения ходоканского типа. Оруденение этого типа впервые охарактеризовано по результатам специализированных поисковых работ ПГО «Сосновгеология» и ВСЕГЕИ (Царук и др., 2004) на примере месторождений Ходоканской группы. Рассматриваемое оруденение контролируется сближенными зонами СРД, выраженными интенсивным смятием, рассланцеванием, трещиноватостью окружающих пород и проявленными в основании рифейского чехла вдоль границы с подстилающими раннепротерозойскими образованиями. Складчато-разрывные дислокации сопровождаются ореолами интенсивных грейзен-березитовых изменений (кварц, пирит, роскоэлитоподобный мусковит, серицит, хлорит) с жильно-прожилковым окварцеванием и прожилково-вкрапленной сульфидизацией. Охарактеризованные тектоно-метасоматические процессы охватывают нижнекарельские отложения пурпольской свиты, подстилающие раннепротерозойские гранит-метаморфические и перекрывающие ранне-среднерифейские (медвежевский вулканический комплекс) образования, но основное оруденение концентрируется в виде залежей исключительно в отложениях пурпольской свиты. Благоприятными для рудолокализации являются дифференцированные по составу пачки пород пурпольской свиты, представленные переслаивающимися кварцито-песчаниками и глиноземистыми сланцами (с пирофиллитом, хлоритоидом и кианитом), в которых золоторудные тела приурочены к горизонтам глиноземистых сланцев [9].

На наиболее изученном месторождении Ходокан-VI вскрытая мощность золотоносной субпластовой залежи мусковитизированных, серицитизированных, хлоритизированных, окварцованных и сульфидизированнных пород пурпольской свиты достигает 40 м. На участках наиболее интенсивных изменений формируются кварцевые слюдиты, насыщенные тонкопрожилковым кварцем и прожилково-вкрапленной сульфидной минерализацией. С этими образованиями, а также отдельными кварцевыми жилами связаны золоторудные тела. Сульфидная минерализация представлена в основном пиритом, халькопиритом и пирротином. Золото на месторождении высокопробное. Кроме самородного золота, встречаются теллуриды золота, серебра и минералы серебра в форме сульфовисмутидов и сульфоарсенидов. Содержание золота от 1,29 до 10,92 г/т при среднем 3,93 г/т (в кварцевых жилах до 80 г/т). Месторождение образовалось в ходе раннепалеозойских коллизионных процессов (440-490 млн лет), а источником золота считаются первично золотоносные породы пурпольской свиты и подстилающей коры выветривания [3].

По данным поисково-оценочных работ ПГО «Сосновгеология» (Царук и др., 2004), прогнозные ресурсы золота категории P_1 месторождения Ходокан-VI составляют 5,7 т, категории P_2 – 52 т, а общие ресурсы Ходоканского золоторудного узла оценивают более 95 т золота [1, 12]. В настоящее время площадь Ходоканского рудного узла является перспективным объектом для лицензирования на рудное и россыпное золото.

Ченчинский потенциальный редкометалльно-золоторудный узел также выделяется в границах площади развития отложений пурпольской свиты, прослеживающихся в виде прерывистой полосы вдоль восточного склона Нечерского поднятия [1]. Золотоносность Ченчинского рудного узла связана с кластогенными (палеороссыпными) концентрациями золота и сопутствующих металлов в базальных кварцевых конгломератах и гравелитах пурпольской свиты. Минерализованные кварцевые конгломераты образуют в основании пурпольской свиты от одного до трех сближенных линзующихся горизонтов мощностью от 0,1-1 до 6 м (чаще 0,5-1,5 м), отдельные из которых имеют протяженность от 0,8 до 2 км при общей протяженности в пределах Ченчинского рудного узла до 30 км.

Золотоносные кварцевые конгломераты существенно мелкогалечные, сцементированные кварцитовидным песчанистым материалом с серицитом, гематитом, хлоритом и рудными минералами. Основными рудными минералами, кроме золота, являются ториевый монацит, циркон, ильменит, ильменорутил. Присутствует пирит. Реже отмечаются торит, ксенотим, касситерит, а также тантало-ниобаты. Рудные тела – пласты и линзы мелкогалечных конгломератов с золото-циркон-монацитовой минерализацией. Содержание золота варьирует в широких пределах от 0,1-0,5 до 1,6 г/т, а в более богатых сечениях достигает 5-8 г/т. Выявлено самородное золото нескольких типов (генераций), образующее

скопления в обогащенных «шлиховыми» минералами пропластках. Наиболее распространенное ранее золото – пластинчатое, окатанное (кластогенное), более позднее – кристаллическое и пузырчатое золото, переотложенное в условиях свободного роста в открытых полостях. Сходные условия формирования имеют ураноносные конгломераты Канадского щита [9].

Известные рудопроявления золота в конгломератах Ченчинского рудного узла были открыты в основном при проведении геолого-съемочных работ масштаба 1:50 000 (Дорожков, Потороченко, 1987), при этом наиболее золотоносным рассматривался Сиен-Туруктахский участок развития конгломератов протяженностью около 8 км. Для этого участка были рассчитаны прогнозные ресурсы золота категории P_3 в количестве 25 т [1], поставленные на учет в «Читанедра» (ныне в Забайкальском крае).

Редкие земли, тантал, ниобий. Редкоземельно-редкометалльное оруденение имеет промышленные перспективы в Бираинском рудном узле и установлено в охарактеризованном Ченчинском, а также Левоченчинско-Джелиндинском потенциальных рудных узлах.

Бираинский апатит-редкоземельно-редкометалльный узел располагается в западной краевой части Нечерского поднятия, на границе с рифейским Мамско-Бодайбинским синклинорием (см. рис. 2), где объединяет Бираинское месторождение и подобные рудопроявления карбонатитового типа (Атычах, Олонгда и др.), выявленные при поисково-съемочных работах на этой территории (Черников и др., 1992). Рудоносные карбонатиты этих объектов образуют серию субсогласных приразломных тел среди архейских метаморфических пород (нечерской серии) и перекрывающих метаморфизованных образований медвежевского вулканического комплекса раннего-среднего рифея, слагающих Бираинскую остаточную антиклиналь. Связь карбонатитов с интрузивным магматизмом не установлена, но обращает на себя внимание пространственное сонахождение с осадочно-вулканогенными образованиями медвежевского комплекса. Размещение карбонатитовых тел контролируется крутопадающими сближенными разрывами растяжения. Форма рудных тел линзовидно-пластовая. Мощность отдельных тел варьирует от 10 до 300 м при общей протяженности на Бираинском месторождении до 10 км (Черников и др., 1992). Карбонатиты характеризуются массивно-полосчатым строением с широко развитыми метасоматическими структурами. Состав железисто-доломитовый. Рудные минералы представлены колумбитом, ниобатами, баотитом, ферсмитом, апатитом, монацитом и др. Главный минеральный тип – апатит-колумбит-монацитовый. Содержание ниобия достигает 1,3%. Для Бираинского месторождения подсчитаны запасы категории B_2, составляющие 600 тыс. т Nb_2O_5, 2260 тыс. т TR_2O_3 и 10 млн т P_2O_5 [1].

Возраст карбонатитов и ассоциированного с ним оруденения спорный. Имеются радиологические данные, указывающие на их позднепалеозойский возраст, а также точка зрения о формировании

карбонатитов бираинского типа в результате железо-кальциево-магнезиального метасоматоза в зонах базификации в связи с проявлением метаморфизма и ультраметаморфизма в раннепалеозойское время (Черников и др., 1992).

В *Ченчинском потенциальном редкометалльно-золоторудном узле* заслуживающие внимания концентрации тантало-ниобатов выявлены в конгломератах пурпольской свиты при проведении специализированных исследований ВСЕГЕИ и ПГО «Сосновгеология» (Царук и др., 2004, 2007). На перспективном Сиен-Туруктахском участке Ченчинского рудного узла, в полосе развития охарактеризованных золотоносных конгломератов, установлены аномальные концентрации тантала от 0,01-0,08 до 0,12% в форме скандиевого танталоколумбита [2, 6] совместно с золотом (0,2-4 г/т), ниобием (0,1-0,5%), иттрием (до 0,085 %), церием и лантаном (до 1% и более). Для этого участка в ПГО «Сосновгеология» оценены прогнозные ресурсы Ta_2O_5 по категории P_2 в количестве 28,5 тыс. т при среднем содержании 0,08% и мощности рудных тел 1 м (Царук и др., 2007).

Левоченчинско-Джелиндинский потенциальный редкометалльно-редкоземельный рудный узел прогнозируется по результатам поисково-съемочных работ (Черников и др., 1992) на юго-восточном продолжении рудоносных тектоно-метасоматических зон Ствотах-Юсюряхского рудного узла. На площади Левоченчинско-Джелиндинского рудного узла также широко проявлен кремнещелочной метасоматоз и пегматитизация, но, в отличии от Ствотах-Юсюряхского узла, здесь эти образования характеризуются в основном торий-урановым оруденением, обогащенным редкими землями, танталом и ниобием. Изучавшиеся рудопроявления (Моренное, Дождливое) представляют собой жильные поля минерализованных пегматитов, кварц-биотит-микроклиновых метасоматитов и микроклинитов среди гранитов чуйско-нечерского комплекса протяженностью около 5 км при ширине 400-600 м. Отдельные минерализованные тела, как правило, небольшой мощности локализуются в бластомилонитовых швах и представлены линзами и жилами, обогащенными торитом, ураноторитом, циртолитом, ортитом, монацитом, пирохлором, фергусонитом и чевкинитом [1]. Содержания тория составляют 0,03-0,12 %, урана – 0,01-0,07 %, церия – 0,01-0,3 %, лантана – 0,02-0,3 %, ниобия – 0,001-0,01 %, фосфора – 0,06-0,1 %. Минерагенический потенциал Левоченчинско-Джелиндинского рудного узла (прогнозные ресурсы категории P_3 по авторским данным) оценивается в 47 тыс. т лантана и 23,5 тыс. т церия (Черников и др., 1992).

Главные минерагенические эпохи. Известные на анализируемой территории объекты металлических полезных ископаемых формировались в разных геодинамических обстановках и на определенных этапах в течение раннепротерозойской (карельской), байкальской, каледонской, герцинской и киммерийской металлогенических эпох (табл. 1). Позднеархейская эпоха формирования протоплатформенного основания

(нечерского серогнейсового комплекса) на Нечерском поднятии минерагенически не выражена и далее не рассматривается.

Таблица 1

Эпохи и этапы рудообразования на Нечерском поднятии и его обрамлении

Эпохи и этапы		Условия формирования (возраст оруденения)	Тип рудной формации		Знак на рис. 2	
					м-ние	рудопро-явление
Киммерийская	K_1	Тектоно-магматическая активизация Сибирской платформы (120-130 Ма)	Эпитермальная золоторудная (с Ag, As, Sb, Hg и др.)			
			Золото-урановая в гумбеитах			
			Золото-кварцевая			
			Торий-урановая (с TR) фенитовая			
Герцинская	C_3-P_1	Внутриконтинентальная коллизия (440-490 Ма и 280-320 Ма)	Апатит-редкоземельно-редкометалльная карбонатитовая			
Каледонская	O-S		Золото-сульфидно-кварцевая в зонах СРД			
Байкальская	$RF_2 - RF_3$	Пассивная континентальная окраина	Урановых биогермных известняков			
			Свинцово-цинковая стратиформная в карбонатных породах			
	RF_1-RF_2	Эпиконтинентальный рифтогенез	Железорудная вулканогенно-осадочная			
	RF_1	Эпиконтинентальный пенеплен	Золотоносных конгломератов (с TR, Ta, Nb)			
Карельская	KR_2	Коллизия активной континентальной окраины (1840-1860 Ма)	Урановая в березитах			
			Урановая (с Mo, P)	В кремнещелочных метасоматитах и пегматитах		
			Торий-урановая (с TR, Ta, Nb)			

Карельская эпоха. Формирование минерагенического потенциала Нечерского и других поднятий Байкало-Патомской краевой системы началось в раннем протерозое и происходило в течение раннекарельского и позднекарельского этапов.

Раннекарельский этап связывается со становлением краевых прогибов и островодужных плутоно-вулканических поясов в обстановке активной континентальной окраины. В обстановке краевого прогиба формировались углеродсодержащие отложения кевактинской серии с установленной продуктивность на золото на Тонодском поднятии [7]. На Нечерском поднятии эти отложения слабозолотоносны, но являются благоприятными вмещающими для локализации гидротермального уранового оруденения.

Позднекарельский этап, протекавший в коллизионной обстановке с региональным проявлением тектонических движений, гранитоидного магматизма (чуйско-нечерский комплекс) и гидротермально-метасоматической деятельности, характеризуется последовательным формированием порфирового торий-уранового (с TR, Ta, Nb) и уранового (с Mo, P) оруденения в кремнещелочных метасоматитах и пегматитах и жильного гидротермального уранового оруденения в березитах в зонах дробления гранитов и вмещающих пород. Торий-урановое и урановое оруденение «порфирового типа» генерируется гранитами чуйско-нечерского комплекса и локализуется в пегматитах и кремнещелочных метасоматитах магматической и позднемагматической стадий становления Ченчинского массива. Предполагается, что жильное урановое оруденение в березитах было сформировано на постмагматической стадии, а парагенетическая связь этого оруденения с гранитами обосновывается имеющимися радиологическими данными о возрасте наиболее богатых урановых руд месторождения Чепок в интервале 1866-1845 млн лет [2] и полученными авторами в 2021 г. датировками возраста гранитов Ченчинского массива чуйско-нечерского комплекса – 1860-1850 млн лет (в печати).

В целом карельская минерагеническая эпоха рассматривается рудоподготовительной на раннекарельском этапе, а на позднем этапе – рудоформирующей для уранового, редкоземельно-редкометалльного, а также олово-вольфрамового оруденения на сопредельных территориях (Тонодское поднятие).

Байкальская эпоха разделяется на три основных этапа – раннерифейская, ранне-среднерифейская и средне-позднерифейская.

Раннерифейский (раннебайкальский) этап отвечает периоду эпиконтинентальной деструкции – пенеплена и рифтогенеза, с которыми связано региональное формирование в раннем рифее переотложенных кор выветривания (в объеме отложений пурпольской свиты), а затем, на границе раннего-среднего рифея, проявление рифтогенного магматизма (в объеме медвежевского вулканического комплекса). На Нечерском поднятии образования пурпольской свиты практически повсеместно

рудоносны, характеризуются развитием металлоносных конгломератов (с золотом, редкоземельными элементами, а также танталом и ниобием), а также высокоглиноземистого сырья (в кианит-хлоритоидных сланцах). С железорудным медвежевским вулканическим комплексом, включающим промышленно ценные залежи железистых кварцитов и песчаников в обрамлении Тонодского поднятия [7], на анализируемой территории связаны проявления гематит-магнетитовой минерализации и малое месторождение на севере поднятия (см. рис. 2), для которого, по данным геологического доизучения (Скотников и др., 1994), прогнозные ресурсы железа оценены по категории P_1 в количестве 24,5 тыс. т [1].

Ранне-среднерифейский этап проявился как главный железорудный в структурах Байкало-Патомской краевой системы и является дополнительным рудоформирующим в отношении уранового оруденения. Это обосновывается полихронным телескопированным характером оруденения на известных месторождениях (включая месторождение Чепок), в которых возраст наложенной настурановой минерализации (в среднем около 1300 млн лет) соответствует времени регионального развития даек габбродолеритов медвежевского комплекса. В этих месторождениях основная масса рядового оруденения формировалась в конце раннего протерозоя, а более богатые концентрации – на рубеже нижнего-среднего рифея [4].

Средне-позднерифейский этап характеризуется накоплением мощной толщи терригенно-карбонатных осадков на пассивной континентальной окраине (в формирующихся перикратонных прогибах и синклинориях) в обстановке континентального склона (отложения среднерифейского балаганахского горизонта) и шельфа пассивной континентальной окраины (отложения позднерифейских дальнетайгинского и жуинского горизонтов). В рифейском обрамлении Нечерского поднятия данные этапы минерагенически не выражены. На сопредельной территории, в границах Сибирской платформы, известно стратиформное позднерифейское свинцово-цинковое оруденение в биогермных (рифоидных) доломитах сеньской свиты (дальнетайгинский горизонт) на площади Джелиндинско-Оттахской горст-антиклинали и уран-битумное оруденение в биогермных известняках торгинской свиты (жуинский горизонт) в Березовском прогибе [1] в составе Джелиндинско-Оттахской потенциально золотоносной свинцово-цинковой зоны и Березовского ураноносного узла (см. рис. 2).

Каледонская эпоха знаменуется формированием плитного комплекса Сибирской платформы на раннекаледонском этапе (в венд-кембрийское время) и последующими коллизионными процессами позднекаледонского этапа. Позднекаледонский этап внутриконтинентальной коллизии, вызванный становлением гранитоидного Ангаро-Витимского ареал-плутона, проявился на анализируемой территории региональным развитием покровно-надвиговых

структур, метаморфизмом рифейских отложений, а также гранитообразованием на рубеже ордовика-силура в западной части Нечерского поднятия (мамский комплекс). Позднекаледонский этап является главным золоторудным во внешних перикратонных структурах Байкало-Патомской краевой системы, включая Челончено-Жуинский прогиб в обрамлении Нечерского поднятия, где было сформировано золото-сульфидно-кварцевое оруденение в зонах структурно-разрывных дислокаций (СРД) с возрастом 490-440 млн лет [3] на месторождениях Ходоканского РУ. Отметим, что в ряде урановых объектов на Нечерском и Тонодском поднятиях позднекаледонский тектогенез фиксируется во временном интервале 560-450 млн лет нарушением U-Pb систем урановых минералов при локальном переотложении урана в форме коффинита [4, 9].

Герцинская эпоха традиционно рассматривается главной золоторудной на территории Мамско-Бодайбинского синклинория, где под влиянием глубинных флюидов, генерируемых гранитоидами Ангаро-Витимского ареал-плутона, произошло формирование на позднегерцинском этапе (C_3-P_1) золоторудных месторождений черносланцевого типа, в том числе уникального Сухоложского [1, 10]. На анализируемой территории с этим этапом, исходя из полученных (Черников и др., 1992) радиологических данных о возрасте карбонатитов 280-320 Ма (C_3-P_1), связывается формирование в промышленных масштабах апатит-редкоземельно-редкометалльного оруденения перспективного Бираинского рудного узла на западе Нечерского поднятия, в ареале влияния позднепалеозойских гранитоидов Ангаро-Витимского ареал-плутона.

Считается, что рудорегенерация этого времени, синхронная с гранитообразованием в Ангаро-Витимском ареал-плутоне, носила региональный характер и имела место на всех известных урановых месторождениях в выступах фундамента Байкало-Патомской краевой системы, включая месторождение Чепок в Бульбухтинском рудном узле, где выражена перекристаллизацией первичного уранового оруденения с образованием настуранов поздней генерации [2, 4].

Киммерийская эпоха отражает мощные процессы мезозойской тектономагматической активизации Сибирской платформы, проявившиеся в южной части Нечерского поднятия и, главным образом, в прилегающем Чарском поднятии Алданского щита тектоническими подвижками, внедрением интрузий и малых тел щелочных пород и региональным калиевым метасоматитозом – гумбеитизацией [1]. На территории Алданского щита киммерийская эпоха является главной золоторудной и урановорудной [16].

На юге Нечерского поднятия известны единичные мезозойские проявления, относящиеся к торий-урановой формации в фенитах (в связи с интрузиями щелочных сиенитов мурунского комплекса – K_1) и золото-урановой формации в гумбеитах (зон региональных разломов). Золото-урановое оруденение в гумбеитах эльконского геолого-промышленного

типа развито на территории прилегающего Чарского поднятия (Ничатский потенциальный урановорудный узел, см. рис. 2), где известные рудопроявления (Били, Ширик и др.) характеризуются бедным и рядовым оруденением (содержания урана 0,03-0,08%) в незначительных масштабах при общих прогнозных ресурсах урана категории P_2 не более 5 тыс. т [1].

Практический интерес и расширение перспектив на золото связывается с выделяемой в восточном обрамлении Нечерского поднятия Джелиндинско-Оттахской потенциально золотоносной свинцово-цинковой зоной. Эта зона входит в состав прогнозируемого Ченча-Жуинского потенциального золоторудного района, металлогенический потенциал которого оценивается в 177 т золота [1], и является его южным продолжением на анализируемой территории (см. рис. 2). В пределах Джелиндинско-Оттахской зоны прогнозируется мезозойское золотое оруденение лебединского и карлинского типов.

Прямые признаки золото-кварцевого оруденения лебединского типа установлены в южной части рассматриваемой зоны в щелочных интрузиях мурунского комплекса. На известном здесь рудопроявлении Горное в составе Богаюктинского золоторудного узла (Павлык и др., 1984) золотоносные кварцевые жилы с содержанием золота от 2,7-3 г/т до 9,5 г/т образуют жильно-прожилковые поля в штоке щелочных сиенитов и вмещающих рифейских отложений, и сопровождаются интенсивными гидротермально-метасоматическими изменениями окружающих пород. Апробированные прогнозные ресурсы золота для Богаюктинского рудного узла составляют 50 т по категории P_3. По комплексу прямых признаков и прогнозно-поисковых критериев проявление Горное может рассматриваться как аналог промышленного Морозкинского месторождения Лебединского рудно-россыпного узла Центрально-Алданского района [11].

Эпитермальное золотое оруденение (с Ag, As, Sb, Hg и др.) в карбонатных породах, сопоставляемое с оруденением карлинского типа, прогнозируется в пределах Джелиндинско-Оттахской зоны на площадях развития верхнерифейских биогермных известняков и доломитов дальнетайгинского и жуинского горизонтов (торгинская, сеньская свиты и др.). Это обосновывается геолого-геохимическими данными, в частности, площадным проявлением в перечисленных карбонатных отложениях характерных околорудных процессов (окремнения-джаспероидизации, жильно-прожилкового окварцевания и карбонатизации), широким развитием вторичных геохимических ореолов и потоков типовых рудных элементов на большей части Джелиндинско-Оттахской зоны (Блинников и др., 1981), а также установленной золотоносностью в измененных карбонатных породах [1]. Прогнозируемое эпитермальное оруденение ожидается как на неопоисковых площадях рассматриваемой зоны, так и на участках развития свинцово-цинкового оруденения (месторождение Бестях, рудопроявление Оттах и др.) [1].

Выводы. Перспективы Нечерского поднятия и его обрамления связываются, в первую очередь, с расширением минерально-сырьевой базы урана, золота, а также редких и редкоземельных элементов.

Высокоперспективным в целом рассматривается Нечеро-Ничатский (Чарский) потенциальный урановорудный район, а в числе первоочередных для проведения дополнительных поисково-оценочных работ на уран в определившихся и новых обстановках выделяется площадь Бульбухтинского урановорудного узла [14].

Потенциальные перспективы на золото карлинского и лебединского геолого-промышленных типов связываются с Джелиндинско-Оттахской потенциально золотоносной свинцово-цинковой зоной, постановка специализированных поисков на которой целесообразна после проведения дополнительного геологического доизучения в рамках ГДП-200/2.

Дальнейшего изучения и оценки на комплексное редкоземельно-редкометалльное оруденение заслуживают перспективные площади развития карбонатитов Бираинского рудного и конгломератов Ченчинского потенциально рудного узлов.

Литература

1. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская, лист O-50 (Бодайбо). Объяснительная записка / отв. редактор Л.Б. Макарьев. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2010. 612 с.

2. Голубев В.Н. Отложение и ремобилизация урана в Северо-Байкальском регионе, по данным анализа U-Pb-изотопных систем урановых руд / В.Н. Голубев, Л.Б. Макарьев, Л.В. Былинская // Геология рудных месторождений. – 2008. – Т. 50, № 6. – С. 548-557.

3. Ланда Э.А. Изотопно-геохимические и геохронологические особенности золоторудного месторождения Ходокан (Восточная Сибирь) / Э.А. Ланда, Л.Б. Макарьев, Л.В. Былинская, С.А. Сергеев, М.В. Павлов, Э.М. Прасолов, Э.Б. Пилепский, К.И. Лохов, И.Н. Капитонов, Д.И. Матуков // Региональная геология и металлогения. – 2006. – № 28. – С.144-152.

4. Макарьев Л.Б. Геологические обстановки и возрастные рубежи формирования уранового оруденения Патомского нагорья (Северное Забайкалье) / Л.Б. Макарьев, Ю.Б. Миронов, У.С. Ефремова // Разведка и охрана недр. – 2020. – № 6. – С.9-18.

5. Макарьев Л.Б. Нечеро-Ничатский урановорудный район (ведущие типы оруденения, обстановки локализации и перспективы) / Л.Б. Макарьев, Л.В. Былинская, М.В. Павлов, Павшуков В.В., Мальков И.А. // Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов. – 2006. – Вып. 150. – С. 5-17

6. Макарьев Л.Б. Новый тип золото-редкометалльного оруденения в древних конгломератах Восточной Сибири (Патомское нагорье) /Л.Б. Макарьев, Л.В. Былинская, М.В. Павлов, В.В. Паршуков, Т.Е. Салтыкова, Е.В. Толмачева // Региональная геология и металлогения. – 2007. – № 32. – С. 134–145.

7. Макарьев Л.Б., Калина В.А. Особенности геологии, металлогении и перспективы Тонодского поднятия (Северное Забайкалье) // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы VI Международной конференции (Томск, 20–24 сентября 2021 г.). – Изд-во Томского политехнического университета, 2021. – С. 325-331.

8. Макарьев Л.Б. Урановое и благороднометалльное оруденение северной части Нечерского поднятия (Бульбухтинская площадь): вещественные особенности и стадийность формирования / Л.Б. Макарьев, Л.В. Былинская, М.В. Павлов // Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов. – 2005. – Вып. 147. – С. 69–83.

9. Миронов Ю.Б. Особенности состава и рудоносности протерозойских кварцевых конгломератов Северо-Восточного Забайкалья и Южной Канады / Ю.Б. Миронов, Л.Б. Макарьев, И.В. Илькевич // Региональная геология и металлогения. – 2010. – № 44. – С. 75–89.

10. Несмеянов Л.О., Гребенкин Н.А. Перспективы выявления золотого оруденения в пределах Ничатского потенциального рудного узла // Материалы V международной конференции молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского. – СПб.: Издательство ВСЕГЕИ, 2017. – С. 281-284.

11. Перевалов О.В. Геологическое строение и минерагения Бодайбинского и Мамского горнорудных районов / О.В. Перевалов, Н.А. Срывцев. – М.: ГЕОКАРТ: ГЕОС, 2013. – 276 с.

12. Самович Д.А. Минерально-сырьевая база урана Восточной Сибири / Д.А. Самович, И.И. Царук, А.А. Кокарев, Л.П. Гаврилов, Е.А. Митрофанов. – Иркутск: Глазковская типография, 2012. – 163 с.

13. Сирина Т.Н. Геолого-эволюционная модель уранового рудогенеза в различных блоках Сибирской платформы / Т.Н. Сирина // Разведка и охрана недр. – 2009. – № 6. – С.24-29.

14. Тюленева В.М. Минеральные ассоциации, эпохи и эволюция уранового рудогенеза в Северном Прибайкалье / В.М. Тюленева, Н.И. Чистякова, В.Т. Дубинчук, В.В. Ружицкий // Разведка и охрана недр. – 2009. – № 3. – С.25-32.

15. Царук И.И. Месторождение урана Чепок / И.И. Царук, А.И. Пушкаренко, Л.Б. Макарьев // Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов. – 2005. – Вып. 147. – С. 124-129.

16. Яркулов А.С. Эпохи уранового рудообразования и основные закономерности размещения месторождений / А.С. Яркулов, Ш.Х. Абдунабиев, Р.Р. Авазов, Б.Д. Худойбердиев, А.У. Умаралиев, О.Т. Розиков // Молодой ученый. – 2017. – Вып. 18 (152). – С. 102-105.

ЭНДОГЕНЕЗ И БИОНАКОПЛЕНЕНИЯ УРАНА
(обзор, анализ)

М.У. Масобиров
ТГТУ им. Ислама Каримова, г. Ташкент, Республика Узбекистан

В периодической системе химических элементов Д.И. Менделеева уран занимает 92 место согласно атомному весу, равному 238,03. Из-за количественного равновесия в зарядах электронов и протонов в его атоме он функционирует в радионуклидной форме и излучает излишний заряд в виде α-, β- и Ɣ- излучений, которые являются потенциально опасными для живой биоткани.

Согласно официальным геохимическим справочникам, в настоящее время кларковое содержание урана в литосфере в среднем составляет $1{,}5 \cdot 10^{-4}$ весового процента, в том числе в кислых породах – $3 \cdot 10^{-4}$, в средних – $2 \cdot 10^{-4}$, в основных, ультраосновных и метаморфических породах – 0. В гидросфере урана содержится значительно меньше, в океанической и морской воде – $5 \cdot 10^{-8}$ весового процента, а в речных и подземных водах и того ниже.

Наша Земля с тех пор, как образовалась, периодически переживала эпохи урано-генетической активации, которая серьёзно воздействовала на морскую экологию того времени.

Загрязнение морских вод урановым веществом происходило в основном из двух источников: речных вод и подводных действующих вулканических аппаратов – «чёрных курильщиков».

В первом случае четырёхвалентные соединения урана, свойственные глубинным горизонтам земной коры, в коре выветривания окисляются и переходят в легкорастворимые шестивалентные соединения. Согласно В. Данчеву, А. Перельману и др., в этих условиях осуществляется гидролиз урана с образованием комплексного двухвалентного катион–урана $[UO]^{2+}$, играющего из-за высокой подвижности исключительную роль в миграции и концентрации урана в экзогенных условиях.

Большая часть урана выносится грунтовыми водами, нередко на значительное расстояние за пределы источников его выщелачивания и течением речных вод транспортируется в ближайшие морские воды.

Геоисторические эпохи активации урана на земле определялись возрастом и величиной урановых месторождений. Японским геологом Н. Катаямой в середине прошлого века как ураноактивные периоды были выделены ранний палеозой (Витватерсранд в ЮАР, Блайнд Ривер в Канаде), каменноугольный период (Вогезы во Франции, Вал Рандена в Италии), пермский (Ледев во Франции, Прит в Италии), триасовый (некоторые месторождения в Нью Мексико в США), меловой (Блек-Хиллс в Южной Дакоте, США), эоценовый (Гесс-Хиллс и другие в Вайоминге, США), олигоценовый (Сан Пьерр во Франции, Кэрис в США),

миоценовый (Майбл Беджс в Колорадо, США, Анабани в Японии), плиоценовый (Оуленца и Пэлинджейра в США, Нинче Тога в Японии).

В геологическом прошлом Земли произошло несколько катастрофических событий, которые повлияли на живые организмы или на всю биосферу. К таким событиям можно отнести скопления урана катастрофического содержания в отдельные промежутки времени. В истории накопления осадочного урана следует выделить два этапа: Первый – уранонакопление до формирования органики. Второй – осадконакопление урана фауной.

Об интенсивности первого этапа мы не можем судить, так как тогда органики было мало или вообще ее не было. В связи с этим по интенсивности уранонакопления мы можем судить лишь косвенно, по реакции фауны на ионизацию среды обитания. Во втором этапе уже присутствовала фауна, которая даёт возможность судить об интенсивности уранонакопления. Таких эпох С.Г. Неручев (1982 г.) выделяет 22, из них в фанерозое – шесть основных. Эпохи интенсивного накопления планктоногенного органического вещества, фосфора, урана и других тяжёлых металлов проявлялись в истории Земли от архея до голоцена неоднократно, их известно не менее 20, причём фактически было, вероятно, больше. Но так как реликтов каждой такой эпохи сохранилось мало, а продолжительность каждой не всегда была достаточно длительной, изучаются только самые массивные и долго продолжавшиеся. Это следующие эпохи: конец раннего и начало среднего кембрия, поздний девон, поздний карбон, поздняя юра, средний и поздний эоцен и конец современного антропогена.

По данным С.Г. Неручева, с момента возникновения океана и до современных эпох образование и накопление осадков в бассейнах всегда сопровождались отложением урана, который является обязательным малым компонентом всех осадочных пород. Средняя концентрация урана в осадочных породах составляет $2{,}6 \cdot 10^{-4}$, испытывая довольно значительные колебания чаще в сторону более низких значений и в зависимости от генетического типа осадков. Уран частично сохраняется в осадочных образованиях даже при самом интенсивном метаморфизме и гранитизации пород.

Каждая эпоха характеризуется вымиранием и появлением новых мутагенных форм жизни. К примеру, просмотрим эпоху раннего и среднего кембрия. Конец раннего и начало среднего кембрия во многих районах мира характеризуется интенсивной вспышкой биопродуктивности фитопланктона и накоплением осадков, обогащенных планктоногенным органическим веществом, фосфором, ураном и другими тяжелыми металлами на обширных пространствах развития эпиконтинентальных морских бассейнов. Значительно обогащенные планктоногенным органическим веществом осадки раннего-среднего кембрия характеризуются несколько повышенным содержанием

терригенного глинистого материала и высокой кремнистостью, как и многие другие осадки аналогичного типа. Обилие бентосных животных – собственно трилобитов и брахиопод – свидетельствует о небольшой глубине бассейна. Судя по повышенным концентрациям урана в осадках, обогащённых планктоногенным органическим веществом, и по высоким значениям отношений $U/C_{орг}$, концентрация урана в водах обширного морского бассейна превышала нормальную в несколько сотен раз. Таким образом, в эту эпоху не все фитопланктоны могли выживать в такой среде, и только возникшие мутагенные типы этого индивида смогли приспособиться к таким условиям.

Согласно современным представлениям, источниками урана в бассейне седиментации являлись в основном «чёрные курильщики», которые образовались в зонах рифтогенеза. Элементы урана поглощались живыми организмами, собственно фито- и зоопланктоном, многие из которых, погибая, переходили в осадки, обогащая их этим элементом. Выжившие организмы под токсическим воздействием превращались в мутантов.

В каждой эпохе имеется свой пик или максимум концентрации урана в морской воде, и именно в этом пике годичная масса фито- и зоопланктона возрастала в несколько раз. В обычных условиях этого не наблюдается.

Проявление эпох уранонакопления в течение довольно продолжительного времени сопровождалось значительным воздействием уранового отравления и ионизирующей радиации на весь комплекс организмов во многих крупных регионах биосферы, а возможно, и всей биосферы, в целом изменяя таксономическое разнообразие биоты и её вымирание, после чего возникал новый уровень жизни. Японские исследователи в последние годы не только не сомневаются в возможности прижизненного биогенного накопления урана водорослями, но даже считают возможным использовать этот процесс в практических целях для получения урана.

Все эпохи уранонакопления и повышенной радиоактивности среды в весьма широко распространённых зонах накопления, обогащённых органическим веществом, ураном и другими тяжёлыми металлами морских осадков, характеризовались значительным обеднением всего комплекса беспозвоночных животных, особенно бентосных. Во многих случаях урановосные сапропелевые осадки почти не содержат никакой макрофауны, иначе говоря, в урановосных осадках комплексы бентосной фауны отсутствуют совсем или значительно обеднены.

В заключение, сопоставляя эти данные об эпохах, в которые накапливались сильно битуминозные сланцы, обогащенные тяжёлыми металлами, в том числе и ураном, и периодах ураноактивации, выделенных геологом Н. Катаямой, можно видеть идентичность. Значит, в эти эпохи или периоды ураноактивации (или уранонакопления) концентрация урана резко увеличивалась. Но как отмечалось, санитары, а точнее фито- и

зоопланктон очищали среду обитания до нормальных условий. По нашему мнению, процессы уранонакопления, или ураноактивации, проявлялись в зонах субдукции. К такому выводу приводят следующие факты: 1) самая высокая концентрация урана отмечена в кислых породах; 2) в энсиалических островных дугах состав магматических пород близок или идентичен составу кислых пород; 3) последним объясняется разногласие во взглядах геологов на фации уранонакопления, так как доступ к дневной поверхности растворов, обогащенных тяжёлыми металлами, в частности ураном, происходит через мелкие трещины, которые образуются в зонах субдукции. В этих же зонах образовались «чёрные курильщики», из которых извергались растворы с высоким содержанием урана. По обширности этот процесс протекал в пределах регионального масштаба, а не планетарного! По этой причине мы не наблюдаем это проявление во всех пространствах земного шара синхронно в один конкретный промежуток времени.

Литература

1. Неручев С.Г. Уран и жизнь в истории Земли. Л.: Недра, 1982. – 208 с.
2. Смирнов В.И. Геология полезных ископаемых. М.: Недра, 1982. – 669 с.

УРАН И ЖИЗНЬ. 4,5 МИЛЛИАРДА ЛЕТ СОТРУДНИЧЕСТВА

В.Г. Печенкин
АО «Росгеология», г. Москва

Осознание того, что эволюция земных минералов зависит напрямую от биологической эволюции, слегка шокирует.

Роберт Хейзен

Роберт Хейзен – американский минералог, иностранный член РАН. Является автором теории «эволюции минералов». Обратил внимание, что минеральный мир эволюционирует.

Минеральная история Вселенной началась с образования графита и алмаза, а через несколько миллионов лет в звездной пыли присутствовало уже около десятка новых минералов. В хондритах их количество достигает шести десятков, а в ахондритах – уже порядка 250 [1].

А что уран? Химические анализы показывают, что его содержание в углеродистых хондритах достигает 0,0074 ppm (0,00000074 %), в ахондритах уже побольше – 0,07–0,15 ppm (0,000007–0,000015 %). Но минералы урана в метеоритах пока отсутствуют.

Новорожденная Земля имела достаточно однородный состав – не было ни земного ядра, ни коры, ни атмосферы, ни гидросферы. Первородное вещество планеты по усредненному составу представляло резко выраженную ультраосновную породу. Минералы были представлены метеоритным железом и его сплавами с никелем, а также железисто-магнезиальными силикатами, общую формулу которых можно представить в виде: $R_2[SiO_4]$, где «R» это Mg, Fe_2+, Mn и Ca в разных пропорциях.

300–400 миллионов лет спустя после образования планеты началось образование базальтовой протокоры. Базальт – это уже смесь пироксенов и плагиоклазов. Если пироксены $(Mg,Fe)_2Si_2O_6$ недалеко ушли от железистых силикатов, разве чуть возросло содержание кислорода, то в плагиоклазах место железа уже прочно занял алюминий: $NaAlSi_3O_8$ – $CaAl_2Si_2O_8$. С появлением базальтов первая минералогическая революция свершилась – космическое вещество превратилось в земное.

Примерно 3,8 млрд лет назад началось формирование атмосферы и гидросферы. Планета покрылась одеялом перегретых облаков, которые состояли в основном из водяного пара (75%) и углекислого газа – CO_2 (15 %). Появились мелководные морские бассейны, в которых, по всей видимости, зародилась Жизнь.

Изливавшиеся базальты подвергались выветриванию. Процесс происходил крайне медленно, пока к делу не подключились непрошенные помощники – микроорганизмы-хемоавтотрофы. Они встраивались

в геохимические реакции, используя электроны для синтеза АТФ, и многократно ускоряли процесс.

Интенсивный химический обмен между морской водой и свежей изверженной породой – роскошная кормовая база для хемолитотрофных организмов. Бактерии заселяют базальтовые «пастбища» уже при 113 °С и всего за несколько лет горная порода превращается в насыщенное водой «нанорешето». Описаны случаи, когда прожорливость бактерий буквально обрушивала скалы: бактерии «подъедают» базальтовые острова до такой степени, что из-за ослабления породы происходят подводные оползни. Один кубометр базальтового стекла может прокормить до $2{,}5\times10^{16}$ железобактерий [2]. То есть в одной песчинке размером в миллиметр кормится 25 миллионов бактерий!

Еще в начале XX века было экспериментально установлено, что бактерии всего за неделю высвобождают из базальта 3 % содержащегося в нем кремния, 11 % алюминия, 59 % магния, 64 % железа, а также щелочные и щелочноземельные элементы [3]. Бактерии «разбирают» базальты не на отдельные кирпичики-минералы, а до основания – на отдельные атомы и ионы.

Образование гранитов. Наряду с базальтами граниты самые распространенные породы на Земле. Казалось бы, они должны так же часто встречаться и в космосе, но исследования космических тел с помощью зондов и спускаемых аппаратов показали, что на поверхности Луны, Венеры, Марса широко развиты базальты, а вот граниты не обнаружены. Современная гипотеза кристаллизационной дифференциации, согласно которой гранитное вещество отделяется в форме расплава (гранитной магмы) от исходной магмы базальтового состава, вызывает ряд вопросов. В частности, базальты не содержат кварца, поэтому получить непосредственно из них путем селективного плавления гранитный расплав нереально.

Но что невозможно при аномально высоких давлениях и температуре, без проблем происходит практически на дневной поверхности. Требуется только время, наличие воды и присутствие живых организмов.

Заселяя еще не остывшие лавы, микроорганизмы препарируют пироксены и алюмосиликаты, составляющие основу базальтов, отделяя кремнезем (SiO_2) от марганца, железа, магния и кальция. Высвободившиеся элементы поступают в океан в растворенном виде, где вступают в разнообразные реакции. Кальций и магний реагирует с растворенным в воде углекислым газом и расплодившиеся к тому времени бактериальные маты формируют из них строматолитовые постройки ($CaCO_3$) и ($CaMg[CO_3]_2$). Сероводород восстанавливает железо до пирита (FeS_2), (а много позже, уже после появления кислорода в воде, железо окисляется до окислов и гидроокислов – Fe_2O_3, Fe_3O_4 и др.). Кремнезем дает хемогенные и биохемогенные кремнистые осадки в виде опала

($SiO_2 \cdot nH_2O$), а алюминий связывается в алюмосиликатах и оседает на дно различными глинами.

Архейские бактерии, разложив базальт на составляющие, смогли полностью разделить окись кремния и карбонаты и создать неведомые раньше отложения: осадочные породы, состоящие только из окиси кремния или только из карбонатов (известняк, доломит). Эти новообразования в корне отличаются как от первичного космического вещества, так и от базальтов. Бактерии совершили «вторую минералогическую революцию».

Если первая революция минерального мира происходила в ходе геохимических процессов в горниле астеносферы и привела только к частичному очищению силикатов от железа и появлению базальтовой коры, то движущей силой второй минеральной революции была Жизнь. Бактерии сделали то, на что не способна ни одна плавильная печь – буквально разобрали минералы базальта на отдельные атомы и ионы, а потом собрали их, но уже в другом порядке. Это даже была не революция, а бескровный переворот, совершившийся незаметно, без грохота вулканов и прочих огненных катаклизмов.

Образование гранитов происходило там, где базальтовые протоконтиненты сталкивались и, проседая вглубь Земли, увлекали в астеносферу осадочные породы, которые по химическому составу уже были гораздо ближе к гранитам, чем исходные базальты.

Пик гранитообразования приходится на конец архея – приблизительно 2,7–2,5 млрд лет назад. В эти 200 миллионов лет сформировалось порядка 70 % гранитов за всю историю Земли. К этому времени Земля окончательно расслоилась на геосферы. Максимальная концентрация урана при этом оказалась в континентальной коре.

Витватерсранд. Наконец 2,9–2,7 млрд лет назад началось образование первых урановых минералов (тухолит, уранинит) и месторождений в кварцево-галечных конгломератах.

Тухолит имеет органическое происхождение. В 1975 г. Д. Хальбауэр описал обрамленные золотыми микрочастицами мельчайшие углеродные столбики [4]. Электронная микроскопия подтвердила, что тухолит – окаменевшие остатки бактериальных сообществ, перерабатывавших золото и накапливающих уран.

Содержание золота в прослойках тухолита достигает 20 кг/т (!). Сейчас все больше исследователей придерживаются биогенного происхождения золота (и не только в архее). Генезис колоссальных скоплений кварца оставим за скобками (развернуться не позволяют рамки статьи); с огромной долей вероятности они также имеют органическое происхождение.

Уранинит, по-видимому, имеет неорганическое происхождение, но в процессе обмена электронами принимали участие различные анаэробные бактерии. В ходе разрушения гранитов высвобождался «свободный уран»,

который окислялся в ходе диссоциации воды до уранил-иона и далее – до уранинита:

$U^{4+} + 2H_2O = UO_2^{2+} + 4\,H^+ + 2e$,

$UO_2^{2+} + 2e = UO_2$.

При этом образующийся в результате реакции водород частично улетал в атмосферу, где удерживался гравитационным полем Земли и вступал в новые реакции (в архее – преимущественно с азотом), а остальной водород потребляли водородные бактерии, обмениваясь электронами с соединениями урана.

Благодаря деятельности организмов ориентировочно 2,5 млрд лет назад атмосфера стала насыщаться кислородом. Его избыток привел к тому, что на поверхности перестал накапливаться четырехвалентный уран. Окислив весь уран до шестивалентного состояния, кислород «смел» его с поверхности и принялся за другие металлы. В относительной близости от конгломератов через пару сотен миллионов лет (несколько позже или раньше) начинается отложение гигантских месторождений железистых кварцитов. Где-то этот процесс начался раньше (как в Индии), где-то позже (в Канаде), но везде отмечается его близость к конгломератам и временной лаг в несколько десятков или сотен миллионов лет.

Кислород, наработанный живым веществом, вынудил анаэробный мир уйти «в подполье», спрятавшись от дневного света. Туда же спустился и уран. По сути, Жизнь, основанная на фотосинтезе, вытеснила уран с земной поверхности, и его рудообразование приняло новые формы. Следующий этап уранового рудообразования (формирование метасоматических месторождений) происходил на глубине и, по-видимому, без прямого участия живых организмов.

Появление эукариот 2,1-1,8 млрд лет назад, по всей видимости, имеет связь с месторождениями урана.

Образование месторождений Габона происходило в переходный период истории Земли. Интервал между 2,2-2,0 млрд лет назад оказался временным промежутком между появлением в атмосфере кислорода и рождением организмов, которые научились бы им дышать. Цианобактерии уже сотни миллионов лет поставляли в атмосферу кислород, который надо было как-то утилизировать. Ситуация сложилась критическая: планета оказалась территорией кислорода, но без организмов, способных им дышать, а Природа все медлила и никак не могла «родить» организмы, которые потребляли бы этот газ. Сдвиг углеродного круговорота, вызванного деятельностью цианобактерий, привел к массовым захоронениям органических остатков, которыми некому было питаться [5]. Мир едва не захлебнулся в углеводородах, но этот неоднозначный эпизод в истории развития Жизни закончился благодаря урановым месторождениям Габона. Во время формирования руд месторождения Окло (около 2 млрд лет назад) проницаемые горизонты были пропитаны жидкими углеводородами – остатками морских микроорганизмов. Отдельные зерна

уранинита на месторождениях Габона оказались буквально впаяны «в капсулы» из жидкой (в свое время) органики.

После формирования оруденения на месторождении Окло прошло 200–250 миллионов лет и вдруг без видимых причин началась цепная реакция деления урана. Почему начал работу природный реактор? Испанские ученые, изучавшие микроводоросли из отстойников очистных сооружений урановых рудников, предположили, что дело здесь не обошлось без вмешательства живых организмов [6].

Химический анализ показал, что 1 грамм высушенной биомассы микроводорослей *Chlorophyta* содержит 115 мг урана. То есть микроорганизмы на 11,5 % состоят из этого элемента. При этом оказалось, что микроводоросли не только накапливают уран, но и производят его обогащение! При сравнении изотопного состава оказалось, что содержание ^{235}U в микроводорослях на 3,5 % выше, чем в окружающих водах отстойника.

Именно микроорганизмы могли запустить процесс ядерного деления, ведь у них было порядка 200 миллионов лет, чтобы обогатить руду на месторождении и накопить в ней критическую массу ^{235}U.

Время работы природного ядерного реактора удивительным образом совпадает с возникновением совершенно нового типа внутриклеточного строения организмов. На этом коротком временном промежутке развития планеты клетки обзавелись митохондриями – собственными источниками энергии. Это привело к радикальному перелому жизни на планете – появлению эукариотической клетки с ядром внутри, что впоследствии привело к появлению растений, животных и, в конце концов, человека. Это – важнейшее событие в истории Земли после возникновения Жизни на ней. Биосфере понадобилось 200 миллионов лет эволюции, чтобы адекватно отреагировать на кислородное отравление атмосферы и не исключено, что ядерные реакторы внесли в этот процесс свой вклад.

Возможно, природные реакторы в это время работали не только в Габоне, но Природа не сохранила их, в очередной раз начав «перемешивать» континенты.

Месторождения несогласия 1,6–1,4 млрд лет назад. В рифее биосфера напрямую не влияла на урановорудный процесс, а уран не вмешивался в развитие Жизни: их пути на этом отрезке времени разошлись. Но косвенное влияние все-таки существовало. Наработанный морскими организмами кислород «выжигал» на поверхности суши все, до чего мог дотянуться: и уран, и железо, и крошечные остатки органической жизни, которые волею судеб могли быть заброшены на безжизненную еще в то время сушу.

Долины рифтов заносились «стерильными» континентальными кварцевыми песками, которые были окрашены окислами железа в красный цвет, и абсолютно лишены какой-либо органики. Шестивалентный уран в растворенном виде стекал в бессточные котловины, где его

концентрации в растворах постепенно достигали десятков ppm. Отложения рифтов характеризовались окислительной обстановкой.

В результате столкновения–расхождения континентальных плит фундаменты осадочных бассейнов трескались в самых хрупких местах. По большей части это были горизонты с большим содержанием графита, который служил своеобразной смазкой. По этим разуплотненным «проводникам» из фундамента поступали напорные восстановленные растворы и инициировали возникновение в проницаемых песчаных отложениях чехла конвекционных ячеек, которые работали длительное время, обеспечивая постоянный приток все новых порций восстановленных растворов фундамента к поверхности несогласия. На границе смешения восстановленных флюидов и захороненных кислородных вод и происходило восстановление UO^{2+} до уранинита.

Графитовые проводники, над которыми формируются богатые руды, характерны для месторождений Канады и Австралии. Картировались они и на месторождении Карку в России.

Благодаря современным методам микроскопических исследований сегодня многие ученые сходятся во мнении, что подавляющее большинство отложений графита образовано из отжившего свой век и переработанного органического вещества [7].

С середины протерозоя разнообразие эукариот стало резко возрастать и около 800 млн лет назад господство микробов, длившееся почти 3 млрд лет, закончилось. Начиная с этого времени возникали все основные группы водорослей и простейших, а также предки грибов и животных. Заселив водную толщу, они создали новый, трехмерный мир, недоступный плоским бактериальным матам.

Часть водорослей укоренилась, и на дне морей расцвели подводные луга. Но «травоядные» еще не появились и прореживать растительность было некому. Бактерии-ассенизаторы с трудом справлялись с нарастающим потоком отмершей органики, которая сыпалась сверху. Начиная с некоторого момента донные утилизаторы компоста перестали справляться окончательно и органический углерод снова начал интенсивно захораниваться на дне океана. Мелководные морские бассейны превратились в «водорослевые болота». Распад цепи из производителей и потребителей привел к тому, что неокисленная органика начала выводиться из оборота. В результате уровень содержания кислорода в атмосфере подскочил до 10-15 %, считая от нынешнего. Избыток образовавшегося кислорода через обратный парниковый эффект привел в конце протерозоя к серии мощнейших оледенений планеты. Сохранившиеся в периоды оледенений островки жизни ютились вокруг действующих вулканов и горячих источников.

Но была и оборотная сторона этого катаклизма.

До экологической катастрофы эукариоты смогли обжить только верхний прогретый слой морей; нижний – темный, лишенный кислорода,

был им недоступен. В результате таяния льдов холодные кислородные воды начали погружаться на глубину и насытили кислородом всю толщу воды, вытесняя оттуда прокариот. Все было подготовлено к кембрийскому взрыву жизни.

Образование интрузивных и метасоматических месторождений, пришедшихся на этот период, происходило без участия органики.

540 млн лет. Кембрийский взрыв. Земля вышла из серии похолоданий и выжившие организмы с энтузиазмом принялись размножаться, заселяя экологические ниши. Свершилась скелетная революция. Фанерозой начал отсчет времени.

Организмы полностью заселили воды океана, которые к концу протерозоя проветрились до самых глубин. В кембрии в морском иле уже копошились многочисленные трилобиты и прочие членистоногие.

Уран не остался в стороне от глобальных изменений и отреагировал новыми типами месторождений.

В прибрежных водах, освещаемых солнцем, начали накапливаться илы. По существу, это «подводные почвы», взрыхляемые многочисленными роющими животными и кишащие бесчисленными армиями микроорганизмов, разлагающими органические остатки. В 1 грамме ила количество бактерий достигает нескольких миллиардов. Этот подводный «чернозем» обладает богатой свободной энергией и вступает в реакцию с растворенным веществом, который сносится с суши. Органические остатки и восстановленное (сульфидное) железо в илах осаждает уран и другие металлы. Правда, их содержания относительно невелики – первые сотые процента.

Бедные сингенетичные урановые руды (месторождения Ранстад в Швеции, Силламяэ в Эстонии), образовались в кембрии – нижнем ордовике в ходе сноса урана в морской бассейн. Чуть позже – в позднем ордовике-нижнем силуре происходило накопление урана в черных илах на территории современного Узбекистана (месторождения Косчека, Рудное) и Германии (Роннебургское рудное поле).

Современный аналог – накопление урана в илах Уолфиш Бей в Намибии – происходит за счет сноса урана с месторождений Дамарского пояса. Современные накопления урана в черных илах также известны в Каспийском и Балтийском морях, а в турецкой части Черного моря были даже попытки добычи урана.

В конце силура появляются первые сосудистые растения, вырабатывающие лигнин, который укрепляет стебель. Растения получили собственный «хребет», и благодаря появившейся жесткости в конце силура – начале девона первые водоросли «высовывают головы из воды» – растения вышли на болотистый берег и принялись осваивать сушу. В девоне-карбоне устья палеодолин зарастают «щетками» псилофитов, которые служат фильтрами для урана, сносимого с континентов. Образуются первые месторождения в палеодолинах. Прохоровская

палеодолина (рудопроявление Кулешовское) в отложениях девона Воронежского кристаллического массива, палеодолины в отложениях карбона по обрамлению Московского бассейна и Балтийского щита (Брикетно-Желтухинское, Бельское месторождения и др.).

Много позже образовались молодые (неогеновые) рудопроявления в молодых (неогеновых) палеоруслах Палеоволги и Палеодона, которые имеют тот же генезис, но рудообразование происходит уже не только в «палеодельтах».

С выходом на сушу биосфера приобрела объем – растения (фотосинтезирующие структуры) стали располагаться в трехмерном пространстве, а не на плоскости, что резко увеличило интенсивность органического вещества.

В конце раннего девона появились папоротники, хвощи, гинкговые и др., Земля покрылась лесами. Вертикальные стволы наземных растений должны быть достаточно жесткими. Для обеспечения этой жесткости возникла новая ткань – древесина, которая после гибели растений разлагается относительно медленно. Пока разрушители новой органики – древесины не народились, в карбоне происходит массовое угленакопление. Появляется и новый тип месторождений урана – в углях (в каустобиолитах). Это месторождения США, Казахстана, Киргизии и т.д. Наиболее известное – месторождение Кольжат. Накопление урана в растительных остатках (не только в углях, но и в торфах) продолжается и сегодня (месторождение Сиротинка).

Ураноносные фосфориты. Биогенный фосфор начал массово накапливаться, как только в кембрии появились скелетные формы жизни. Ураноносные фосфориты встречаются практически во всех фосфоритоносных бассейнах мира. Общие ресурсы урана, связанные с фосфором, оцениваются в 7 млн тонн, однако массовое использование этого источника ограничивается потребностью в фосфатном сырье и дорогой технологией разделения урана и фосфора.

В Калмыкии и Казахстане известны месторождения, связанные с фоссилизированным костным детритом ископаемых рыб с содержанием урана до десятых долей процента. На отработанном месторождении Меловое (п-ов Мангышлак) руда представлена костями и чешуей рыб, зубами акул, ребрами и позвонками палеогеновых китов.

В ходе фотосинтеза происходит образование живого вещества из неорганических соединений окружающей среды.

Формулу фотосинтеза можно записать в виде:

$CO_2 + H_2O$ + энергия света $\rightarrow [CH_2O]^+ + O_2^-$.

Из углекислого газа и воды под влиянием хлорофилла и солнечной энергии растения синтезируют органические соединения (CH_2O) и выделяют свободный кислород. С позиций геохимии особенно важно, что инертные сами по себе углекислый газ и вода в ходе фотосинтеза разделяются на две противоположности: возникает сильноокислительная

среда со свободным кислородом и резко восстановительная – содержащая органические соединения. Биосфера образует на поверхности планеты своеобразную «батарейку» с отрицательным и положительным потенциалами. При фотосинтезе атомы кислорода, углерода и водорода заряжаются энергией, становятся геохимически активными и энергично вступают в химические реакции.

Минерализация органических соединений противоположна фотосинтезу, она сопровождается освобождением энергии, поглощенной при фотосинтезе. Энергия освобождается не только в тепловой, но и химической форме, носителями которой служат природные воды, обогащаясь CO_2, H_2S и другими продуктами минерализации, воды становятся высокоактивными.

В биосфере в ходе биологического круговорота атомы поглощаются живым веществом и заряжаются энергией. Покидая живое вещество, они отдают накопленную энергию в окружающую среду. За счет этой биогенной энергии осуществляются многие химические реакции. Главными носителями энергии служат природные воды.

То есть работа живого вещества создала резко окислительные условия на земной поверхности и резко восстановительные – в подземных водах. Формирование месторождений в зоне пластового окисления (ЗПО) протекает на окислительно-восстановительном барьере, возникновение которого обусловлено работой живого вещества.

Комплекс гидрогеохимических и микробиологических исследований 1960-х годов показал, что в зоне выклинивания пластового окисления наблюдается максимальная активность микроорганизмов, которые участвуют в формировании гидрогеохимической зональности инфильтрационных вод и способствуют формированию резкого изменения окислительно-восстановительного потенциала на границе аэробной и анаэробной сред в водоносных пластовых горизонтах. Важнейшую каталитическую роль при этом играют микроорганизмы, образующие водород и сероводород [8].

В аэробной среде микрофлора, способствуя окислению пород, повышает Eh водных растворов вследствие потребления восстановителей. Одновременно бóльшая часть кислорода в ЗПО расходуется биохимическим путем. При этом растворенный уран связывается в уранорганические соединения. Разрушение уранорганических соединений с осаждением урана из раствора также происходит при участии микроорганизмов, но уже в анаэробной среде.

Есть ли жизнь на Марсе? Если на Марсе жизни нет (не было), то искать урановые месторождения (по крайней мере, аналогичные земным) там бессмысленно.

Не исключено, что жизнь на Марсе существовала, но отсутствие магнитного поля позволило солнечному ветру «сдуть» марсианскую атмосферу. Фотодиссоциация воды приводила к разделению H^+ и O^{2-}.

При этом водород из-за слабой гравитации Марса улетал в космос, что привело к окислительной катастрофе на планете. Образовавшиеся перхлораты (обнаружены в грунте марсоходом Curiosity *in situ*) вытравили Жизнь – ведь при повышенной температуре перхлораты быстро разлагают органические соединения.

На все про все у гипотетической марсианской жизни было слишком мало времени на формирование месторождений. По расчетам американских ученых последние остатки воды в ходе диссоциации улетучились с поверхности Марса около трех миллиардов лет назад.

Основные выводы

Обмен вещества в биосфере идет на порядки быстрее, чем в геосфере. Некоторые реакции, обычные для живого вещества, неспособна выполнить геохимия. Образование планетарных запасов кремнекислоты, карбоната кальция и формирование гранитного слоя Земли – такая же заслуга живого вещества, как и образование кислородной атмосферы.

С развитием жизни на Земле напрямую связаны месторождения многих полезных ископаемых, в том числе и урана. Образование «земных» типов месторождений урана невозможно, по крайней мере, в пределах Солнечной системы и ближнего космоса.

Литература

1. Hazen, R. M., D.Papineau, W. Bleeker, R.T.Downs, J.Ferry, T.McCoy, D. Sverjensky and H. Yang (2008) Mineral evolution. American Mineralogist 93, 1693-1720.

2. Журавлев А. Сотворение Земли. Как живые организмы создали наш мир. – М.: Альпина нон-фикшн, 2018. – 514 с.

3. Лапо А.В. Следы былых биосфер, или Рассказ о том, как устроена биосфера и что осталось от биосфер геологического прошлого – Москва: Знание, 1979. – 175 с.

4. Hallbauer D.K. The plant origin of the Witwatersrand «carbon» // Minerals Sci. Eng. 1975. V. 7. № 2. P. 11-132.

5. Lyons T.W., Reinhard C.T., Planavsky N.J. The rise of oxygen in Earth’s early ocean and atmosphere // Nature. 2014. V. 506. P. 307–315.

6. Baselga-Cervera B., López-Rodas V., García-Balboa C., Costas E. Microalgae: the first nuclear engineers? An. Real Acad. Farm. Vol 79, Nº 4(2013), pag. 634-645

7. Buseck, P., and Beyssac, O., 2014. From organic matter to graphite: graphitization. Elements, 10, 421-426.

8. Батулин С.Г, Грушевой Г.В., Зеленова О.И. и др. Гидрогенные месторождения урана. Основы теории образования. М.: Атомиздат, 1980. 270 с.

МЕХАНИЗМЫ МИГРАЦИИ И СОРБЦИЯ УРАНА В ВУЛКАНИЧЕСКИХ СТЕКЛАХ И КИСЛЫХ ВУЛКАНИТАХ В РАЗЛИЧНЫХ РЕДОКС УСЛОВИЯХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВУЛКАНОГЕННОГО ТИПА (СТРЕЛЬЦОВСКАЯ КАЛЬДЕРА, ЮВ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

В.В. Полуэктов, В.А. Петров
ИГЕМ РАН, г. Москва

Стрельцовская кальдера занимает особое положение в структуре Монголо-Приаргунского вулканического пояса. Интерес к ней обусловлен уникальностью запасов локализованных в кальдере молибден-урановых месторождений, использованием разреза вулканогенно-осадочных пород (трахибазальт-трахириодациты приаргунской и перекрывающие риолиты тургинской серий) в качестве типового для Южного Приаргунья и Вост. Монголии (Дорнотская ВТС), детальной изученностью месторождений кальдеры и структур ее обрамления, а также существовавшими ранее ограничениями на опубликование материалов по урановой тематике.

С середины 50-х годов прошлого века поисковые работы Сосновской экспедиции с Кодаро-Удоканской площади (район р. Чары) переместились в Забайкалье. После открытия и разведки небольшого месторождения Дурулгуй (1953-1957 гг.) было открыто и разведано месторождение Олов (1957-1963 гг.). Освоение этого месторождения было прервано в связи с открытием уникальных Стрельцовских месторождений [25]. Сотрудники Экспедиции № 1 ИГЕМ АН СССР под руководством профессора Ф.И. Вольфсона приступили к работам с момента открытия Стрельцовского месторождения в 1963 г. Были сформированы исследовательские группы по направлениям: геоструктурному, минералого-геохимическому, метасоматитам, магматитам, изотопии и возрасту пород, метасоматитов и руд. После некоторого перерыва 1990-х годов работы на месторождениях Стрельцовской группы по предложению академика РАН Н.П. Лаверова были возобновлены и, начиная с 2000 г. до настоящего времени, группой специалистов ИГЕМ РАН проводятся комплексные геоструктурные, минералого-геохимические и петрофизические изыскания, а также мониторинговые гидро- и изотопно-геохимические исследования проб трещинно-жильных вод источников и атмосферных осадков. Работы в бóльшей своей части сосредоточены на изучении механизмов миграции и накопления урана в различных структурных обстановках и редокс условиях месторождений Тулукуевское и Новогоднее, локализованных в вулканогенно-осадочном чехле кальдеры. По классификации МАГАТЭ [33] месторождения Тулукуевское и Новогоднее относятся к вулканогенному типу, что связано с принципами систематики по признаку вмещающей породы и/или рудолокализующей структуры. Реализация описательного структурно-формационного подхода

имеет продолжительную историю, но становится все более очевидными его ограничения и необходимость перехода к моделям урановых минеральных систем [32]. Такой переход для месторождений СРП актуален и логичен, имея ввиду яркий пример пространственно-временного совмещения U руд в фундаменте и чехле кальдеры, реализованном в Антей-Стрельцовской минеральной системе [23].

Изучение процессов миграции и концентрирования U в кислых вулканитах и вулканических стеклах различного состава в карьере Тулукуевского месторождения было инициировано в 2000 г. в рамках соглашения между Российской академией наук (ИГЕМ РАН) и Министерством энергетики США (Лос-Аламосская национальная лаборатория) по проекту «Явления массопереноса урана в трещиноватых спекшихся туфах». Основной мотивацией проекта было получить исходные данные по различным параметрам фильтрационно-транспортных процессов в зоне аэрации природного аналога (карьер Тулукуевского U месторождения) и использовать эти данные в качестве дополнительной информации для обоснования безопасности хранилища радиоактивных материалов Юкка Маунтин в Неваде, США. Размещение этого объекта в зоне аэрации на глубине около 300 м от дневной поверхности инициировало всплеск публикаций по различным аспектам миграции и накопления радионуклидов [29, 46, 48]. Опубликованные нами совместно с зарубежными коллегами материалы находятся в этом ряду [36, 37, 38, 39].

Преобразование урановых руд в карьере Тулукуевского месторождения с полным основанием может рассматриваться в качестве уникального примера для изучения поведения урана в окислительной обстановке зоны аэрации. Здесь были выбраны игнимбриты трахи(рио)дацитового состава, содержащие стекло и стекловатый материал в виде фьямме и матрикса, а также высококремнистые стекла. Размеры изученного блока карьера на семи уровнях от верхнего «А» до нижнего «G» составили 200 х 200 х 200 м, включая профиль в штольне гор. +520 м, пройденной вдоль плоскости основного рудовмещающего разлома 1А. В пределах СРП рассматриваемый объект, по данным Л.П. Ищуковой [6], отличается наибольшим разнообразием ассоциаций гипергенных минералов (U карбонаты-силикаты-фосфаты). При этом продолжительное время (с момента образования около 135 млн лет назад до вскрытия месторождения карьером), процессы окисления в основном протекали в условиях насыщенности горных пород поверхностными и подземными водами. По мере отработки (1983-1998 гг.) на верхних уровнях карьера были вскрыты хорошо сохранившиеся урановые руды и урансодержащие «желваки» высококремнистого вулканического стекла, данные по которым в литературе крайне ограничены. Кроме того, в карьере в зоне разлома 1А нами впервые обнаружен гипергенный сорбционноемкий гидроксид Fe (III) – (прото)ферригидрит [21]. В порово-трещинном пространстве кислых вулканитов отмечено присутствие углеродистого вещества, которое входит

и в состав глобулярного тухолита, также впервые обнаруженного нами на данном объекте [40].

На расположенном неподалеку месторождении Новогоднее горными выработками вскрыто пластообразное тело вулканического стекла. За последние десятилетия разведки и отработки месторождений СРП это единственная находка практически неизмененного обсидиан-перлита. На этом месторождении особенности распределения урана изучались в зонах метасоматических ореолов, в минералах, вкрапленниках и обломках пород, а также в элементах деформационных преобразований кислых вулканитов, в минерализованных и открытых трещинах различного типа.

Еще раз подчеркнем радиогеоэкологический аспект проводимых на объектах СРП изысканий. Как известно, наиболее полно физико-химические условия и механизмы транспорта радионуклидов могут быть получены только при изучении природных процессов, происходящих на урановых месторождениях в различных редокс условиях [14]. В связи с этим U месторождения рассматриваются как природные аналоги параметров, процессов и явлений, которые могут происходить при хранении или захоронении радиоактивных материалов [31, 28, 47, 30, 35].

Аналоговыми исследованиями охвачен широкий спектр U месторождений: в гранитах и гранито-гнейсах (Эль Беррокал, Испания; Палмотту (Финляндия); Санерли, Китай; Камаиши, Япония), в песчаниках (Окло, Габон и Сигар Лейк, Канада), в сланцах (Кунгарра, Австралия), в щелочных (Посос де Кальдас, Бразилия) и кислых (Сьерра де Пенья Бланка, Мексика) вулканитах, в третичных осадках (Рупрехтов, Чешская Республика) [44, 46, 7, 18]. Наряду с этим в работах [16, 17] показано, что большинство связанных с аналоговыми исследованиями прогнозных моделей фильтрации потока подземных вод и миграции U (актинидов) основывается на данных о современном состоянии разрывов и их гидравлических свойствах. Однако практически не учитывается динамика развития тектонических процессов и феномен накопления U на геохимических проницаемых реакционных барьерах, классифицированных А.И. Перельманом [15]. В этой связи материалы, собранные на основании детальных и многолетних изысканий на Тулукуевском и Новогоднем месторождениях СРП, являются существенным дополнением к материалам по изучению путей, механизмом миграции и накопления U и других актинидов в различных структурных обстановках и редокс условиях. Этот опыт уже используется нами [19, 43] при разработке предложений по изучению сорбционных свойств минералов в отношении радионуклидов в породах Нижнеканского массива (Красноярский край), где осуществляется строительство первого в России пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов.

Таким образом, механизмы миграции и накопления урана в кислых вулканитах и вулканических стеклах различного состава изучались на двух объектах СРП: на Тулукуевском месторождении в игнимбритах

трахи(рио)дацитового состава, содержащих *стекло и стекловатый материал в виде фьямме и матрикса,* а также *высококремнистые стекла*, а на Новогоднем месторождении *во флюидальных и массивных стеклах обсидиан-перлитового типа.*

Тулукуевское и Новогоднее месторождения

В разрезе вулканогенно-осадочных пород Стрельцовской кальдеры окислительно-восстановительные (редокс) условия месторождения Тулукуевское с глубиной сменяются на преимущественно восстановительные на месторождении Новогоднее. Геологическая схема Стрельцовской кальдеры и положение месторождений приведены в работе В.А. Петрова и др. [20].

Тулукуевское жильно-штокверковое месторождение – один из крупнейших объектов СРП. Оно расположено в западной части Стрельцовской кальдеры, являющейся частью Тулукуевской вулкано-тектонической структуры (ВТС), сформированной в процессе позднемезозойской тектономагматической активизации (ТМА) региона. Месторождение залегает в стратифицированных осадочно-вулканогенных породах J3-K1 возраста. В верхней части месторождения, которая вскрыта Тулукуевским карьером, рудные тела «Первой рудоносной зоны» обнаружены всего в 30-50 м от современной поверхности. Положение оруденения контролируется СЗ (310-320°) крутопадающим разломом 1А и оперяющими системами трещин. Рудовмещающими в карьере являются (снизу-вверх): горизонт туфогенно-осадочных пород, покров игнимбритов и горизонт фельзитовых риолитов. Наиболее молодые образования – малочисленные дайки базальтов.

Новогоднее месторождение расположено в западной части СРП в 1 км к югу от Тулукуевского месторождения. Поскольку в пределах Тулукуевского месторождения практически не сохранилось совершенно неизмененных полустекловатых кислых вулканитов и вулканических стекол, то месторождение Новогоднее явилось неким «подарком», т.к. горными выработками на шахтном горизонте +600 м (глубина 300 м от днев. пов.) было вскрыто пластообразное тело обсидиан-перлитов (риолит-риодацитового состава) с максимальной степенью сохранности. В его приконтактовых частях интенсивно проявились постмагматические, гидротермально-метасоматические и деформационные преобразования. Вулканические стекла, особенно разновидности кислого состава, вследствие вязкости и затрудненности процессов диффузии фиксируют и сохраняют весь спектр минеральных и деформационных преобразований, включая начальные стадии девитрификации с образованием кристаллитов и полную раскристаллизацию стекла [12, 13]. Уникальность объекту придает тот факт, что это единственная находка неизмененного обсидиан-перлита за последние десятилетия разведки и разработки месторождений СРП.

Урановые руды при определяющем структурном факторе локализованы в зоне крутопадающего Новогоднего меридионального разлома. Основным рудообразующим минералом является настуран. Для руд месторождения Новогоднее характерен обычный для СРП устойчивый набор элементов: U, Mo, Pb и As [6].

Метасоматическая и рудная минерализация, химический состав пород Тулукуевского месторождения

Все вскрытые Тулукуевским карьером вулканиты подвержены гидротермальным метасоматическим преобразованиям с элементами зонального строения. Метасоматическая зональность отчетливо контролируется главным растворопроводящим и рудовмещающим разломом 1А (рис. 1.). Последовательность минеральных и гипергенных преобразований вмещающих пород и формирования рудной минерализации отражена в табл. 1.

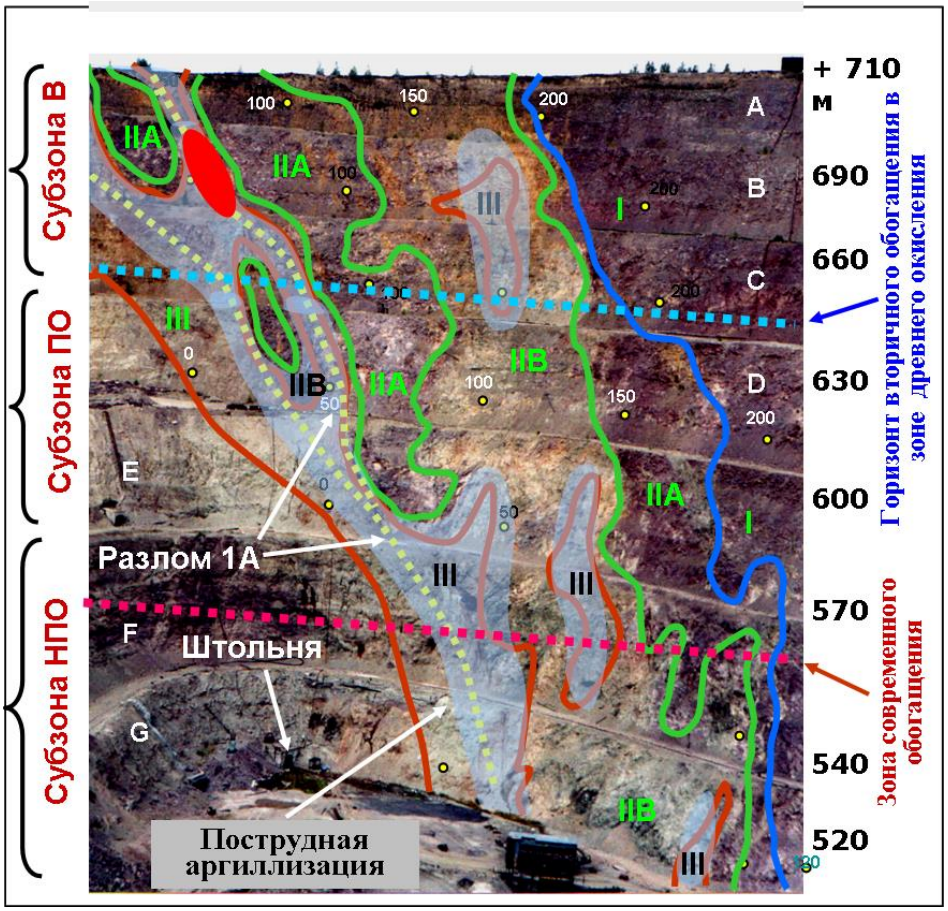


Рис. 1. Минеральная зональность гидротермальных и гипергенных преобразований в Тулукуевском карьере. Показаны семь уровней «A-G» СЗ борта карьера с зоной разлома 1А.

I – внешняя зона метасоматического ореола; IIА и IIБ – промежуточная зона; III – внутренняя зона интенсивной гидрослюдизации и осветления. Пострудная аргиллизации – светло-голубая заливка, разлом 1А – штрих-пунктирная линия, U-рудное тело – красный эллипс. Субзоны: В – окисления и выщелачивания, ПО – полного окисления, НПО – неполного окисления

Таблица 1

Минеральный состав «свежих», измененных игнимбритов и наложенных гидротермально-метасоматических, рудных и гипергенных минеральных ассоциаций

Слабоизмененный игнимбрит ⇒	Кварц, Плагиоклаз, К-Полевой шпат, Биотит, Роговая обманка, Гематит, Акцессорные минералы – Циркон, Сфен, Магнетит, Ильменит, Апатит и др.
Дорудная стадия. Метасоматически измененный гидрослюдизированный игнимбрит (гидрослюдизиты) ⇒	Кварц, Гидрослюда (Гидрослюда, смешаннослойный Иллит-Смектит), Карбонат (Анкерит, Кальцит, Сидерит, Брейнерит), Реликтовые минералы (К-Полевой шпат, Альбит, Кварц)
Дорудные (доурановые) прожилки кварц-карбонат-сульфидного состава ⇒	Кварц, Сидерит, Анкерит, Пирит, Сфалерит, Галенит, Халькопирит
Урановая минерализация ⇒	Настуран, Коффинит, (Браннерит), Иордизит, Fe-Zn-Pb-Cu-Сульфиды, Кварц
Рудосопровождающия метасоматическая и прожилково-метасоматическая минерализация ⇒	Бертьерин, Сидерит, Анкерит, Кварц, Гематит, темно-фиолетовый Флюорит, Твердое углеродистое вещество (ТУВ)
Пострудная прожилково-метасоматическая минерализация ⇒	Каолинит, Смектит, Бертьерин
Пострудные прожилки ⇒	Кальцит, Флюорит, Кварц, Каолинит, Сульфиды
Гипергенная минерализация ⇒	Гетит, Гематит, Гипс, (Прото)Ферригидрит, Mn окси-гидроксиды

Дорудные метасоматические преобразования. В вулканогенных породах Тулукуевского карьера широко и интенсивно проявились низкотемпературные метасоматиты кислотного типа. Они характеризуются развитием диоктаэдрических иллитов и смешаннослойных иллит-смектитов в ассоциации с Fe карбонатами, кварцем и в дальнейшем обозначены термином «гидрослюдистые метасоматиты» [1].

В вулканитах почти повсеместно распространена ранняя поствулканическая гематитизация. Она относится к типу так называемого «краснокаменного» аэрального окрашивания. Распространение гидрослюдистых метасоматитов отчетливо контролируется разломами и зонами трещиноватости, а также контактами пород. В строении ореола гидрослюдизитов обнаруживается отчетливая зональность с формированием *внешней, промежуточной и внутренней зон.*

Внешняя зона (I) представлена относительно свежими неизмененными игнимбритами сиреневых оттенков. Биотит в них сохранен или частично замещен анкеритом и гематитом. Плагиоклаз в основном деанартизирован, а вкрапленники калиевого полевого шпата, основная масса и фьямме содержат включения метасоматических

карбонатов и светлой тонкочешуйчатой слюды. Амфибол полностью замещен карбонатами. Титаномагнетит и ильменит частично замещены гематитом и лейкоксеноподобным агрегатом (ЛА). Иногда встречаются поздние прожилки бертьеринового и кварц-карбонатного состава.

Промежуточная зона (II) включает две подзоны, из которых первая (IIА) соответствует породам, еще сохраняющим серо-фиолетовую окраску за счет присутствия гематита, а вторая (IIБ) отвечает породам светло-бежевой и кремовой окраски, в которых гематит разрушен. Полевые шпаты и основная масса пород замещены метасоматическими карбонатами (анкеритом, кальцитом, сидероплезитом), смешаннослойными иллит-смектитами и кварцем. В редких случаях обнаруживаются неразбухающие иллиты. Мощность промежуточной зоны (II) достигает 110 м.

Внутренняя зона (III) наиболее интенсивных преобразований контролируется разломом 1А. Ее мощность варьирует от 2 до 50 м. Плагиоклаз и биотит здесь полностью замещены светлой тонкочешуйчатой слюдой, анкеритом, реже сидеритом, но реликты калишпата сохраняются. Из метасоматических минералов наиболее широко распространены иллиты и смешаннослойные иллит-смектиты, Fe-карбонаты и кварц. Для внутренней зоны характерны интенсивные катаклаз, трещиноватость и прожилкование. Именно поэтому в зоне максимальных гидрослюдистых преобразований наиболее интенсивно проявились более поздние процессы рудной, пострудной жильной и метасоматической минерализации, включая и пострудную аргиллизацию.

Химический состав относительно свежих и измененных пород. Несмотря на то, что процессы предрудного метасоматоза проявились очень широко, контрастных преобразований химического состава пород не произошло. Обусловлено это частичной незавершенностью метасоматических реакций и, как следствие, обилием минералов-реликтов в измененных породах. Вариации химического состава связаны с более поздними рудосопровожающими или пострудными прожилково-метасоматическими ассоциациями, что отображено в табл. 2.

Содержание K_2O при гидрослюдистом метасоматозе показывает незначительный рост (до 5 %), а содержание Na_2O или незначительно уменьшается (до 3-5 %) или остается неизменным. Уменьшение SiO_2 на 1-5 % во внутренних зонах обусловлено развитием метасоматических карбонатов и гидрослюд. Отсутствие явных тенденций изменений соотношений Fe (II) и Fe (III) и выноса Fe_2O_3 при переходе от зоны с дисперсным гематитом (IIА) к зоне обеленных пород (IIБ) может объясняться внутрирудной гематитизацией, хлоритизацией и развитием Fe-карбонатов.

Таблица 2

Химические составы исходных и измененных игнимбритов из метасоматических зон Тулукуевского карьера (уровни B-F)

Номер образца	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	S	H_2O^-	H_2O^+	п.п.п.	Сумма
B-I (B150)	68,07	0,49	15,76	2,33	0,34	0,02	0,52	0,50	3,76	4,29	0,07	0,02	0,86	1,23	2,55	98,38
C-I (C105-1)	67,43	0,53	16,10	1,52	0,19	0,04	0,41	1,49	4,14	4,03	0,07	0,02	0,56	1,63	2,93	98,72
D-I (D200)	64,49	0,57	15,85	3,12	0,27	0,03	0,53	1,92	3,52	4,90	0,09	0,03	0,36	1,24	3,02	98,07
E-I (E40)	67,75	0,49	16,16	2,67	1,17	0,04	0,46	2,01	4,74	2,81	0,05	0,20	0,34	1,32	3,87	101,26
F-I (F30)	62,94	0,69	16,79	4,10	1,44	0,04	0,59	1,88	3,66	4,26	0,11	0,11	0,41	1,30	3,82	98,99
B-II (B55-4)	59,71	0,66	17,13	4,68	0,38	0,06	0,62	4,49	3,32	4,56	0,12	0,01	0,73	1,37	5,39	100,74
C-II (C105-3)	65,36	0,67	17,33	2,91	1,09	0,02	0,44	0,77	4,00	4,85	0,10	0,07	0,35	1,70	2,28	98,79
D-II (D103-2A)	67,62	0,62	14,55	1,97	0,45	0,02	0,52	1,58	3,63	4,07	0,10	0,18	0,31	0,87	2,55	97,41
E-II (E20-2A)	62,54	0,58	16,21	4,34	0,93	0,05	0,41	2,32	3,83	4,57	0,07	0,03	0,30	1,56	3,20	98,15
F-II (F21)	66,20	0,53	15,72	3,57	1,08	0,06	0,73	1,72	4,06	3,59	0,08	0,11	0,39	1,32	4,31	100,68
B-III (B55-1)	63,07	0,73	18,55	2,75	0,25	0,01	0,47	0,89	2,82	5,09	0,12	0,02	0,73	1,85	3,25	97,77
C-III (C105-4)	65,26	0,65	17,02	2,27	0,63	0,03	0,34	1,29	3,87	4,52	0,06	0,09	0,48	2,35	2,39	97,78
D-III (D103-3)	63,68	0,55	16,03	4,66	0,65	0,02	0,40	1,59	4,13	4,09	0,09	0,02	0,30	1,67	2,83	98,09
E-III (E20-1)	64,24	0,55	15,35	2,96	0,28	0,05	0,37	2,12	3,70	4,53	0,07	0,03	0,25	1,02	2,80	96,77
F-III (F20)	61,45	0,76	18,89	6,07	0,88	0,01	0,46	0,20	3,39	4,07	0,10	0,27	1,10	2,19	4,07	99,74

Примечание: Анализы выполнены с использованием РФА (ЦКП «ИГЕМ-Аналитика»); ΣFe пересчитано на Fe_2O_3; П.П.П., FeO, H_2O^-, H_2O^+ определялись классическим методом химического анализа («мокрая химия»). FeO, H_2O^- и H_2O^+ соответственно не включены в сумму. I, II, III – игнимбриты из различных зон метасоматических ореолов (см. рис. 1). В № образца, например, B-I (B 150), цифра 150 соответствует расстоянию от разлома 1A (м).

Жильная и урановая минерализация проявлены в ореоле измененных пород и лишь в очень редких случаях могут выходить за его пределы. По отношению к массовому отложению U руд жильная минерализация развивается в дорудную, собственно рудную и пострудную стадии. Дорудная стадия следует за гидрослюдистыми преобразованиями и представлена маломощными и немногочисленными прожилками кварца с подчиненным количеством Fe-карбонатов и некоторых сульфидов. Наиболее ранним U минералом является браннерит, который распространен исключительно в виде мелких рассеянных псевдоморфоз по титансодержащим минералам (сфен, пседоморфозы Ti-минералов по биотиту). Гнездово-вкрапленные скопления настурана (иногда совместно с коффинитом) обычно приурочены к участкам повышенной трещиноватости пород. Метасоматические выделения U минералов пересекаются прожилковым настураном и молибденитом с гребенчатым кварцем, анкеритом, бертьерином и темноокрашенным флюоритом. Кроме U минералов и молибденита в прожилках отмечаются более поздние относительно них галенит, клейофан, блеклые руды, халькопирит и некоторые другие сульфиды, а также бертрандит. Рудосопровождающий Fe-бертьерин (7Å-хлорит) тяготеет к скоплениям богатых руд и может распространяться на значительные (до первых десятков м) расстояния от разлома 1А.

Кроме урановых минералов в верхней части разлома 1А, контролирующего минерализацию «Первой рудоносной зоны», было обнаружено черное, аморфное, хрупкое урансодержащее углистое вещество, по оптическим свойствам отвечающее тухолиту (рис. 2). Химический состав (мас. %): C – 49,47, O – 29,08, Mg – 0,28, Ca – 1,58, Al – 0,81, Si – 0,43, S – 0,59, U – 10,72. Тухолит слагает тонкие (0,5-1 мм) прожилки, иногда совместно с кальцитом. Временные взаимоотношения тухолита и настурана остаются неопределенными.

Пострудная жильная минерализация представлена пластинчатым кальцитом, светлоокрашенным и фарфоровидным флюоритом, каолинитом и диккитом, кварцем, реже адуляром, баритом, пиритом и марказитом. Минералы каолинитовой группы более характерны для зон брекчирования.

Пострудная аргиллизация, для которой характерно метасоматическое развитие смектита и каолинита, отчетливо контролируется зонами разрывных нарушений. Особенно контрастно и интенсивно эти минералы распространены в пределах разлома 1А (см. рис. 1). Ширина зон аргиллизации может достигать 40 м. Максимальное развитие глинистых минералов наблюдается только в непосредственной близости от стенок трещин, а мощность этих узких зальбандов не превышает первые см. Интенсивность аргиллизации зависит от степени тектонической нарушенности вмещающих пород, но не от близости к современной поверхности. Как видно из рис. 1, зоны пострудной аргиллизации в основном совпадают с зонами максимальных карбонат-гидрослюдистых изменений ранней дорудной стадии (зона III).

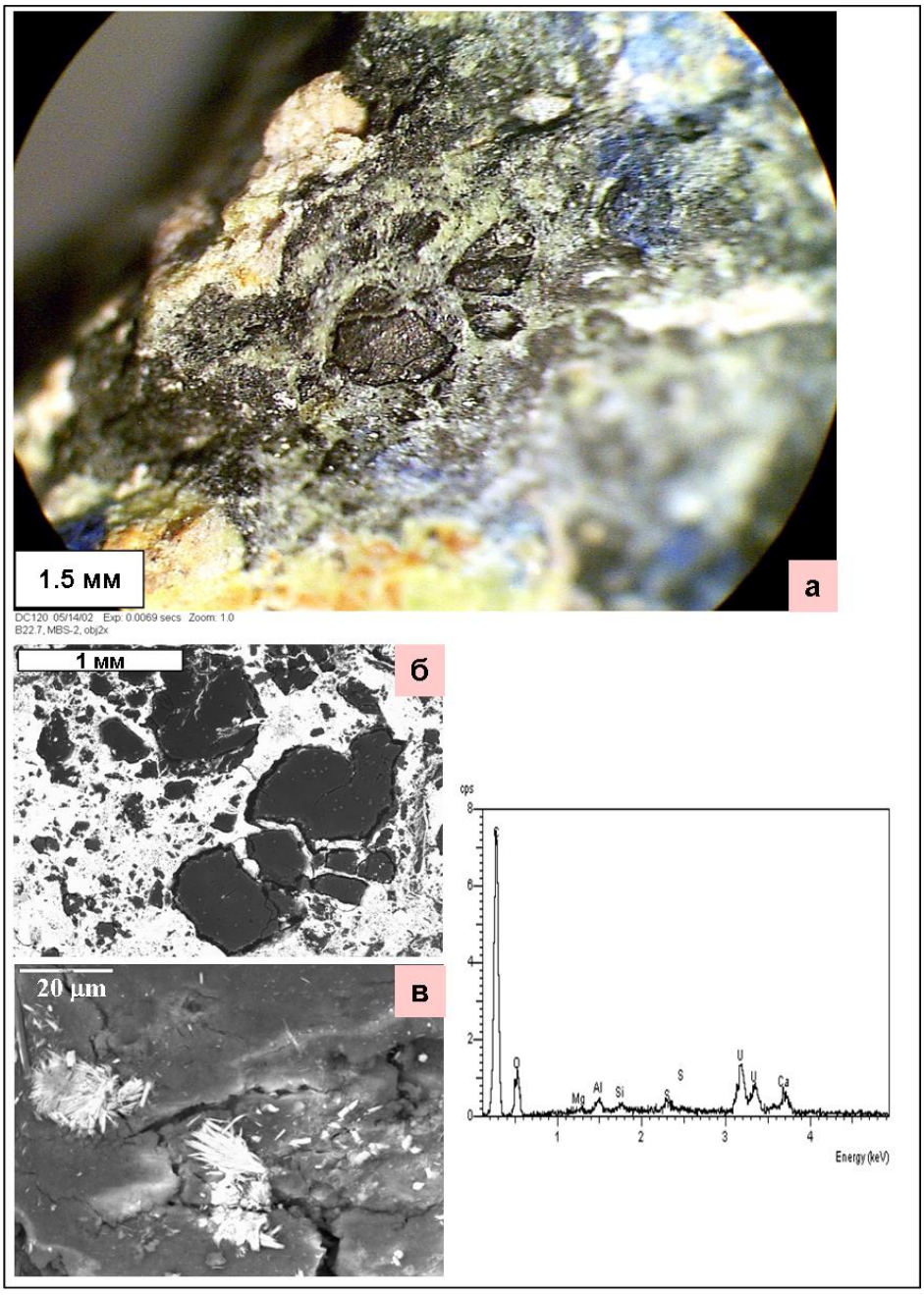


Рис. 2. Форма выделений тухолита и уранофана:
а) выделения тухолита (черное) и уранофан по карбонату, жел.-зел. агрегаты внизу снимка; б) глобулярные выделения тухолита (серое) и уранофан по карбонату (белое) – BSE compo (отр. электр.); в) новообразования волокнистого уранофана (белое) на поверхности тухолита (серое). В тухолите обогащенные U участки выражены ярко (отр. электр.). Приведен энергодисперс. спектр яркого участка тухолита

Углеродистое вещество вмещающих пород

Под углеродистым веществом вслед за В.Г. Мелковым [9] мы понимаем разнообразные по свойствам и физическому состоянию соединения углерода с водородом, содержащие переменные количества O, N и S. Изучение распределения и содержаний твердого углеродистого вещества (ТУВ) в 67 образцах измененных игнимбритов Тулукуевского карьера показало почти постоянное его присутствие. Особенно это

характерно для внутренней зоны максимальной гидрослюдизации (зона III), где концентрации ТУВ вдоль разлома 1А и диагональной к ней зоны трещиноватости варьируют в пределах 0,05-0,4 мас. %. Углеводороды откладывались и в течение урановорудной стадии, входя в состав тухолита. В единичных случаях углеродистое вещество обнаруживалось в слабоизмененных игнимбритах (до 0,1 мас. %). Ввиду ультрамикроскопических размеров (<<0,001 мм) выделений углеводородов их точная видовая диагностика не проводилась.

По сведениям В.И. Покровской (неопубликованные данные), приведенным в работе И.В. Мельникова [10], в подошве покрова игнимбритов Тулукуевского месторождения присутствуют тончайшие гнездовые, прожилковые и вкрапленные выделения твердых битумов. В составе последних автором отмечены ароматические и алифатические углеводороды, а в отдельных образцах металлоорганические и фосфорорганические соединения. По другим данным [9] углеродистое вещество в пределах Тулукуевского месторождения находится как в крутопадающих трещинах с рудной минерализацией, так и в межслоевых срывах, в которых ранее они ошибочно принимались за угли. С более ранней частью процесса минералообразования связаны антраксолиты, а с более поздней – кериты. Взаимоотношения U минералов и углеводородов достаточно противоречивы.

Полученные нами данные с учетом анализа литературных источников [45] позволяют предполагать, что в пределах изучаемого блока Тулукуевского карьера формирование и перераспределение органического вещества происходило в процессе осадконакопления и последующей гидротермальной деятельности. В процессе гидротермальной деятельности реализовался механизм возгонки углеводородов с гидротермами по зоне разлома 1А и их диффузии во вмещающие породы, что, возможно, объясняет формирование тухолита.

Очевидно, что все эти факторы влияют на особенности формирования редокс условий в зоне аэрации Тулукуевского месторождения и их необходимо учитывать при создании модели миграции и накопления U.

Зона гипергенеза, древняя и современная зоны окисления Тулукуевского месторождения

Гипергенные преобразования вмещающих игнимбритов. Гипергенные минеральные преобразования пород в пределах изученного блока Тулукуевского карьера обусловлены развитием процессов поверхностного окисления, дезинтеграции вмещающих вулканогенных пород и почвообразования под влиянием атмосферных факторов. Морфология зон гипергенных преобразований контролируется, с одной стороны, разрывными нарушениями и зонами трещиноватости, а с другой – интенсивностью проявления *дорудных, рудосопровождающих и*

пострудных процессов, которые, в свою очередь, значительно влияют на проницаемость пород. В верхней части разреза и по падению крупных разрывных нарушений и зон трещиноватости происходит интенсивное образование оксидов и гидроксидов Fe, Mn, Ti и частичное растворение гидротермальных карбонатов. На нижних горизонтах процессы окисления вулканитов все более стягиваются к крупным проницаемым зонам и прослеживаются на всю глубину вскрытия месторождения. Все эти факторы в совокупности существенным образом влияют на условия миграции, сорбции и перераспределение урана.

Для кальцитов мучнистого подпочвенного горизонта, обнаруженного на верхнем уровне «А» Тулукуевского карьера, проведены исследования изотопных составов С и О по штуфным образцам. Исследования показали, что изотопный состав углерода $\delta^{13}C_{PDB}‰$ = около -8, а кислорода $\delta^{18}O_{SMOW}‰$ =18-20. Для сравнения были изучены гидротермальные карбонатные жилы Тулукуевского месторождения, а также метасоматические и жильные карбонаты других месторождений СРП. Более детально исследования подпочвенных и жильных карбонатов были представлены ранее [20, 22].

Кислотно-щелочная реакция верхних горизонтов почв нейтральная или слабощелочная (7,2-7,6), а в нижних горизонтах она может становиться щелочной. Этот фактор представляет собой существенное препятствие для образования каолинитового профиля выветривания, который характерен для кор выветривания кислого класса, образующихся в условиях влажного (тропического, субтропического) климата с богатым растительным покровом [15]. В Вост. Забайкалье с его преобладанием сухих степей такие условия не возникают.

Гипергенные преобразования Mo-U руд. Первичные руды в карьере подвержены процессам древнего (до отработки карьера) окисления, которое выражено в формировании трех горизонтально расположенных субзон (сверху вниз): *выщелачивания (В), полного окисления (ПО) и неполного окисления (НПО)* (см. рис. 1). В подошве зоны выщелачивания располагается горизонт вторичного уранового обогащения, совпадающий по расположению с зеркалом подземных вод до вскрытия карьера.

Древняя зона окисления U месторождений СРП относится в основном к гидроксидно-силикатному типу, для которого характерен постепенный переход первичных руд в гидроксиды и силикаты урана с сохранением морфологии выделений первичных руд [2, 4]. Минералы U, образовавшиеся в условиях древней зоны окисления, гидронастуран и ургит, характеризуют начало этого процесса, а уранофан его завершение: $U^{IV}O_2$ (настуран) $+O_2 +H_2O \Rightarrow U^{VI}O_3 \cdot nH_2O$ +Me (гидронастуран) $\Rightarrow MeU^{VI}_2O_7 \cdot nH_2O$ (гидроксиды: велсендорфит, ургит) + Si $\Rightarrow Me(UO_2)_2[SiO_4]_2 \cdot nH_2O$ (уранофан), где Me = Ca, Pb, Ba, Sr, K, Na.

Из сложных гидроксидов урана на месторождении развиты как велсендорфит ($MeU^{VI}_2O_7 \cdot nH_2O$) (Me=Pb), так и минералы его группы:

кальцураноит и метакальцураноит (Me=Ca), бауранoит (Me=Ba) и их промежуточные разновидности. В латеральном направлении в пределах настурановых рудных тел наблюдается развитие горизонтальной зональности, которая выражена в появлении в их центральных частях преимущественно гидроксидов, а на флангах (рис. 3) силикатов урана (уранофан, β-уранофан).

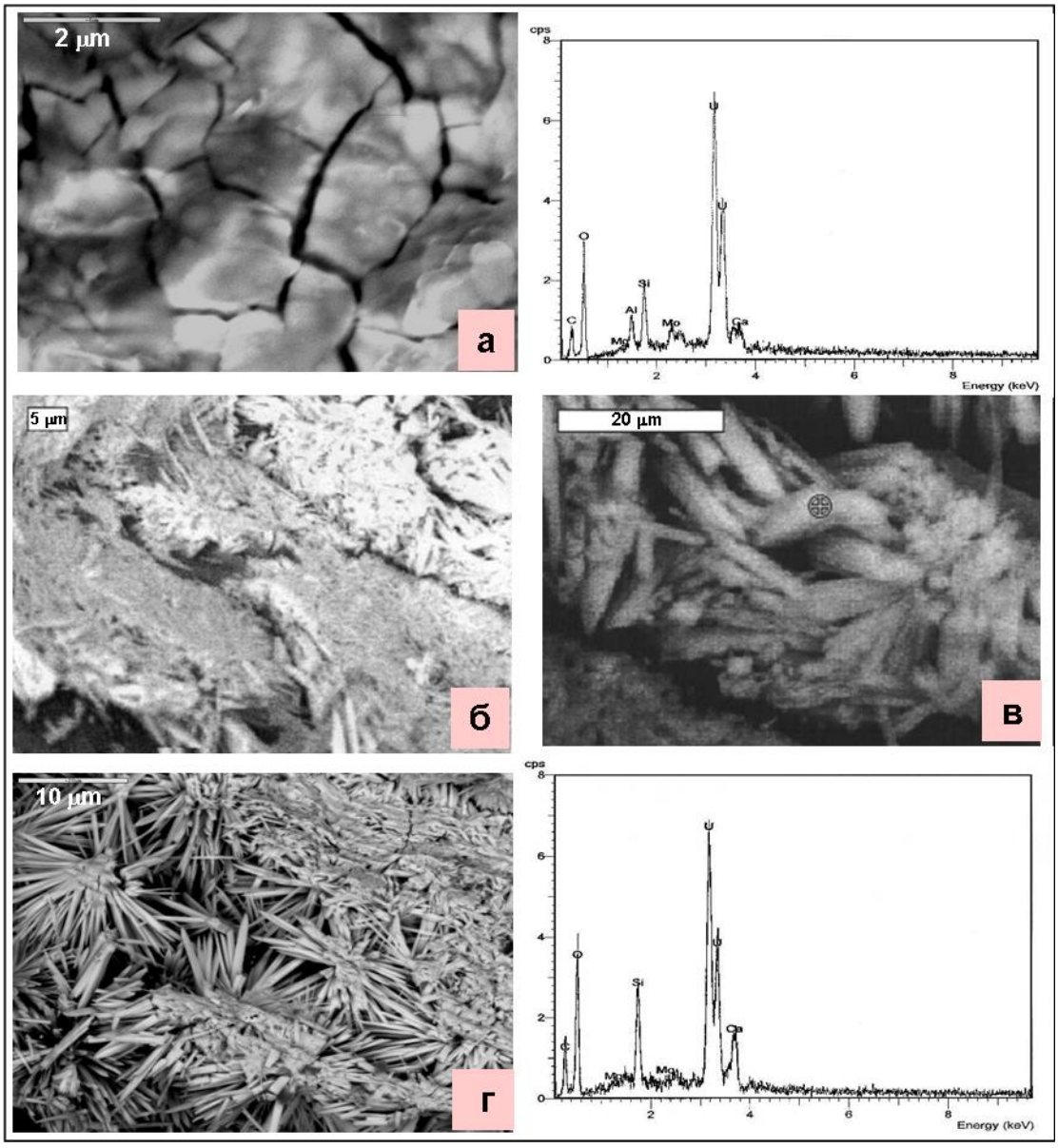


Рис. 3. Уранофан из трещинного заполнения в тухолите (сканир. электр. микроскоп): а – метаколлоидная структура прожилков уранофана, его энергодисперсионный спектр; б, в – стадии раскристаллизации уранофана из геля; г – конечный продукт раскристаллизации уранофана; формы кристаллов α-уранофана

Условия минералообразования древней зоны окисления, по-видимому, соответствовали близнейтральной или слабощелочной среде, недостаточно кислой для образования других минералов U (VI). Близнейтральная реакция воздействующих растворов в значительной

степени определялась составом вмещающих пород, содержащих заметные количества метасоматических и прожилковых карбонатов и полевых шпатов (минералов-нейтрализаторов) и, что более важно, незначительное количество сульфидов, растворение которых не обеспечивало достаточную кислотность [4]. Поэтому, например, доля U слюдок (отенита, ураноспинита, новачекита и др.) в общем объеме вторичной U минерализации невелика и наблюдаются они только в участках с относительно повышенными содержаниями сульфидов и As. В составе слюдок фиксируется заметное (до первых процентов) количество U(IV). По-видимому, накопление восстановленного U в слюдках взаимосвязано с общим процессом вторичного обогащения (образования урановых черней), которое проявилось как часть процесса древнего гипергенеза. Кроме того, в участках, переходных от зоны окисления к зоне вторичного обогащения, формируется янтинит – минерал, содержащий и U(VI), и U(IV) [3]. Участки отложения черней тяготеют к крутопадающим трещинным зонам, обогащенным углеродистым веществом, а также, возможно, тухолитом, где создаются локальные восстановительные условия на фоне окружающей окислительной обстановки.

После вскрытия Тулукуевского месторождения карьером и понижения уровня зеркала подземных вод нарушилась вся гидрогеологическая и гидрогеохимическая система, изменились Eh-pH условия. При этом древняя зона окисления, включая субзоны *выщелачивания, полного и неполного окисления*, а также горизонт вторичного обогащения оказались экспонированы для современных окислительных процессов. Уровень зеркала подземных вод сместился с абсолютной отметки +640 м до горизонта +485 м. Ниже этой отметки расположена зона с преобладанием восстановительных условий, а вмещающие игнимбриты находятся в водонасыщенном состоянии.

Современная зона окисления активно формируется в настоящее время со своим специфическим набором минералов-новообразований: поздним уранофаном, хейвиитом, калькурмолитом, умохоитом, моуритом, либигитом и др. минералами [2]. С углублением карьера ниже уровня древнего зеркала подземных вод (ниже +640 м) и при достижении горизонта развития Mo-U (уран-сульфидного) оруденения характер гипергенных процессов усложнился, поскольку в зону аэрации попали U-сульфидные руды. Окисление иордизита (тонкодисперсного дисульфида Fe и Mo), пирита и других сульфидов обусловило понижение величины pH среды до 3-5. Кислые молибденсодержащие растворы, возникшие при окислении иордизита, реагировали с первичными минералами U (настураном, коффинитом, тухолитом) и мобилизовали из него U, который затем вошел в состав молибдатов – умохоита, моурита и калькурмолита (UO_3 – 64,17, MoO_3 – 18,99, CaO – 3,72, FeO – 2,18, K_2O – 0,79, Al_2O_3 – 1,96, SiO_2 – 1,19, сумма – 93,00). Минералы идентифицированы Карташовым П.М., ИГЕМ.

Уранофановые прожилки, сформировавшиеся в условиях современной зоны окисления, гораздо более тонкие (>1 мм), чем при древнем окислении, часто характеризуются метаколлоидными структурами (трещины усыхания, глобулярность, скрытокристалличность). Кристаллические агрегаты уранофана местами замещены спутанноволокнистым, войлокоподобным хейвиитом ($Ca(UO_2)_2[Si_2O_5]_3 \cdot 4H_2O$), который идентифицирован Карташовым П.М., ИГЕМ.

Карбонаты урана развиваются только в гидроксидно-силикатной зоне окисления и совершенно отсутствуют в участках окисления U-M (сульфидсодержащих) руд с гораздо более кислой средой. На месторождении известно четыре карбоната уранила, отлагавшихся из современных вод: либигит ($Ca_2(UO_2)[CO_3]_3 \cdot 10H_2O$), целлерит ($Ca(UO_2)[CO_3]_2 \cdot 3\text{-}5H_2O$), жолиотит ($(UO_2)[CO_3] \cdot 2H_2O$) и уранкалькарит ($Ca(UO_2)_3[CO_3](OH)_6 \cdot 6H2O$).

В связи с отработкой карьера и окислением Mo-U руд происходил вынос и рассеяние U, подвижность его в современной зоне окисления Тулукуевского карьера ограничивается первыми сантиметрами от рудных тел. Это незрелая зона окисления, находящаяся в стадии формирования. Об этом свидетельствует обилие водорастворимых сульфатов, относительно небольшое распространение гипса, а также почти полное отсутствие минералов группы алунита (известны лишь единичные находки ярозита).

Оксиды и гидроксиды железа, марганца и титана

В вулканогенных породах карьера Тулукуевского месторождения широко распространены оксиды и гидроксиды Fe, Mn и Ti, формирование которых связано с различными этапами гидротермального и гипергенного преобразования. В незначительном количестве в шлифах фиксируется ЛА, приуроченный к участкам развития Ti-содержащих минералов. С предрудными метасоматитами связано локальное перераспределение Fe в пределах отдельных участков, его растворение и/или вынос, приводящий к резко выраженному осветлению пород. Рудосопровождающие преобразования тесно связаны с интенсивной гематитизацией всех разновидностей пород.

Гипергенные преобразования в карьере выражены в развитии процессов площадного и линейного окисления и дезинтеграции пород, сопровождающихся, помимо карбонатизации, образованием оксидов и гидроксидов Fe, Mn и Ti. Зона окисления максимально развита в участках с интенсивной трещиноватостью и в метасоматически измененных исходных вулканитах. Гидроксиды и оксиды Fe образуют обильные налеты, корочки на плоскостях трещин, плотные или пористые порошкообразные массы в пустотах пород с характерными яркими буровато-рыжими и желтыми оттенками. Гидроксиды Mn – тонкие налеты в виде причудливых узоров и порошкообразные сажистые массы черного цвета.

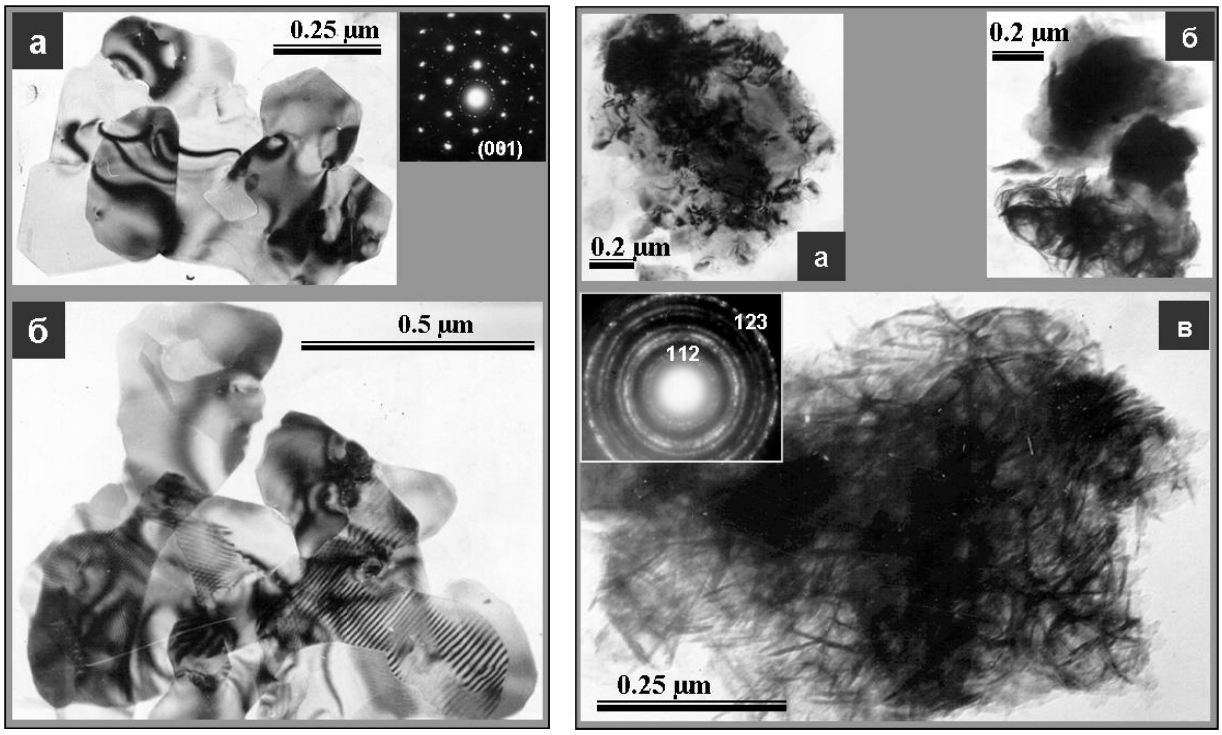
Для изучения характера и форм распределения оксидов и гидроксидов Fe-Mn проводилось детальное минералогическое опробование всех уровней карьера, макроскопическая и электронно-микроскопическая характеристика образцов игнимбритов. В отобранных пробах были обнаружены и диагностированы следующие минералы: гематит (Fe_2O_3), гётит (FeOOH), Fe-вернадит ($MnO_2 \cdot nH_2O$), (прото)ферригидрит ($2{,}5Fe_2O_3 \cdot 4{,}5H_2O$, где Fe_2O_3 – 83,12 мас. %, H_2O – 16,88 %).

Гематит присутствует, за исключением уровня «А», во всех отобранных образцах в виде корочек и обильных налетов бежевого, кремового и бордового цвета в волосовидных и более крупных трещинах (1-2 мм), а также в гематитизированных участках линзовидных фьямме. Наблюдается в двух основных модификациях: дисперсные спутано-волокнистые агрегаты и пластинчатые кристаллы и их агрегаты. На кристаллах гематита проявлен «муаровый» узор, который характерен для всех пластинчатых кристаллов и, по-видимому, связан с особенностями формирования их кристаллической структуры (рис. 4А).

Спутано-волокнистый гематит встречен только в образце на уровне «С». В отличие от пластинчатой его разновидности, морфология выделений указывает на иные условия образования (рис. 4Б). В отдельных случаях гематит образуется по краям агрегатов (прото)ферригидрита. В этом случае можно однозначно говорить о формировании гипергенного гематита. Во всех остальных случаях о гипогенном или гипергенном генезисе гематита можно лишь предполагать.

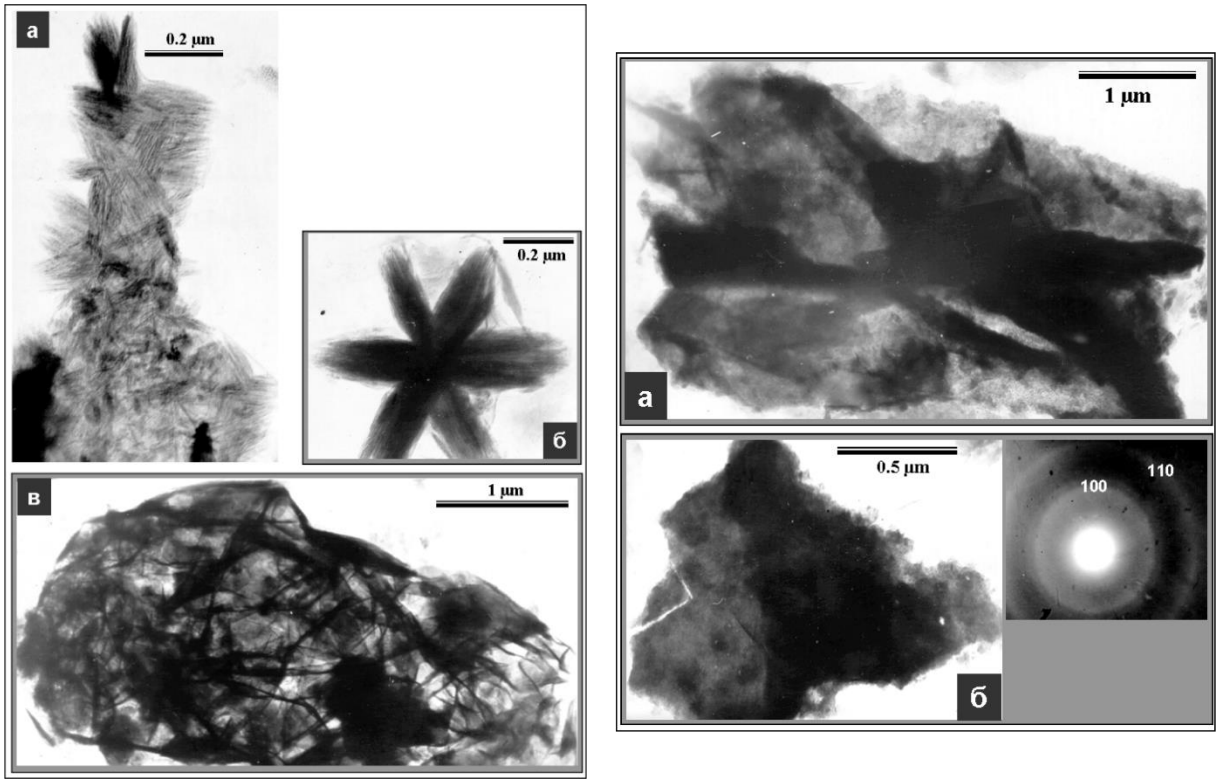
Гётит как типичный гипергенный минерал отмечается в основном на двух самых верхних уровнях Тулукуевского карьера «А» и «В». Развивается он в виде налетов, примазок и причудливых узоров желтовато-бурого и бурого цвета на плоскостях трещин толщиной менее 1 мм, а также порошкообразных сажистых масс черно-бурого цвета. Гётит здесь встречается в виде: агрегатов тонко-дисперсных бесформенных частиц размером сотые доли μm; мелкокристаллических игольчатых агрегатов различной степени дисперсности размером десятые доли μm, включая закономерные (под углом 60°) сростки-тройники; агрегатов очень мелких, визуально не различимых, текстурированных и структурно-упорядоченных частиц часто в виде пленок толщиной до 0,01μm (рис. 5А). Также обнаружены следы гётита по краям агрегатов (прото)ферригидрита (сотые доли μm) в образцах, отобранных на нижних уровнях карьера (уровень «G» и ниже).

Из минералов Mn обнаружены только спутанно-волокнистые агрегаты Fe-вернадита, который встречается вместе с гётитом, но в меньшем количестве. Fe-вернадит находится в тонкой смеси со слоистыми силикатами (рис. 5Б).



А Б

Рис. 4 А и Б. А – пластинчатый монокристальный гематит с примесью слоистого силиката (а) и агрегат пластинчатых кристаллов гематита (б) с «муаровым» узором в виде полосок; Б – дисперсный, волокнистый и спутанноволокнистый гематит (а, б, в) и его пластинчатая разновидность (а, б). Просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ) с картиной электронной дифракции



А Б

Рис. 5 А и Б. А – агрегат мелкокристаллического игольчатого гётита (а); закономерные сростки-тройники (б); Fe-вернадит (в); Б – агрегаты протоферригидрита (а) и ферригидрита (б), с гётитом и гематитом по краям

Современная зона окисления, как уже было отмечено, находится в стадии формирования и обладает своим набором U минералов-новообразований. Об этом также свидетельствует формирование метастабильного гипергенного минерала из группы гидроксидов Fe^{3+} – (прото)ферригидрита, который был впервые обнаружен нами в субвертикальной трещине с урановой минерализацией на самом нижнем уровне «H» карьера [21]. Это первая находка продуктов жизнедеятельности железобактерий на месторождениях Стрельцовской кальдеры.

Агрегаты (прото)ферригидрита, открытого Ф.В. Чухровым [26], имеют явно органогенное (бактериальное) происхождение и различаются степенью структурной упорядоченности. О его биогенном происхождении свидетельствуют характерные трубчатые структуры, дисперсность, а также реликтовые пики фосфора на энергодифракционных спектрах (ЭД-спектры) от данных частиц. В образце цвет минералов этой группы изменяется от бурого до светло-желтого и зависит от содержания кремнистого геля. Его образование представляет результат жизнедеятельности железобактерий, которые активны при pH около 6-7 и температурах от 4 до 27 ºС. Как следует из экспериментальных данных, ферригидрит является неустойчивым минералом. Поэтому его нахождение в природе вероятно лишь в геологически весьма молодых образованиях. С течением времени он самопроизвольно переходит в гематит или гётит. Этот процесс виден по краям агрегатов ферригидрита, где наблюдаются следы гётита и гематита, которые фиксируются по появлению рефлексов на микродифракционных картинах (см. рис. 5Б).

В пределах Новогоднего месторождения в зонах гидрослюдизации тонкодисперсный настуран сопровождается кремово-красноватой гидротермальной гематитизацией. Аналогичные преобразования характерны лишь для локальных участков альбитизации, сферолитовых риолитов и приконтактовых частей пластообразного тела вулканического стекла. Как было отмечено выше, основная часть месторождения находится ниже зоны окисления и поэтому гипергенная минерализация (гидроксиды Fe, Mn) представлена здесь незначительно.

Химический состав вод Тулукуевского месторождения

Изучение состава трещинно-жильных вод и атмосферных осадков необходимо для выяснения условий миграции и накопления U в зоне аэрации. Отбор проб трещинно-жильных вод производился в 2000-2015 гг. и выборочно до 2018 г. на нижних горизонтах карьера в местах выхода постоянных источников на крутые стенки уступов. Воды также отбирались из штольни горизонта +520 м, пройденной на нижнем уровне «G» карьера вдоль основного разлома 1А (см. рис. 1). Гидрогеохимические исследования показывают, что общая минерализация трещинно-жильных вод варьирует от 600 до 1500 мг/л. Воды имеют карбонат-сульфат-хлорид-натровый состав, где карбонат и сульфат могут меняться местами.

В табл. 3 в качестве примера приведены данные за 2002 г. по химическому составу трещинно-жильных вод, атмосферных осадков и вод штольни горизонта +520 м. Отсутствие Fe(III) и Fe(II) в таких типах вод является, по-видимому, их общей характеристикой [26].

Величины pH и Eh были измерены в лабораторных условиях при температуре 20 °C. Как видно из сравнения анализов вод, все они относятся к близнейтральным-слабощелочным (рис. 6). Анализ атмосферных осадков указывает на их значительно большую величину Eh и гораздо более низкие величин pH, но обнаруживается динамика сдвига значений для осадков к трещинно-жильным водам по степени окисленности. Возможной причиной этого сдвига является постепенное увеличение концентрации атмосферного кислорода в трещинно-жильных водах и/или истощение реакционного потенциала Fe-Mn-окси-гидроксидов. Наряду с этим намечаются закономерные колебания значений Eh и pH, что, по-видимому, связано с вариациями количества атмосферных осадков. Также на вариации значений Eh и pH несомненно влияет фактор времени прохождения потока метеорных вод сквозь толщу трещиноватых вулканитов мощностью 200 м. Это время, оцененное на основе модели изменения изотопных параметров метеорных вод, составляет от 1,5 до 2 лет [5].

Полученные для трещинно-жильных вод Тулукуевского карьера характеристики, включая pH-Eh условия (см. рис. 6), а также содержания в водах урана (U=10^{-3} г/л), при внешних атмосферных условиях $P_{CO2}\approx10^{-2}$ и T=25 °C соответствуют устойчивости уранил-карбонатных комплексов. По-видимому, форма переноса U(VI) в окислительных условиях в виде легко растворимых карбонатных соединений [$UO_2(CO_3)_3^{4-}$] и/или [$UO_2(CO_3)_2^{2-}$] является превалирующей, а в восстановительной обстановке внутриразломных проницаемых реакционных барьеров может происходить перераспределение урана с образованием сорбированных форм и вторичным минералообразованием [40, 41, 14]. Наряду с этим нельзя исключать и коллоидную форму переноса [8], но этот вопрос требует дополнительного изучения.

Таблица 3

Химический состав проб трещинно-жильных вод, атмосферных осадков и вод штольни гор. +520 м Тулукуевского карьера

№ пробы	UH-1-02		UH-3-02		UH-4-02		UH-5-02		Атмосферные осадки			
	мг/л	мг-экв/л	мг/л	мг-экв/л	мг/л	мг-экв/л	мг/л	мг-экв/л	мг/л	мг-экв/л	мг/л	мг-экв/л
Na+K	163,3	7,1	177,1	7,7	172,5	7,5	144.9	6.3	5.5	0.24	6.9	0.30
Ca	48,0	2,4	52,0	2,6	42,0	2,1	76.0	3.8	4.6	0.23	3.4	0.17
Mg	13,2	1,1	13,2	1,1	13,2	1,1	21.6	1.8	0.6	0.05	0.6	0.05
ΣFe	<0,01		<0,01		<0,01		<0.01		<0.01		<0.01	
NH_4	<1,8		<1,8		<1,8		<1.8		<1.8		<1.8	
Cl	58,6	1,6	58,6	1,6	58,6	1,6	74.6	2.1	4.3	0.12	4.3	0.12
SO_4	220,8	4,6	249,6	5,2	230,4	4,8	240.0	5.0	9.6	0.2	9.6	0.20
NO_3	11,8		11,8		9,0		37.6		7.8		6.2	
NO_2	<0,01		<0,01		<0,01		0.02		<0.01		<0.01	
HCO_3	268,4	4,4	280,6	4,6	262,3	4,3	292.8	4.8	12.2	0.20	12.2	0.20
Общ. мин. вод	772,3		831,1		777,2		849.9		41.7		37.0	
pH	7,5		8,1		7,7		7,6		6,0		5,7	
Eh, mV	446		433		432		428		490		502	
U, g/l	$6,2\ 10^{-3}$		$6,6\ 10^{-3}$		$5,7\ 10^{-3}$		$5,3\ 10^{-3}$		$5,8\ 10^{-7}$		$4,0\ 10^{-7}$	

Продолжение табл. 3

№ пробы	TG-1-02		TG-2-02		TG-3-02		TG-4-02		TG-5-02		Дренажная выработка	
	мг/л	мг-экв/л	мг/л	мг-экв/л	мг/л	мг-экв/л	мг/л	мг-экв/л	мг/л	мг-экв/л	мг/л	мг-экв/л
Na+K	204,7	8,9	112,7	4,9	167,9	7,3	108.1	4.7	135.7	5.9	117.3	5.1
Ca	134,0	6,7	100,0	5,0	28,0	1,4	104.0	5.2	114.0	5.7	68.0	3.4
Mg	39,6	3,3	27,6	2,3	7,2	0,6	31.2	2.6	31.2	2.6	20.4	1.7
ΣFe	<0,01		<0,01		<0,01		<0.01		<0.01		<0.01	
NH_4	<1,8		<1,8		<1,8		<1.8		<1.8		<1.8	
Cl	113,6	3,2	74,6	2,1	53,2	1,5	88.8	2.5	53.3	1.5	41.2	1.2
SO_4	336,0	7,0	230,4	4,8	192,0	4,0	211.2	4.4	259.2	5.4	211.2	4.4
NO_3	13,6		39,1		7,4		42.9		<6.2		24.7	
NO_2	<0,01		<0,01		<0,01		<0.01		<0.01		0.03	
HCO_3	530,7	8,7	323,3	5,3	231,8	3,4	341.6	5.6	445.3	7.3	283.6	4.6
Общ. мин. вод	1358,6		868,6		680,1		884.9		1038.7		741.7	
PH	7,3		8,0		7,8		7,7		7,6		7,2	
Eh, mV	433		420		419		415		440		450	
U, g/l	$6,4\ 10^{-3}$		$3,2\ 10^{-3}$		$3,4\ 10^{-3}$		$1,6\ 10^{-3}$		$3,1\ 10^{-3}$		$3,5\ 10^{-3}$	

Примечание: представлены данные 2002 г. (2 июля), года усредненного по составу трещинно-жильных вод и дождевых осадков (Л.С. Шулик, ЛРР, ИГЕМ РАН). TG – уровень «G» карьера, UH – выемки под уровнем «G». Штольня (гор. +520м) – дренажная выработка на уровне G (см. рис. 1).

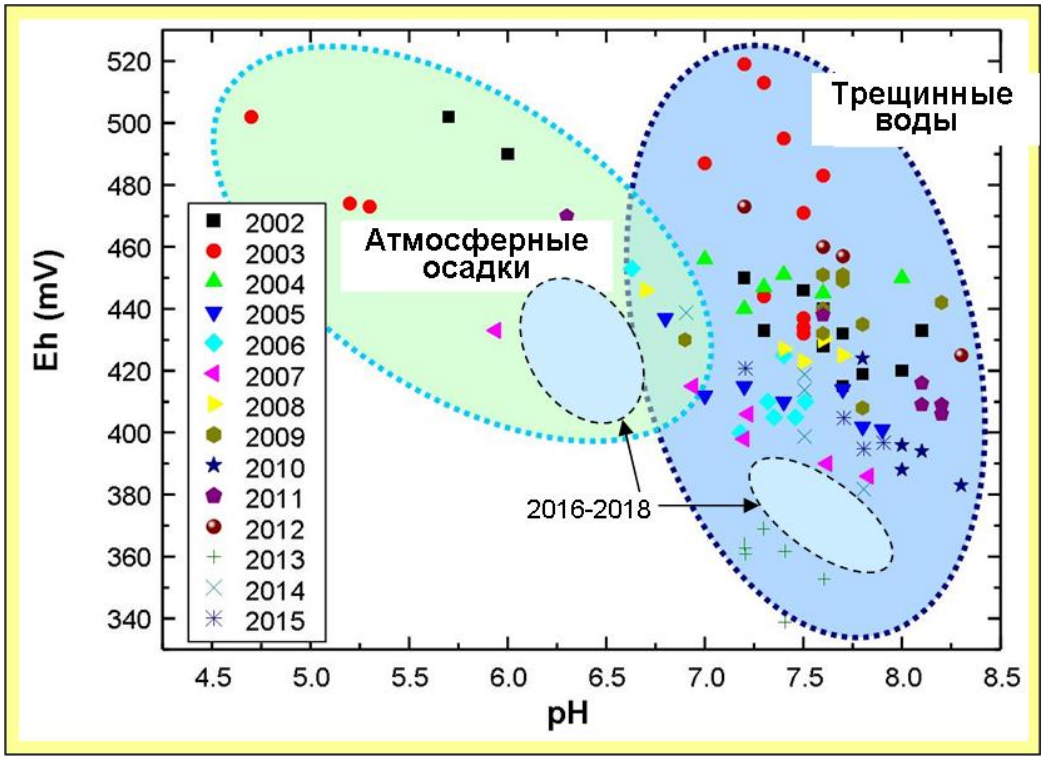


Рис. 6. Вариации pH-Eh характеристик трещинных вод и атмосферных осадков (2002-2018 гг.); 2001, 2006 – наиболее засушливые годы.
Оконтурены данные за период 2016-2018 гг.

Распределение урана в кислых вулканитах Тулукуевского месторождения

Характер распределения и содержания урана изучались с применением метода f-радиографии. В изученном блоке Тулукуевского карьера преобладают игнимбриты трахи(рио)дацитового состава. Более кислые разности игнимбритов вплоть до риолитов распространены крайне незначительно. Характерной особенностью игнимбритов является наличие линзовидных и расплющенных обособлений вулканического стекла (фьямме) в стекловатой основной массе, создающих псевдофлюидальную структуру породы. Для игнимбритов характерно высокое содержание окисного железа (Fe_2O_3/FeO=1,5-8), что фиксируется присутствием в породе высокожелезистого опацитизированного биотита и большого количества тонкодисперсного гематита.

Пробы пород отбирались на семи уровнях Тулукуевского карьера (от «A» до «G») на различном удалении от разлома 1А и оперяющих его ветвей и трещин. В породах интенсивно проявлены позднемезозойские гидротермально-метасоматические изменения с развитием *предрудных, рудосопровождающих и пострудных минеральных ассоциаций*, на которые впоследствии были наложены гипергенные преобразования (см. рис. 1).

Содержание урана в матрице и минеральных фазах игнимбритов

Уран в относительно неизменных игнимбритах *внешней зоны (I)* сконцентрирован, главным образом, в матриксе (7-8 ppm) и, в несколько меньшем количестве (2-3 ppm), в виде точечных неравномерных скоплений во фьямме (рис. 7а). При девитрификации во фьямме происходило «разрежение» треков. Сами вкрапленники и обломки кварца, плагиоклаза и калишпата практически лишены урана (рис. 7б).

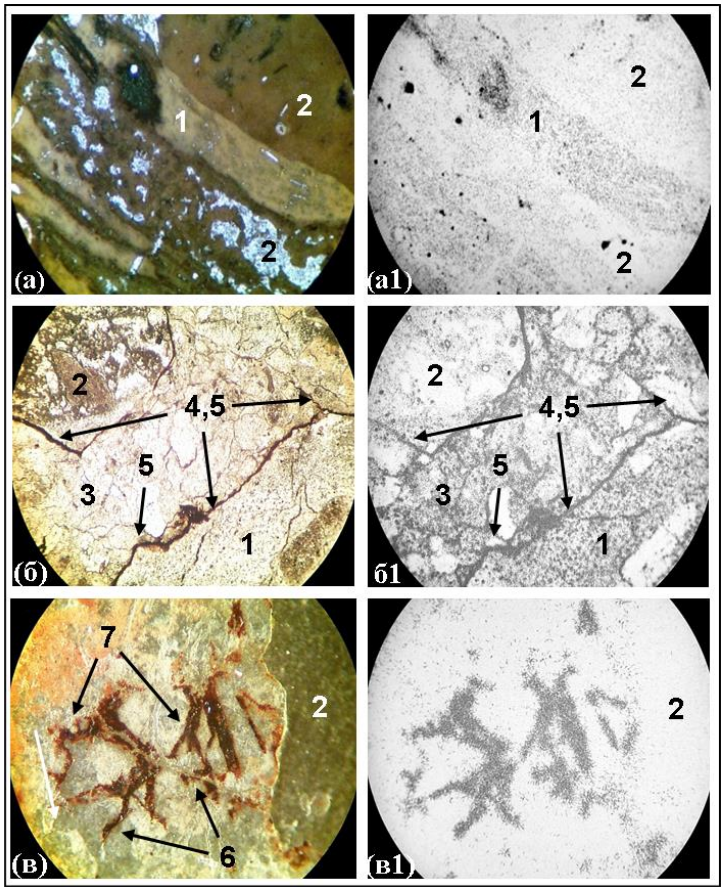


Рис. 7. Распределение U в матрице и минеральных фазах игнимбритов:
а – равномерные треки в основной массе и матриксе (1) и, в меньшем количестве точечные скопления во фьямме (2); б – в промежуточной зоне высокая плотность треков связана с участками катаклаза, микробрекчирования (3), с приконтактовыми частями обломков пород и вкрапленников полевых шпатов (4), а также с сетью минерализованных трещин (5); в – треки высокой плотности связаны с рудосопровождающим гематитом (6) который концентрируется вдоль извилистых трещин, отчетливо тяготеет к границам матрикса и фьямме (7). В них отмечены участки, протравленные до сквозных отверстий. Микрофото шлифов – а, б, в; длинная сторона (L): без анализатора – 2,78 мм (а, б), полускрещенные николи в комбинации с «косым» освещением – 1,09 мм (в). Лавсановые детекторы – а1, б1, в1

Показательным при оценке перераспределения урана в породах является его концентрация в биотите и акцессорных минералах, которые весьма чувствительны к гидротермальным изменениям и процессам окисления пород (рис. 8).

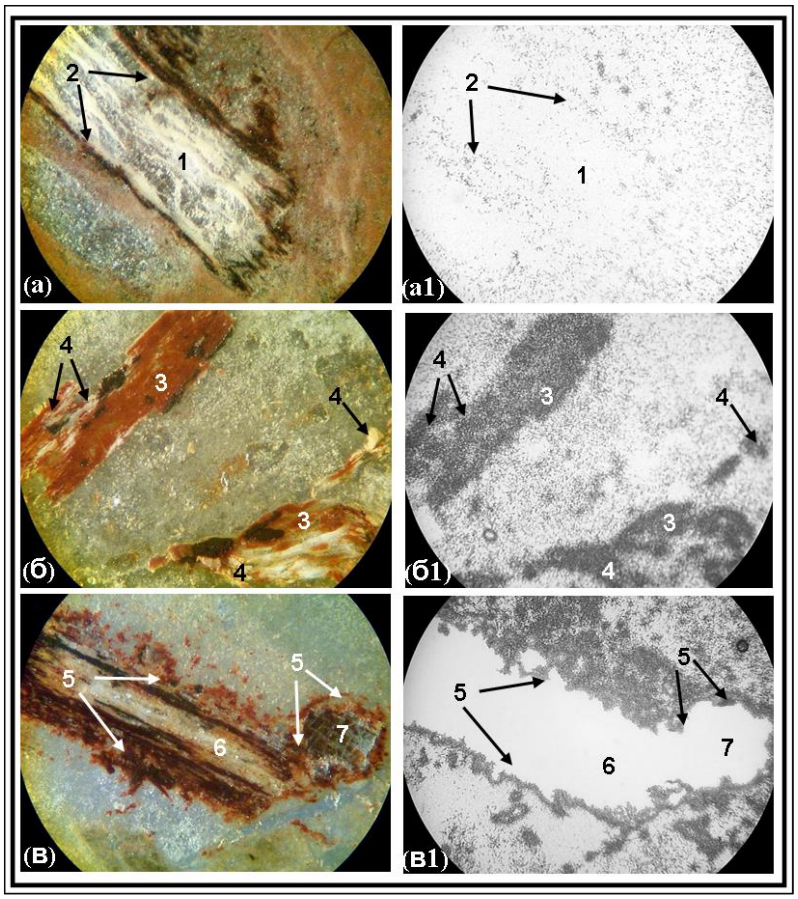


Рис. 8. Распределение U в биотите:
а – вкрапленники почти его не содержат (1), а повышенные концентрации связаны с краевыми зонами его опацитизированных листочков (2); б – полные псевдоморфозы по биотиту гематита (3) и лейкоксеноподобного агрегата-ЛПА (4) обогащаются U по всей площади зерна; в – высокая плотность треков (до сквозных отверстий) отмечается в псевдоморфозах гематита и ЛПА (5) по биотиту (6) и титаномагнетиту-ильмениту (7). Микрофото – а, б, в; L=1,09, полускрещенные николи в комбинации с «косым» освещением. Лавсановые детекторы – а1, б1, в1

Активное перераспределение урана в *промежуточной зоне (II)* связано с влиянием как гидротермальных, так и гипергенных преобразований. С одной стороны, нарастает интенсивность предрудных изменений и происходит частичное растворение гематита. С другой стороны, его недостаток компенсируется гематитом, привнесенным в рудную стадию. Существенное влияние на перераспределение урана в этой зоне оказывает система трещиноватости, создающей условия для интенсивной циркуляции метеорных кислородсодержащих вод. Минерализованные трещины содержат преимущественно оксиды и гидроксиды Fe. При этом на уровне «С» находилось зеркало подземных

вод до вскрытия карьера. Смещение процессов интенсивного перераспределения урана в сторону ниже расположенного уровня «D» связано, по-видимому, с продвижением современной зоны окисления.

Очень высокие концентрации урана отмечены в лейкоксенизированном акцессорном минерале (970,5 ppm) и в псевдоморфозах биотита (669,0 ppm) в зоне IIБ на уровне «D», а также в измененном биотите (256,5 ppm) в зоне IIA на уровне «C» (см. рис. 8). По периферии опацитизированного биотита была обнаружена тонкая оторочка из гематита, сорбирующая уран (467,8 ppm) при его содержании в центральной части кристалла 175,1 ppm. Наиболее интенсивное перераспределение урана наблюдается на уровне «F». В матрице игнимбритов этой части разреза отмечается интенсивное развитие железистого хлорита (бертьерина), который после окисления начинает активно сорбировать U (см. рис. 7).

Интенсивные процессы перераспределения U происходили во *внутренней зоне (III),* в области динамического влияния разлома 1А. В пределах зоны наиболее существенное перераспределение урана происходило на уровне «F». В зоне III формировался рудосопровождающий пластинчатый гематит, который в дальнейшем переотлагался в виде корочек и натеков вдоль трещин, согласно с псевдофлюидальностью игнимбритов. В этой зоне отмечаются наиболее высокие и сопоставимые концентрации U в ЛА (от 7364,1 до 11221,5 ppm) и в псевдоморфозах по биотиту (6638,0 ppm).

Таким образом, в зоне аэрации вулканитов Тулукуевского месторождения происходит интенсивное перераспределение U с формированием ореолов вторичного обогащения и рассеяния, которое продолжается и в современных условиях. При этом значение глинистых минералов как сорбентов в данных условиях снижается. Намечается отчетливая тенденция к выносу U из пород верхних горизонтов разреза и позволяет зафиксировать фронт современной зоны окисления на гипсометрической отметке уровня «F».

Содержание урана в зонах деформационных преобразований игнимбритов

Среди факторов, определяющих задерживающую способность этих структур, наиболее важными являются морфология (прямолинейность и извилистость), апертура и длина, а также наличие в них минералов-концентраторов U [17].

Мобилизация урана в зоне окисления продолжается до настоящего времени, когда в результате бактериальной деятельности формируется рентгеноаморфный метастабильный гель – (прото)ферригидрит. Он является неустойчивым минералом и с течением времени самопроизвольно переходит в гематит или гётит. Этот срок может исчисляться первыми годами и даже месяцами.

Во *внешней зоне I* в системе микротрещин матрицы фиксируется циркуляция метеорных вод. Здесь фиксируются минерализованные трещины с содержанием урана 11,1 ppm. В приконтактной части вкрапленников и обломков минералов, а также обломков пород концентрация урана составляет 3,1 ppm.

В промежуточной зоне II существенное влияние на перераспределение урана оказывает система трещиноватости высокой плотности. На уровне «D» содержания урана в трещинах составляют 451,6 ppm, а в приконтактовых частях зерен минералов и обломков пород 399,0 ppm. В то же время в зоне IIA на уровне «C» концентрация урана в трещинах составляет 100,3 ppm, а в приконтактовых частях зерен минералов и обломков пород 70,3 ppm.

Наиболее интенсивные процессы перераспределения урана наблюдаются *во внутренней зоне III*. Наиболее значительное перераспределение урана происходило на уровне «F». Здесь формировался рудосопровождающий пластинчатый гематит, отчетливо тяготеющий к границам фьямме, а также к приконтактовым частям обломков пород и минералов. С ними связаны высокие (до 2152,2 ppm) содержания U. Участки интенсивного катаклаза и микробрекчирования сопровождаются высокими (до 2185,6 ppm) содержаниями U. С минерализованными трещинами, выполненными оксигидроксидами Fe, Ti и Mn, связаны уже крайне высокие содержания урана, достигающие 11534,3 ppm.

Особенности распределения U во внутренней зоне отражают кривые распределения его в измененном матриксе и фьямме игнимбритов (рис. 9), а также в ЛА и псевдоморфозах гематита и лейкоксенового агрегата по биотиту (рис. 10). Аналогичные кривые распределения построены для различных зон метасоматических ореолов, минералов вкрапленников и обломков пород, а также элементов деформационных преобразований вулканитов и трещин различного типа.

Распределение урана в высококремнистых вулканических стеклах Тулукуевского месторождения

Характер распределения урана изучался в высококремнистом стекле в «желваке» сферической формы размером 40 х 50 см (уровень «С»). Порода представляет собой массивное высококремнистое (до 81-82 % SiO_2) стекло витрофировой структуры и пятнистой (частично брекчиевидной) и флюидальной текстуры. Последовательные стадии его девитрификации (по Ф. Ретли и К. Россу) выражены в формировании различных кристаллитов (белонитов, сростков скопулитов), сферолитов и микролитов [24].

Внутренняя зона желвака представлена частично девитрифицированной скрытокристаллической фазой высококремнистого стекла с неравномерным распределением треков, которые совмещаются с участками развития тонкодисперсного гематита.

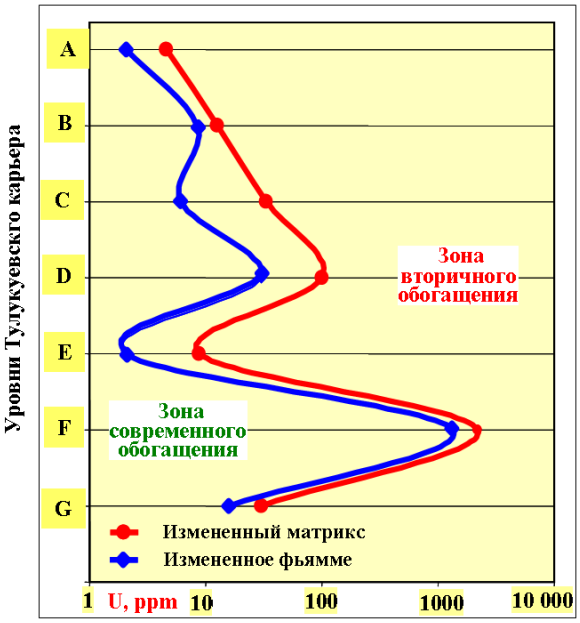


Рис. 9. Распределение U во внутренней зоне метасоматических ореолов в измененном матриксе и фьямме игнимбритов (уровни «A-G»); положение горизонта вторичного обогащения в зоне древнего окисления и зоны современного обогащения U

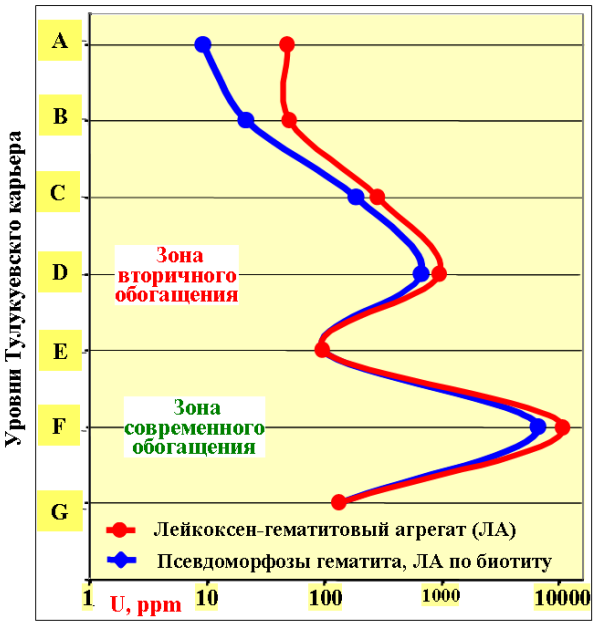


Рис. 10. Распределение содержаний U во внутренней зоне метасоматических ореолов в лейкоксен-гематитовом агрегате (ЛА) и в псевдоморфозах гематита и ЛА по биотиту (уровни «A-G»); положение горизонта вторичного обогащения в зоне древнего окисления и зоны современного обогащения U

В промежуточной зоне желвака отмечаются гематитизированные и лейкоксенизированные обломки породы (до 2 мм), с которыми связаны равномерно распределенные треки высокой плотности. В обломках встречаются участки, представленные кварцем, полевым шпатом и гидрослюдой, которые лишены урана. Здесь отмечаются также участки скопления сферолитов (рис. 11 а, б), напоминающих морозные узоры (до 0,3 мм). Частично они раскристаллизованы до сферолитоподобных образований кварц-полевошпатового состава с оторочкой (толщиной 10-20 мкм) из железистых частиц (см. рис. 11 а).

Внешняя зона, непосредственно примыкающая к игнимбриту, характеризуется плойчато-полосчатой и брекчиевой текстурой и витро-литокластической структурой. В участках с интенсивно проявленным катаклазом треки приурочены к интенсивно гематитизированным и лейкоксенизированным обломкам стекла (рис. 11 в). Материал здесь представлен хлоритом, смектитом, гидрослюдой, карбонатом и характеризуется редким и неравномерным распределением треков. В цементирующем кремнистом материале и обломках кварц-альбитового состава треки практически отсутствуют. В этой зоне встречаются не девитрифицированая буро-красная кремнистая стеклоподобная масса с высокой плотностью и равномерным рапределением треков (рис. 11 в1).

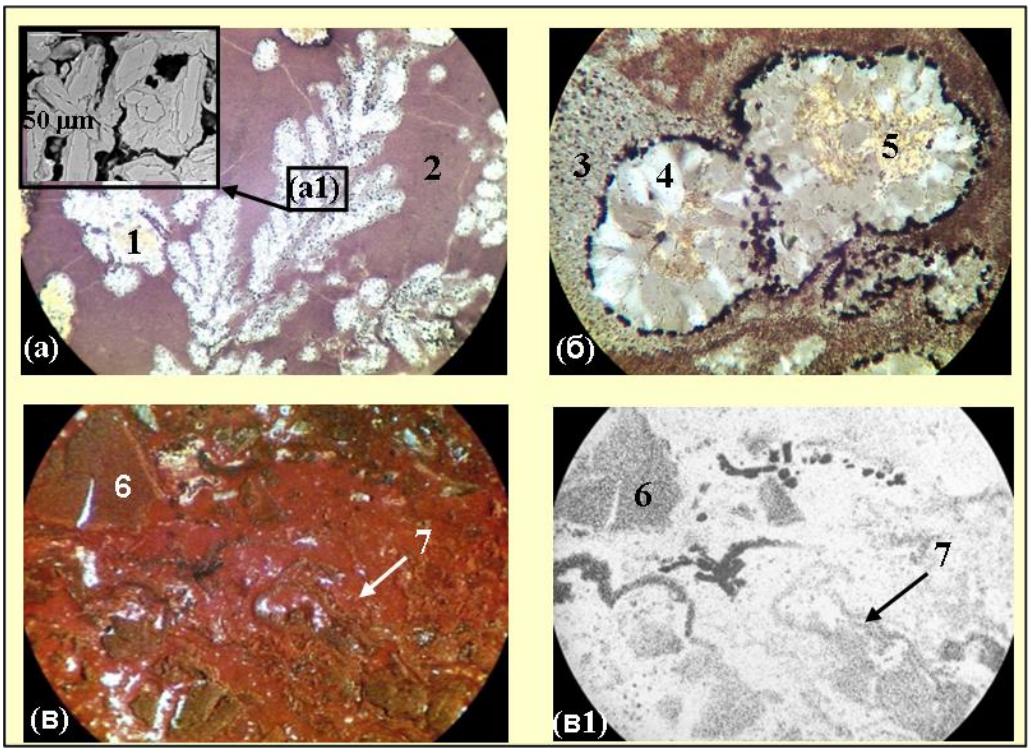


Рис. 11. Распределение U в вулканических стеклах Тулукуевского месторождения: а, б – стадии последовательной девитрификации кремнистого стекла (2) с образованием узоров скопулитов (1) и сферолитов, состоящих из полевого шпата (3), кварца (4) и слюды (5); а1 (вставка) – снимок кристаллитов скопулитового типа (sem image в отр. электр.); в – начальная стадия девитрификации с микробрекчированием (6) и образованием сферолитов (7). Микрофото – а, б, в; L=2,78, полускрещенные николи в комбинации с «косым» освещением. Лавсановый детектор – в1

В высококремнистых стеклах максимальное перераспределение и наиболее высокие концентрации урана характерны для катаклазированных участков в переходной зоне, где отмечается высокая общая железистость и степень его окисленности (Fe_2O_3/FeO=1,5-17). Перераспределение урана начиналось на стадии формирования сферолитов, а его максимальные содержания отчетливо связаны с оксидами Fe-Ti. Отмечается крайне характерная тенденция уменьшения содержаний урана от центральных частей зонального «желвака» по направлению к его периферии, где располагается трещина с интенсивно циркулировавшими растворами (рис. 12). Максимальный вынос U фиксируется в самой трещине и на некотором удалении (10 см) от нее в промежуточной зоне, но в призальбандовой зоне трещины отмечено характерное его накопление (до 20 ppm).



Рис. 12. Распределение U в зональном (I, II, III) «желваке» высоко-Si вулканического стекла в зоне влияния минерализованной трещины. Интенсивность девитрификации нарастает от центра к периферии шаровидного «желвака».
1 – матрикс стекла, 2 – приконтактовая область вблизи трещины, 3 – центр сферолита, 4 – периферия сферолита, 5-6 – области локальной кристаллизации. Карьер Тулукуевского месторождения, уровень «С»

Распределение урана в обсидиан-перлитах месторождения Новогоднее

На месторождении Новогоднее горными выработками (гор. +600 м) на глубине около 300 м вскрыто пластообразное тело вулканического стекла. В его приконтактовых частях проявился весь спектр постмагматических, гидротермально-метасоматических и деформационных преобразований различной интенсивности. Это редкая возможность изучения сферолитовых риолитов и обсидиан-перлитов (риолит-риодацитового состава) с максимальной степенью сохранности. Первая находка неизмененного стекла за последние десятилетия разведки и разработки месторождений СРП.

Пластообразное тело зонального строения (рис. 13), с массивными и флюидальными вулканическими стеклами в центре. В приконтактовых частях интенсивно проявились низкотемпературные изменения, катаклаз и брекчирование.

Последовательные стадии девитрификации вулканического стекла выражены в образовании различных форм кристаллитов: волосяных трихитов, глобулитов и сростков скопулитов, напоминающих морозные узоры. На заключительных стадиях кристаллизации формировались сферолиты и, реже, микролиты (рис. 14). Причем уже на начальных стадиях девитрификации массивных вулканических стекол формировались минерализованные и открытые трещины и начиналось перераспределение U.

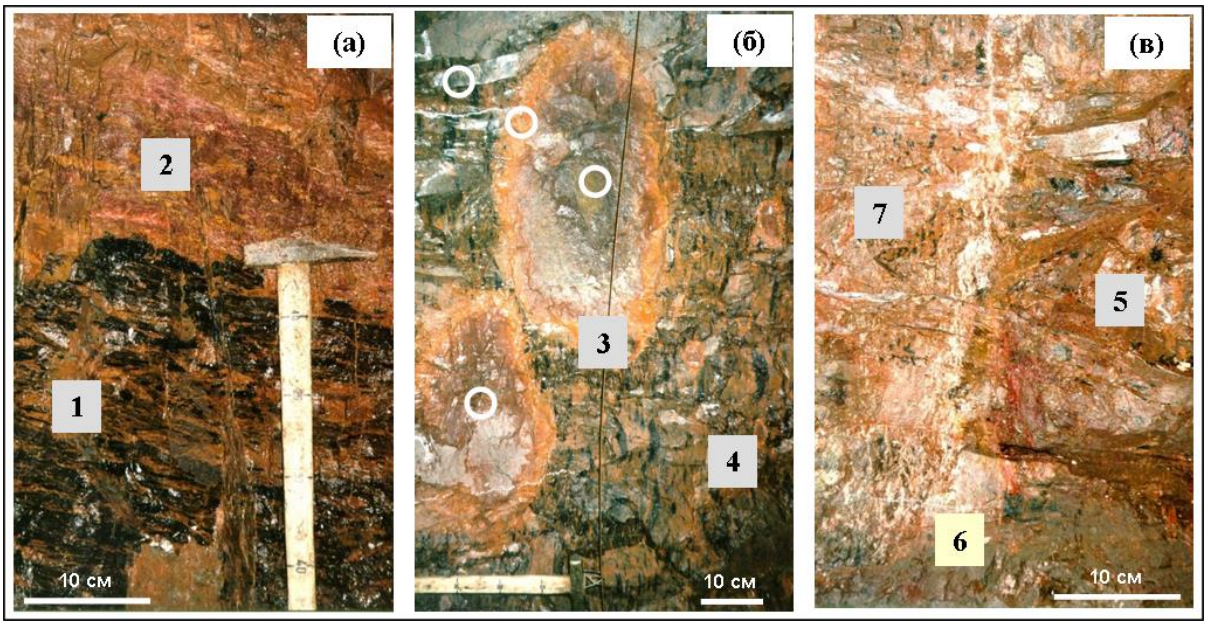


Рис. 13. Зональное строение пластообразного тела вулканического стекла: «свежие» обсидианы (1) и перлиты (2) в центре пласта (*а*), вулканические бомбы (3) в слабо измененных обсидиан-перлитах (4) в приконтактовой зоне (*б*). На контакте со сферолитовыми фельзит-риолитами (6) проявился весь спектр гидротермально-метасоматических и деформационных (катаклаз, брекчирование) преобразований (5, 7) (*в*). Новогоднее месторождение (шахта, гор. +600 м)

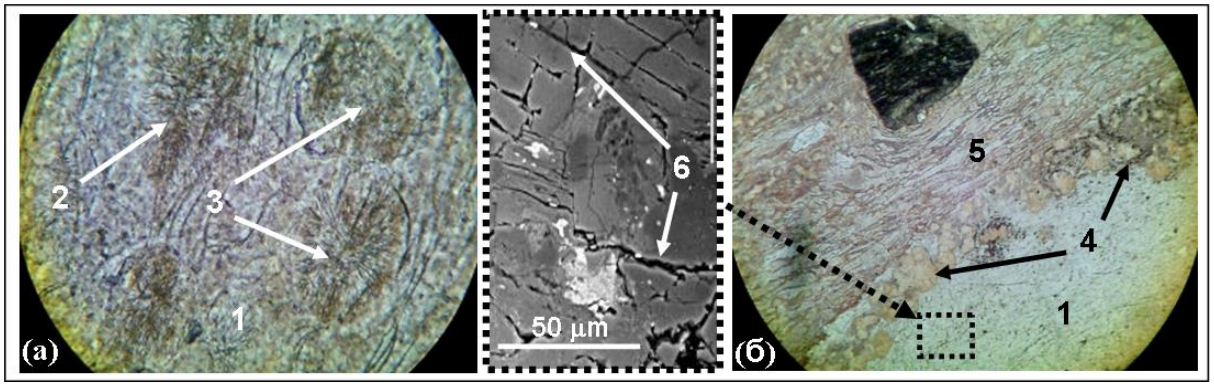


Рис. 14. Массивные (1) и флюидальные (5) обсидиан-перлиты месторождения Новогоднее. Последовательные стадии девитрификации: волосяные трихиты (а) ⇒ глобулиты (3) ⇒ сростки скопулитов (2) ⇒ сферолиты (4) ⇒ минералы кристаллизации. Минерализованные и открытые трещины в массивном обсидиан-перлите (снимок в центре, отр. электр.). Микрофото, L=1,09 (а) и 2,78 (б); николи параллельны

Для массивных стекол (рис. 15 б) характерно равномерное и плотное распределение треков. Начальная стадия индивидуализации вещества (кристаллиты размером <1 мкм) практически не влияла на характер распределения U. Совсем не содержат U остроугольные и оплавленные обломки кварца и полевых шпатов размером 0,1-0,5 мм (см. рис. 15 б).

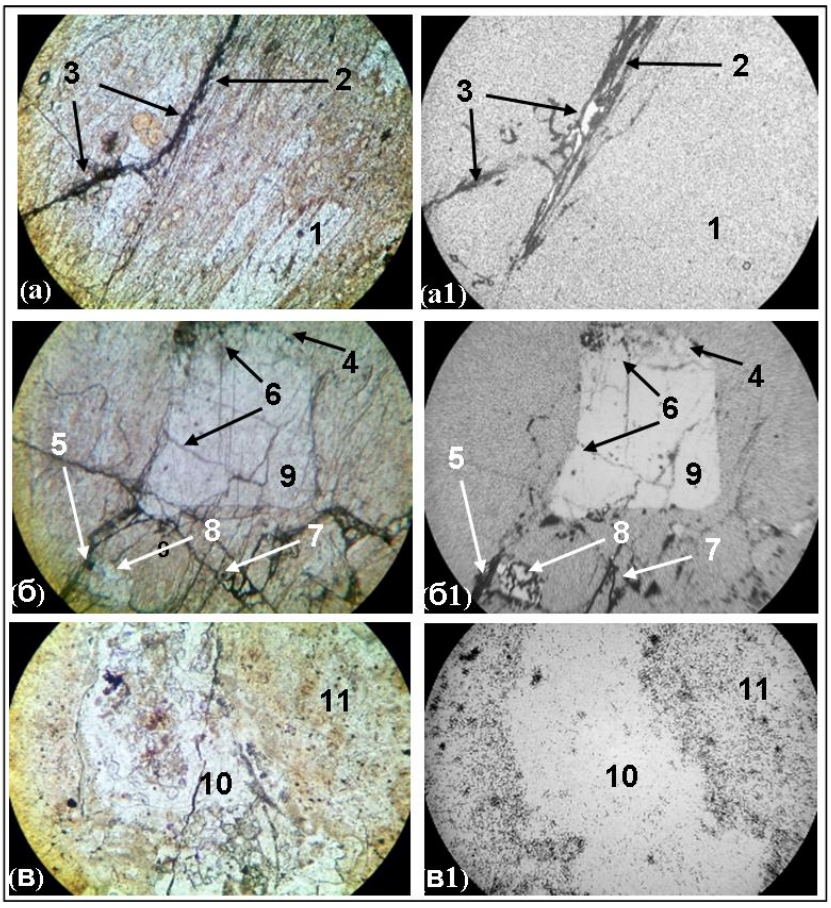


Рис. 15. Распределение U во флюидальных (а) и массивных (б) обсидиан-перлитах, месторождение Новогоднее. Плотные треки в минерализованной трещине с оксидами Fe-Ti (2) и максимальные его содержания (сквозные отверстия) в ЛА (3); в приконтактовых зоне зерен ортоклаза (4) и кварца (5), в минерализованных трещинах с оксидами (Fe-Ti) и гидрооксидами (6, 7). Кварц (8) и ортоклаз (9) треков не содержат. Вынос U из зон минеральных преобразований (10), не содержащих минералов-концентратов U (кварц, альбит, серицит). Перераспределение и концентрация его в мелких скоплениях оксидов, гидрооксидов Fe, в мелких включениях лейкоксенизированных акцессорных минералов (11). Микрофото – а, б, в; L=2,78 (а, б) и 3,89 (в); николи параллельны. Лавсановые детекторы – а1, б1, в1

Во флюидальных стеклах (рис. 15 а) распределение урана аналогично его распределению в массивных разностях. Фиксируются отчетливые желто-бурые сферолитовые образования диаметром 0,1-0,3 мм, которые свидетельствуют об интенсивной раскристаллизации аморфной фазы. Сферолиты представлены криптокристаллическими срастаниями полевых шпатов и выражены едва заметным разрежением треков. Обломки кварца и полевых шпатов (размером 0,2-1,5 мм) более трещиноваты и подвержены слабым гидротермальным изменениям. Протяженные трещины и зоны деформационных преобразований характеризуются плотным распределением треков с участками точечных скоплений, вплоть до сквозных отверстий в лавсановом детекторе (см. рис. 15 а, б).

Высокая плотность треков связана с приконтактовыми частями крупных (до 1,5 см в поперечнике) обломков и вкрапленников полевых

шпатов, а также с сетью минерализованных трещин, содержащих (окси)гидроксиды Fe-Ti (см. рис. 15 б). В трещинах отмечены участки, протравленные до сквозных отверстий, свидетельствующие о наличии урансодержащей минеральной фазы. Плотность треков вблизи этих обособлений и трещин остается неизменной и, следовательно, уран в них привнесен извне.

Неравномерная девитрификация стекол, активное перераспределение и сорбция U в гематит-лейкоксеновом агрегате отмечается в участках (рис. 15 в), где фиксируются трещиноватость и интенсивные метасоматические изменения (кварц, иллит-смектит, хлорит, карбонат, лейкоксен).

Обсуждение результатов

Отмеченные закономерности в распределении урана на месторождениях Тулукуевское и Новогоднее отражают кумулятивный эффект поведения в гидротермальных условиях урана, как изначально содержащегося в исходных игнимбритах и обсидианах («породный» U), так и привнесенного в рудную стадию («рудный» U). В гипергенных условиях в процессе формирования древней и современной зон окисления в Тулукуевском карьере весь этот уран вовлекался в виде «гипергенного» U(VI). Основное различие в поведении «гипогенного» и «гипергенного» урана прежде всего обусловлено разнонаправленностью процессов миграции урана. В рудную стадию U перемещался от главного разлома 1А во вмещающие породы, а в гипергенных условиях, наоборот, уран выщелачивался, перераспределялся и «стягивался» к зонам интенсивной фильтрации метеорных вод. В участках повышенной проницаемости его осаждению способствовало интенсивное развитие сорбционноемких фаз (окси-гидроксидов Fe, Ti и Mn). Данная тенденция в поведении урана осложнялась его перераспределением в процессе формирования древней и современной зон окисления. Для выявления особенностей поведения этого U ниже современного фронта окисления необходимо изучение более глубоких (шахтных) горизонтов Тулукуевского и смежного с ним месторождения Новогоднее, где в восстановительных условиях предполагается высокая сохранность урановорудных тел и доминирующим остается «гипогенный» уран (т.е. «рудный» и «породный»).

Характер перераспределения U в матриксе-фьямме игнимбритов Тулукуевского и в обсидиан-перлитах Новогоднего месторождений по данным f-радиографии иллюстрируют рис. 16 и 17. Видно, что при девитрификации, гидротермально-метасоматических изменениях и в процессе деформационных преобразований (катаклаз, брекчирование) отчетливо фиксируется последовательное снижение концентрации U. Наряду с этим в результате проявления сорбционных механизмов он перераспределяется и концентрируется в минеральных фазах (окси-

гидроксиды Fe, Ti и Mn), в приконтактовых частях минералов и обломков пород, а также в минерализованных трещинах, что затрудняет вынос урана.

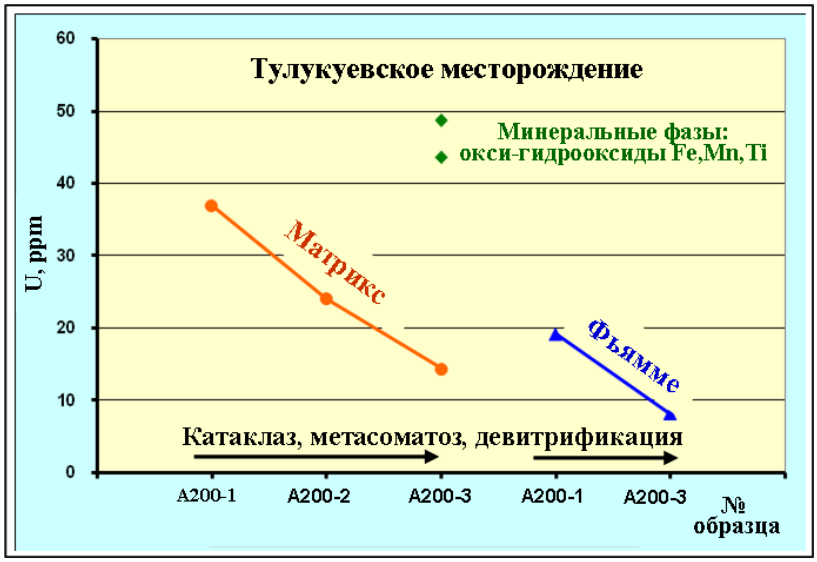


Рис. 16. Перераспределение U в стекловатом матриксе и фьямме игнимбритов при гидротермально-метасоматических преобразованиях и девитрификации. Тулукуевское месторождение, уровень «А»



Рис. 17. Перераспределение U при гидротермально-метасоматических преобразованиях и девитрификации обсидиан-перлитов. Содержание U в скоплениях гематита (3), в минерализованных (4) и открытых трещинах (5). Новогоднее месторождениее (шахта, гор. +600 м)

Значительное перераспределение «породного» урана (см. рис. 1), изначально равномерно распределенного в игнимбритах, происходило во внешней зоне I, а «рудного» урана – преимущественно в пределах разлома 1А и во внутренней зоне III. В промежуточной зоне II, с одной стороны, отмечаются участки, где присутствуют значительные концентрации

«рудного» урана (подзона IIБ). С другой стороны, в подзоне IIA определяющим, как и в зоне I, является «породный» уран, первоначально находившийся в матрице игнимбритов.

В пределах месторождения Новогоднее интенсивное перераспределение «породного» и «рудного» урана происходило при девитрификации обсидиан-перлита, а также в зоне интенсивных деформационных и минеральных преобразований пород.

Результаты детальных микроисследований разреза Тулукуевского карьера свидетельствуют об интенсивном перераспределении «породного» U в зонах I и, особенно, в зоне IIБ с накоплением урана до 500-1000 ppm при наличии благоприятных факторов в виде сорбционноемких фаз (лейкоксен-гематитовый агрегат) и повышенной трещиноватости пород. Здесь в полной мере проявилась задерживающая способность сорбционноемких фаз. Аналогичные закономерности характерны и для месторождения Новогоднее, но с меньшей площадью перераспределения урана.

Различия в распределении «породного/рудного» U связаны как с морфологией и масштабом (апертура, протяженность, связность и т. д.) микротрещин, так и с их минеральным выполнением. Наши исследования показали, что трещины могут быть классифицированы на открытые неминерализованные (Н) и минерализованные (М), а по степени открытости на 3 группы: трещины и микропрожилки (апертура <1 мм), прожилки (апертура 1-10 мм) и жилы (апертура >10 мм). Основные концентрации породного U связаны с практически не сообщающимися между собой короткими извилистыми микропрожилками в матриксе и фьямме с апертурой <1 мм, т.е. с трещинами и микропрожилками. К этой группе можно отнести нарушенные приконтактовые части обломков и вкрапленников минералов, а также обломков пород. Наряду с этим в протяженных преимущественно прямолинейных прожилках с апертурой >1 мм (прожилки и жилы), а также в участках катаклаза и микробрекчирования, отмечается интенсивное перераспределение как «рудного», так и «гипергенного» U. На Новогоднем месторождении различия в распределении «породного/рудного» U связаны с трещинами и прожилками (апертура <1 мм), катаклазом и микробрекчированием.

Одним из главных и очень важных следствий развития гипергенных процессов в зоне аэрации Тулукуевского месторождения явилась хорошая сохранность залежей урановых. Об этом свидетельствует и хорошая сохранность урансодержащего высококремнистого вулканического стекла (уровень «С»), насыщенного тонкодисперсным гематитом. Сами стекла, по-видимому, могут свидетельствовать о высоких содержаниях U в исходном расплаве [27, 34], учитывая антисорбционную емкость кварца.

Анализ полученных данных указывает на то, что в условиях зоны аэрации процессы задержки и накопления U происходят на контролируемых структурными элементами геохимических барьерах двух типов – *восстановительном (глеевом) и сорбционном.*

Восстановительный тип барьера формируется в зонах тектонических нарушений в результате привноса углеродистого вещества, а также на уровнях древнего (здесь формировался горизонт вторичного U обогащения) и современного зеркала подземных вод. В пределах Тулукуевского месторождения твердое углеродистое вещество присутствует в порово-трещинном пространстве игнимбритов и входит в состав гипогенных урановых минералов (тухолит). На восстановительных барьерах, где создаются локальные условия пониженных значений Eh на фоне окружающей окислительной обстановки, происходит задержка растворенного в трещинно-жильных водах U(VI) путем взаимодействия его с восстановителями – углеводородами, и перевод его в слабоподвижную U(IV) форму в виде сажистых настурана и коффинита, входящих в состав урановых черней.

Детальный анализ механизмов миграции и сорбции урана, включая данные фундаментальных зарубежных и отечественных литературных источников, был представлен ранее [20, 22].

Изучение всего спектра минеральных преобразований пород в Стрельцовской кальдере указывает на возможность кратковременных повышений («всплесков») температур в течение отдельных эпизодов дорудной, синрудной и пострудной истории. Они носили локальный характер и могли быть связаны с сейсмотектоническими процессами в разломных зонах фундамента и чехла Стрельцовской кальдеры, на что указывает наличие псевдотахилитов в разломных зонах [42, 11], и/или с фазами повышенной термальной активности в связи с внедрением поздних экструзивных тел цезиеносных перлитов [27]. О кратковременных «всплесках» температуры свидетельствует и отсутствие признаков формирования сопутствующих высокотемпературных минеральных преобразований.

Крайне важным представляется аспект изысканий, связанный с долговременной изоляцией РАО. В этой связи месторождения Тулукуевское и Новогоднее являют собой уникальный пример для всестороннего изучения путей, механизмов миграции и сорбции урана (актинидов) в различных структурных обстановках и редокс условиях.

Заключение

Одним из основных следствий развития гипергенных процессов в зоне аэрации Тулукуевского месторождения явилась хорошая сохранность залежей U руд при относительно незначительном размере вторичного ореола выноса урана. Влияние современных атмосферных осадков не привело к значительному разрушению рудных тел, миграции растворенных форм U и появлению на поверхности земли хорошо выраженных радиоактивных аномалий. Механизм этого явления может заключаться в химическом взаимодействии подвижного U(VI) с вмещающей средой. Анализ полученных данных указывает на то, что процессы задержки и накопления урана происходили на контролируемых разрывными нарушениями геохимических барьерах двух типов – *восстановительном*

*(глеевом) и сорбционно*м. При этом в условиях как затрудненного (ниже уровня грунтовых вод), так и интенсивного (зона аэрации) водообмена важнейший механизм задержки урана обусловлен процессами сорбции. Сорбционный фактор в совокупности с деформационными преобразованиями и девитрификацией вулканического стекла приобретает особое значение и на месторождении Новогоднее. Здесь локальные глеевые (восстановительные) барьеры создаются по периферии пластообразного тела обсидиан-перлитов вблизи минерализованных и открытых трещин, а также в зонах микробрекчирования и прожилкования.

В пределах карьера Тулукуевского месторождения выявлен кумулятивный эффект миграции «породного» и «рудного» урана. Значительное перераспределение «породного» урана фиксируется во внешней зоне (I), а «рудного» – преимущественно во внутренней зоне (III) ореолов, контролируемых рудовмещающим разломом 1А. Разнонаправленность процессов миграции «гипогенного» и «гипергенного» урана следующая: в рудную стадию от разлома 1А во вмещающие породы, а в гипергенных условиях – перераспределение и «стягивание» к зоне дренирования метеорных вод. Эта тенденция осложняется в процессе формирования горизонта вторичного U обогащения в зоне древнего окисления и зоны современного обогащения. Современная зона окисления находится в стадии формирования, о чем свидетельствует образование метастабильного гипергенного (прото)ферригидрита. Аналогичная схема перераспределения урана фиксируется и в зонах влияния флюидопроводящих трещин в высококремнистых урансодержащих стеклах (месторождение Тулукуевское) и в обсидиан-перлитах (месторождение Новогоднее).

Проведено сопоставление сорбционной способности минералов, которая формирует следующий ряд в порядке убывания:

АМОРФНЫЕ ОКСИДЫ Fe ⇒ ОКСИДЫ Ti (ЛЕЙКОКСЕН), Fe-Ti ЛЕЙКОКСЕНОПОДОБНЫЙ АГРЕГАТ ⇒ (ПРОТО) ФЕРРИГИДРИТ ⇒ ГЕТИТ⇒ ГЕМАТИТ ⇒ УГЛЕРОДИСТОЕ ВЕЩЕСТВО ⇒ СИДЕРИТ, АНКЕРИТ ⇒ ОКИСЛЕННЫЕ Fe-Mg и Fe (БЕРТЬЕРИН) ХЛОРИТЫ ⇒ КАЛЬЦИТ ⇒ ПИРИТ ⇒ «МУЧНИСТЫЙ КАРБОНАТ» ⇒ СМЕКТИТ, СМЕШАННОСЛОЙНЫЙ МИНЕРАЛЫ ⇒ ИЛЛИТ ⇒ КАОЛИНИТ ⇒ ПОЛЕВЫЕ ШПАТЫ ⇒ КВАРЦ.

Полученные данные в сочетании с результатами геоструктурных и петрофизических исследований имеют значение для обоснования поисков, разведки, отработки U руд и при рассмотрении возможных источников рудного вещества.

Не менее важным являются радиогеоэкологические аспекты изысканий в связи с долговременной изоляцией радиоактивных материалов, а также реабилитацией загрязненных радионуклидами территорий и горизонтов подземных вод. Многолетний опыт изучения U месторождений СРП использован нами при выявлении сорбционных свойств минералов в отношении актинидов в породах Нижнеканского гранитного массива

(Красноярский край), где создается первый отечественный пункт глубинного захоронения РАО. Ключевые аспекты изучения процессов миграции и накопления урана в восстановительной обстановке глубоких горизонтов месторождений Антей и Аргунское, локализованных в гранитах фундамента Стрельцовской кальдеры, в сочетании с данными по Нижнеканскому массиву предполагается осветить в следующих публикациях.

Литература

1. Андреева О.В., Головин В.А. Метасоматические процессы на U месторождениях Тулукуевской кальдеры в Восточном Забайкалье (Россия) // Геология рудных месторождений. 1998. № 3. С. 205-220.

2. Белова Л.Н., Рыжов Б.И., Федоров О.В. и др. Исследования U минерализации в зоне гипергенеза. М.: ИГЕМ РАН, 1989.

3. Белова Л.Н., Федоров О.В. Гипергенная минералогия месторождений Стрельцовского рудного поля. Силикаты урана и урановые слюдки. М.: ИГЕМ РАН, 1991.

4. Белова Л.Н. Условия образования зон окисления U-месторождений и скоплений U- минералов в зоне гипергенеза // Геология рудных месторождений. 2000. № 2. С. 113-121.

5. Дубинина Е.О., Петров В.А., Голубев В.Н. Изотопные параметры метеорных вод в трещинно-поровом пространстве пород Тулукуевского месторождения // Доклады академии наук. 2008. Т. 421. № 3. С. 378-382.

6. Ищукова Л.П., Игошин Ю.А., Авдеев Б.В. и др. Геология Урулюнгуевской рудоносной зоны и Mo-U месторождений Стрельцовского рудного поля. М.: Геоинформмарк. 1998. 526 с.

7. Лаверов Н.П., Петров В.А., Полуэктов В.В., Насимов Р.М., Хаммер Й., Бурмистров А.А., Щукин С.И. Урановое месторождение Антей – природный аналог хранилища ОЯТ и подземная геодинамическая лаборатория в гранитах // Геология рудных месторождений. 2008. Том 50. № 5. С. 387-413.

8. Мальковский В.И., Петров В.А., Диков Ю.П. и др. Анализ коллоидных форм переноса урана подземными водами на U-Mo месторождениях Стрельцовского рудного поля (Восточное Забайкалье) // Докл. Акад. наук. 2014. Т. 454. № 1. С. 81-83.

9. Мелков В.Г., Сергеева А.М. Роль твердых углеродистых веществ в формировании эндогенного уранового оруденения. М.: Недра, 1990. 233 с.

10. Мельников И.В. Минералогические особенности и геохимические условия формирования Mo-U месторождений (на примере месторождений Средней Азии и Забайкалья). Дис. докт. геол.-мин. наук. В 2-х т. М.: ИГЕМ РАН, 1983.

11. Морозов Ю.А., Матвеев М.А., Смульская А.И., Кулаковский А.Л. Псевдотахилиты – два генетических типа // Доклады Академии наук. 2019. Т. 484. № 5. С. 589-594.

12. Наседкин В.В. Водосодержащие вулканические стекла кислого состава, их генезис и изменения / Труды ИГЕМ РАН, вып. 98. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 212 с.

13. Наседкин В.В. Петрогенезис кислых вулканитов. М.: Наука, 1975. 207 с.

14. Омельяненко Б.И., Петров В.А., Полуэктов В.В. Поведение U в условиях взаимодействия горных пород и руд с подземными водами // Геология рудных месторождений. 2007. Т. 49. № 5. С. 429-445.

15. Перельман А.И. Геохимия. М.: Высшая школа, 1979. 423 с.

16. Петров В.А., Леспинас М., Хаммер Й. Тектонодинамика флюидопроводящих структур и миграция радионуклидов в массивах кристаллических пород // Геология рудных месторождений. 2008. Т. 50. № 2. С. 99-126.

17. Петров В.А. Тектонофизические и структурно-петрофизические индикаторы процессов миграции флюидов в разломных зонах и методы их изучения / Современная тектонофизика. Методы и результаты. В 2-х т. Т.2. М.: ИФЗ РАН, 2011. С. 94-108.

18. Петров В.А., Полуэктов В.В., Насимов Р.М. и др. Изучение природных и техногенных процессов на U месторождении в гранитах для обоснования безопасности длительной изоляции ОЯТ / Экстремальные природные явления и катастрофы. Т.2 – Геология урана, геоэкология, гляциология. Отв. ред. А.О. Глико. М.: ИФЗ РАН, 2011. С. 124-138.

19. Петров В.А., Полуэктов В.В., Хаммер Й.Р., Цулауф Г. Исследование минеральных и деформационных преобразований горных пород Нижнеканского массива в целях определения их удерживающей способности при геологическом захоронении и изоляции РАО // Горный журнал. 2015. № 10. С.67-77.

20. Петров В.А., Андреева О.В., Полуэктов В.В., Коваленко Д.В. Ураноносные вулканогенные структуры: Стрельцовская (РФ), Сианшань (КНР) и Макдермитт (США). Сравнительный анализ петрологии кислых вулканитов и состава рудосопровождающих метасоматитов // Геология рудных месторождений. 2022. Т. 64. № 1. С. 7-37.

21. Полуэктов В.В., Петров В.А., Андреева О.В., Голубев В.Н. Тулукуевское U месторождение (ЮВ Забайкалье) как природный аналог процессов миграции радионуклидов в хранилище ОЯТ / Сборник трудов научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора, лауреата Ленинской премии Ф.И. Вольфсона, 21-22 ноября 2007. Москва, ИГЕМ РАН, 2007. С. 161-166.

22. Полуэктов В.В., Петров В.А., Андреева О.В. Миграция и накопление U в различных окислительно-восстановительных условиях месторождений вулканогенного типа (Стрельцовская кальдера, ЮВ Забайкалье) // Геология рудных месторождений. 2022. Т. 64. № 1. С. 37-73.

23. Пэк А.А., Мальковский В.И., Петров В.А. Минеральная система урановых месторождений Стрельцовской кальдеры (Восточное Забайкалье) // Геология рудных месторождеий. 2020. Т. 62. № 1. С. 36-54.

24. Структуры и текстуры изверженных и метаморфических породы. Ю.И. Половинкина. ч. II. Т. II. М.: Недра, 1966. 424 с.

25. Урановые месторождения в вулкано-тектонических структурах. Под ред. Г.А. Машковцева. М.: ВИМС, 2005.

26. Чухров Ф.В., Ермилова Л.П., Горшков А.И. и др. Гипергенные оксиды железа в геологических процессах. М.: Наука, 1975. 207 с.

27. Шатков Г.А. Стрельцовский тип урановых месторождений // Региональная геология и металлогения. 2015. № 63. С. 85-96.

28. Alexander W.R., McKinley I.G. A review of the application of natural analogues in performance assessment: improving models of radionuclide transport in groundwaters // Journal of Geochemical Exploration. 1992. No. 46. P. 83-115.

29. Bodvarsson G.S., Boyle W., Patterson P. Overview of scientific investigations at Yucca Mountain – the potential repository for high-level nuclear waste // Journal of Contaminant Hydrology. 1999. N 38 (1-3). P. 3–24.

30. Bruno J., Duro L., Grive M. The applicability and limitations of thermodynamic geochemical models to simulate trace element behaviour in natural waters. Lessons learned from natural analogue studies // Chemical Geology 2002. No. 190. P. 371-393.

31. Chapman N.A., McKinley I.G., Smellie J.A.T. The potential of natural analogues in assessing systems for deep disposal of high-level radioactive waste. NAGRA Techn/ Rep/ Ser NTB 84-41.1984. Baden, Switzerland.

32. Descriptive uranium deposit and mineral system models. IAEA, Vienna. 2020. 328 p.

33. Geological Classification of Uranium Deposits and Description of Selected Examples. IAEA-TECDOC Series-1842. Vienna. 2018. 415 p.

34. Gray T.R., Hanley J.J., Dostal J. Magmatic enrichment of uranium, thorium and rare earth elements in late Paleozoic rhyolites of southern New Brunswick, Canada: evidence from silicate melt inclusions // Economic Geology V.106. 2011. P. 127-143.

35. Haveman S.A., Pedersen K. Microbially mediated redox processes in natural analogues for radioactive waste // Journal of Contaminant Hydrology. 2002. No. 55. P. 161-174.

36. Petrov V.A., Velichkin V.I., Lichtner P.C., Perry F., Ovseichuk V.A., Schukin S.I. Fractured welded tuffs in Krasnokamensk, Chita region: Natural analogue study for radionuclide migration in variably saturated fractured rock // Proceedings of the International Conference Fractured Rock. Toronto, Canada. 2001. 8 p. CD-R.

37. Petrov V.A., Velichkin V.I., Poluektov V.V., Golubev V.N., Lespinasse M., Sausse J., Cuney M., Leroy J., Lichtner P.C., Perry F., Schukin S.I. Assessment of hydraulic properties of fracture network in relation to the uranium transport in oxidizing conditions of welded tuffs // Proceedings of the International Conference on Uranium Geochemistry. Nancy, France. 2003. P. 297-300.

38. Petrov V.A., Poluektov V.V., Golubev V.N., Andreeva O.V., Dubinina E.O., Lichtner P.C., Perry F.V., Ovseichuk V.A., Schukin S.I., Lespinasse M., Sausse J., Cuney M. Natural analogue studies in variably saturated fractured welded tuffs // Proceedings of the International Conference on Radioactive Waste Disposal, DisTec'04. Berlin, Germany. 2004. P. 450-457.

39. Petrov V.A., Poluektov V.V., Golubev V.N., Andreeva O.V., Kartashov P.N., Lespinasse M., Sausse J., Cuney M., Lichtner P.C., Perry F.V., Galinov Yu.N., Ovseichuk V.A., Schukin S.I. Uranium mineralization in oxidised fractured environment of the giant volcanic related uranium field from the Krasnokamensk area // Proceedings of an International Symposium Uranium production and raw materials for the nuclear fuel cycle – supply and demand, economics, the environment and energy security. IAEA. Vienna, Austria. 2005. P. 260-264.

40. Petrov V.A., Poluektov V.V., Hammer J., Schukin S.I. Fault-related barriers for uranium transport. In: Uranium Mining and Hydrogeology. B.J. Merkel, A. Hasche-Berger (edit.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. P. 779-789.

41. Petrov V.A., Poluektov V.V., Hammer J., Schukin S.I. Uranium mineralization in fractured welded tuffs of the Krasnokamensk Area: transfer from ancient to modern oxidizing conditions. In: The New Uranium Mining Boom: Challenge and Lessons Learned. Eds. B. Merkel, M. Schipek Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2011. P. 701-710.

42. Petrov V.A., Lespinasse M., Poluektov V.V., Cuney M., Nasimov R.M., Hammer J., Schukin S.I. Stress-time context of fault permeability at the Krasnokamensk Area, SE Transbaikalia // Journal of Physics: Conference Series. 2013. V. 416. 6 p.

43. Petrov V.G., Vlasova I.E., Rodionova A.A., Yapaskurt V.O., Korolev V.V., Petrov V.A., Poluektov V.V., Hammer J., Kalmykov S.N. Preferential sorption of radionuclides on different mineral phases typical for host rocks at the site of the future Russian high level waste repository // Applied Geochemistry 2019. V.100. P.90-95.

44. Prikryl J.D. et al. Migration behavior of naturally occurring radionuclides at the Nopal I uranium deposit, Chihuahua, Mexico // Journal of Contaminant Hydrology. 1997. V. 26. P. 61-69.

45. Schumacher D. Hydrocarbon-Induced Alteration of Soils and Sediments. In: Hydrocarbon Migration and its Near-Surface Expression. AAPG Memoir 66. 1996. P. 71-89.

46. Smellie J.A.T., Karlsson F., Alexander W.R. Natural analogue studies: present status and performance assessment implications // Journal of Contaminant Hydrology. 1997. No. 26. P. 3-17.

47. Smellie J.A.T., Karlsson F. The use of natural analogues to assess radionuclide transport // Engineering Geology. 1999. No. 52. P. 193-220.

48. Vadose zone science and technology solutions / Edit. B.B. Looney and R.W. Falta. Battelle Press, Columbus, OH, USA. 2000. 589 p. (I), 1540 p. (II).

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ УРАНОВОРУДНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ С ДЕФИЦИТОМ РАДИЯ В ПОЧВЕННО-ТОРФЯНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ВИТИМО-КАРЕНГСКОГО РАЙОНА (СЕВЕРНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

А.В. Сащенко, В.М. Тюленева
ФГБУ «ВИМС», г. Москва

Несмотря на то, что приповерхностные месторождения урана в торфяниках в настоящее время не разрабатываются промышленностью, выявление обстановок формирования повышенных содержаний урана является важным для понимания процессов инфильтрационного уранового рудообразования [4].

Витимо-Каренгский потенциально урановорудный район расположен на севере Забайкальского края в Тунгокоческом районе [3, 4]. Наиболее крупными объектами с урановорудными концентрациями, ассоциирующими с растительной органикой, здесь являются рудопроявления Орогочи и Сиротинка. Относительно богатое оруденение приурочено к приповерхностным торфяно-почвенным отложениям с незначительным содержанием терригенной примеси [1]. С уменьшением растительного детрита на глубину закономерно увеличивается песчано-глинистая составляющая, а содержание урана напротив уменьшается. Отдельные рудные тела и залежи приурочены к поймам современных водотоков 3-4 порядков в пределах геохимически специализированных на уран гранитоидных массивов мезозойского возраста. Рудные тела характеризуются лентообразной либо чашеобразной формами [3].

В строении осадочного разреза фиксируются следующие горизонты: непосредственно кора выветривания, развитая по геохимически специализированным гранитам мощностью до 2 м; дресвяно-щебнистые отложения с песчано-глинистым цементом мощностью от первых сантиметров в бортах до 2-3 м в осевой части; кровля разреза венчается торфяно-почвенными отложениями четвертичного возраста мощностью до 2 метров [2, 3]. В осадочном разрезе выделяются 2 уровня с повышенным содержанием урана. Нижний уровень приурочен к зоне коры выветривания с равновесным содержанием урана и радия. Верхний уровень, объединяющий дресвяно-щебнистые и торфяно-почвенные отложения, характеризуется смещением радиоактивного равновесия в сторону урана. В настоящей работе рассматриваются обстановки накопления урана в верхнем горизонте, объединяющем дресвяно-щебнистые и торфяно-почвенные урансодержащие осадки.

Рудопроявление Орогочи локализовано в пойме одноименной реки в пределах триас-раннеюрского Амананского интрузива гранитоидов. Рудная залежь в плане имеет неправильную изометричную форму протяженностью до 1 км, шириной 350–750 м. В районе рудопроявления отмечается активная

гидродинамика с выходом на поверхность вод, обогащенных подвижным ураном. Концентрации урана в водах достигают $2x10^{-3}$-$5x10^{-5}$ г/л, что на 2 порядка выше, чем в остальной гидросети района [3].

Содержание урана в торфяно-почвенном слое колеблется от 0,07 до 1-2% при среднем 0,1% на мощность от 0,5 до 4 м. Наиболее богатое оруденение приурочено к центральной части лентовидной залежи. Высокие концентрации урана (до первых процентов) в отдельных пробах связаны с зонами, максимально обогащенными растительной органикой низкой степени углефикации (остатки корневой системы и др.).

Детальные минералого-геохимические исследования проведены для двух разностей рудных образований – с высокими концентрациями урана, обогащенными органикой, и более бедные – с дресвяно-щебнистой составляющей, а также изучены образцы радиоактивных гранитов. Аналитические методы включали следующие виды анализов: рентгеноспектральный (РСА) осуществлялся на рентгенофлуоресцентном волновом спектрометре MagiX-Pro; рентгенографический фазовый (РКФА), на спектрографе X'-pert-PRO – определение минерального состава; атомно-эмиссионный (ICP-AES), ICP-MS (масс-спектральный), α-спектрометрический, γ-спектрометрический – характеристика редкометальной составляющей; микрорадиографическим методом по распределению треков на поверхности комбинированных шлифов и аншлифов изучен характер распределения урановых концентраций. Для характеристики микростроения тонкодисперсных минеральных систем, идентификации микрофаз, определения реального состава и строения минералов проведены исследования на рентгеновском микроанализаторе (РСМА) JEOL JXA 8100, укомплектованном энергодисперсионной приставкой INCA (аналитик Киселёв А.А.) и на электронном растровом микроскопе (РЭМ) (аналитик Ружицкий В.В.).

Геохимическая специфика гранитоидов Амананского интрузива ($\gamma J_3 h$) характеризуется рядом элементов с содержаниями, превышающими кларковые, что также отображается в составе дресвяно-щебнистых и торфяно-почвенных отложений. Приведены содержания этих элементов в гранитах, в мас. % (кларки концентрации): U ~ 0,0015(4,73), Th ~ 0,002(1,12), Th/U ~ 1,3, Mo ~ 0,003(23,5), Pb ~ 0,004(2,1), Cr – 0,004(4,1) и редких элементов – Nd ~ 0,002(3,7), Cs ~ 0,003(6,3), а также U подвижный (8-20% от общего урана). Рудоносные торфяно-почвенные отложения наследуют геохимическую специализацию пород фундамента. Усредненные содержания элементов в мас. % (кларки концентрации): U – 0,29(774), Th ~ 0,005(4,3), Mo ~ 0,004(13,6), Pb ~ 0,003(2), Th/U – 0,02. Соотношения содержаний элементов в гранитах фундамента и торфяно-почвенных отложениях представлены на рис. 1.

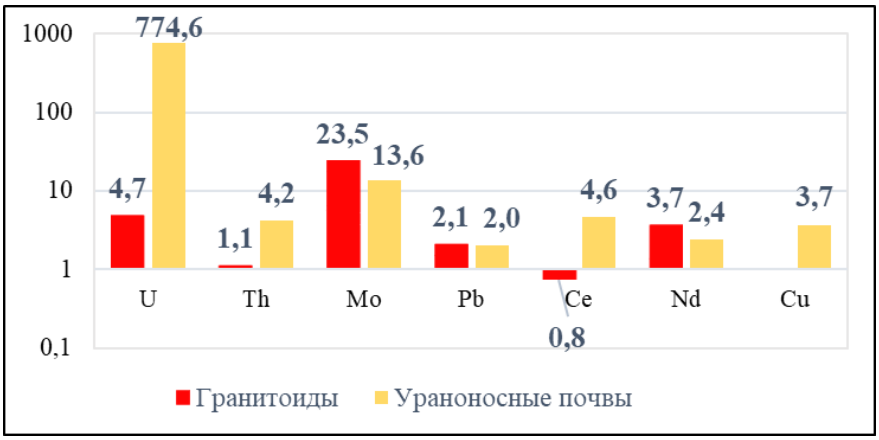


Рис. 1. Сравнительная характеристика геохимических спектров элементов в почвах и гранитоидах Витимо-Каренгского района относительно кларковых концентраций

Химический состав торфяно-почвенных образований, локализованных в кровле осадочного разреза и обогащённых слаборазложившейся растительной органикой, характеризуется следующими значениями (мас. %): *U – 0,68, Mo – 0,01, $C_{орг.}$ – 15,28, $Fe_2O_{3общ.}$ – 2,27, FeO – 1,41*. В тоже время, химический состав дресвяно-щебнистых отложений следующий: *U – 0,091, Mo – 0,0021, $C_{орг.}$ – 2,31, $Fe_2O_{3общ.}$ – 0,94, FeO – 0,84*. При сопоставительном анализе данных установлено, что торфяно-почвенные образования по сравнению с дресвяно-щебнистыми обогащены: $C_{орг.}$ (более чем в 7 раз), *Mo* (на порядок), $Fe_2O_{3общ.}$ (в 2 раза), $FeO_{(закисное)}$ (в 1,5 раза), также незначительно возрастает содержание *S и CaO* (рис. 2).

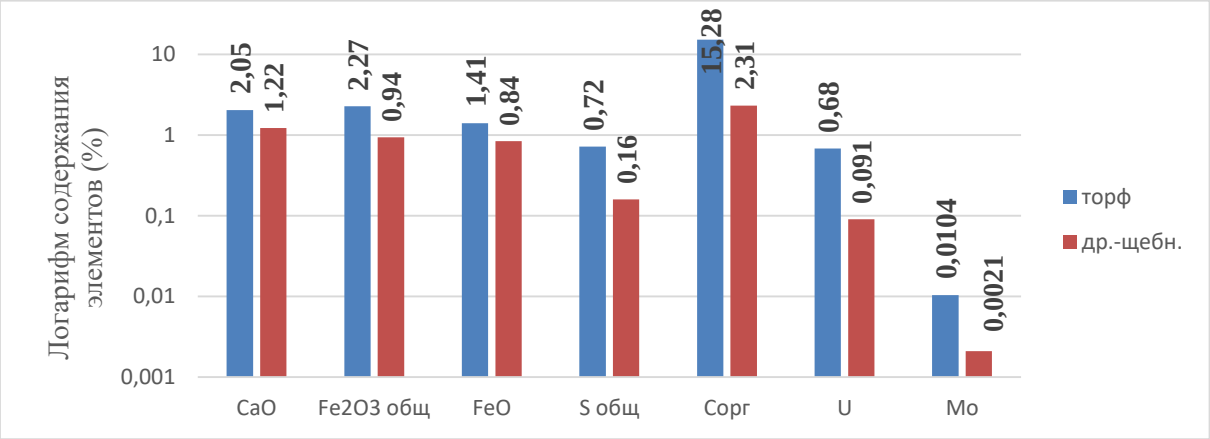


Рис. 2. Диаграмма распределения элементов в композитных пробах торфяно-почвенных и дресвяно-щебнистых отложений рудопроявления Орогочи

Рудоносные торфяно-почвенные образования характеризуются возрастанием растительной органики и соответствующим уменьшением породообразующих элементов по сравнению с дресвяно-щебнистыми породами: SiO_2 (36,6 %), Al_2O_3 (9 %), Na_2O (0,68 %), K_2O (1,98%), но при этом увеличивается количество MgO (0,69), P_2O_5 (0,23), CaO (3,56),

S (1,34), TiO (0,33). Также в рудоносных почвах потери при прокалывании (ППП) достигают 40%, что связано, как правило, с большим количество органического вещества.

Несмотря на высокие содержания урана, распределение треков на авторадиографиях (экспозиция 30 суток) неконтрастное, вуалевидное с неравномерным сгущением над растительными остатками и глинистым цементом. Подобное распределение демонстрирует отсутствие собственных минеральных фаз урана, в то время как в дресвяно-щебнистых отложениях фиксируется точечное распределение треков высокой интенсивности, связанное с радиоактивной составляющей в акцессорных минералах.

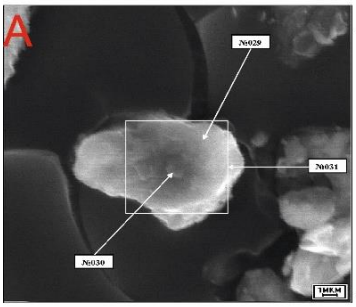
В торфяно-почвенных образованиях методами РСМА изучено распределение урановых концентраций, связанных с растительными остатками. Установлено, что более высокие содержания урана отмечаются в периферических зонах, преимущественно в участках с ячеистой древовидной структурой, где помимо урана также фиксируются повышения содержания железа и редких элементов – Y, La, Ta, Th, Sr. Причем в центральной части растительного детрита концентрация урана уменьшается, как правило, на порядок. Одновременно с увеличением содержания урана увеличивается и количество кальция (рис. 3).

По данным РЭМ основная часть урановых накоплений представлена рентгеноаморфной фазой, связанной с полиэлементными стеклоподобными гелями и другими частицами. На поверхности слоистых алюмосиликатов, обогащенных углеродистым веществом, локализуются дисперсные аморфные каплевидные гелеподобные изометричные неустойчивые, хорошо растворимые обособления с относительными содержаниями U до 10%. Уран концентрируется в растительных остатках с ячеистой древовидной структурой, а также в шаровидных почвенных конкрециях размером 200-500 мкм. Высокие содержания урана также связаны со скорлуповидными образованиями, сложенными углеродистым веществом и слоистыми алюмосиликатами (рис. 3). Наряду с перечисленными выше ураноносными обособлениями установлены остатки бактерий, импрегнированные оксидами (гидроксидами) железа. Несмотря на высокие концентрации U, приуроченные к глинистым образованиям и растительному детриту, собственных минеральных форм урана не выявлено, что свидетельствует о сорбционном накоплении урана.

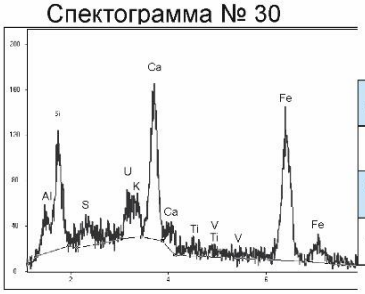
Растровая электронная микроскопия: **А** – скорлуповидное образование органического вещества, обогащенное ураном, **Б** – корковидные обособления; карбонатизированные фрагменты растительной органики.

РСМА, изображения в обратно-рассеянных электронах: **В** – рудные илисто-торфяные отложения; в матрице многочисленные фрагменты растительной органики. **Г** – клиновидные кристаллы сфена, зерна циркона, содержащие U, Nb, Th, Sr (спектр 1, 4).

В целом руды характеризуются неустановившимся радиоактивным равновесием с низким коэффициентом (КРР Ra/U <<1), что характерно для современных, практически безрадиевых накоплений урана.

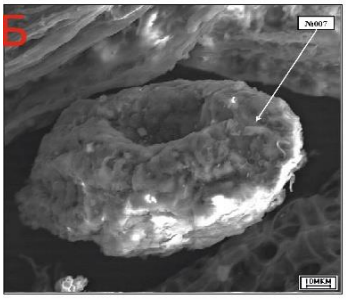


Спектограмма № 30

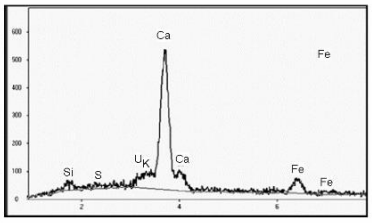


Относительное содержание элементов

Al_2O_3	SiO_2	SO_3	K_2O	CaO
19.2	36.6	3.1	1.7	**11.1**
TiO_2	V_2O_5	Fe_2O_3	U_2O_3	
0.7	0.6	**17.9**	**9.1**	



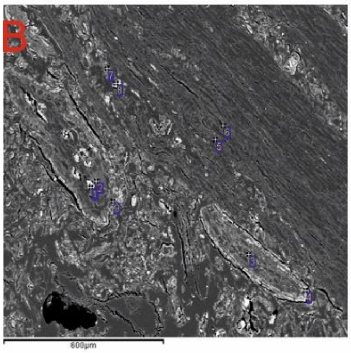
Спектограмма № 7



Относительное содержание элементов

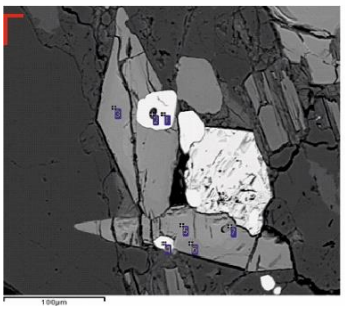
SiO_2	SO_3	K_2O
2,27	2,27	3,38
CaO	Fe_2O_3	UO_2
55.13	12.05	**15.05**

Содержание элементов масс. %



Спектр	Al	Si	Ca	Th	U	O	Сумма
2	0,07	0,02	0,79	-	**0,2**	0,59	2,32
9	0,35	0,46	**2,36**	0,04	**0,9**	2,09	6,85
3	0,14	0,05	1,23	-	0,39	0,97	3,74
4	0,85	0,13	**5,36**	-	**1,58**	3,89	13,64

Содержание элементов масс. %



Спектр		Al	Si	Ca	Ti	Fe	Ni	Zr	Th	U	O	Сумма
1, циркон		0	14,6	-	**0.05**	0.22	**0.25**	**48.7**	**0.53**	**0.3**	**35,3**	**104,3**
3, сфен		0,7	14,5	18,4	20,2	**1,75**	0,59	-	-	0,06	39,6	99,7
4, циркон		-	14,8	**0,08**	0,13	**0,14**	0,15	48,5	-	-	34,8	100,4
5	сфен	0,6	14,6	**18,8**	20,3	**1,5**	0,01	-	-	-	39,8	99,7
6		0,9	14,7	**19,3**	20,1	**1,9**	0	0,08	0,37	-	40,3	101,2
7		1,6	12,3	**21,9**	15,9	**2,1**	0,25	3,81	-	0,2	37,3	98,6

Рис. 3. Особенности развития урановых концентраций в рудных торфяно-почвенных отложениях

Коэффициент радиоактивного равновесия, подсчитанный как отношение ^{238}U к ^{226}Ra (КРР $^{226}Ra/^{238}U$) для поверхностных руд Каренгского рудопроявления, значительно ниже 1, колеблется от 0,025 до 0,099. Причем для дресвяно-щебнистых отложений характерны относительно повышенные значения КРР – 0,099. Торфяно-почвенные образования характеризуются пониженными значениями – от 0,025 до 0,047. Необходимо заметить, что

чем глубже по разрезу отобрана проба, тем больше значение КРР, даже в пределах одной разности пород.

Учитывая геологические особенности и формы концентраций урана, можно сделать вывод, что механизмы накопления урана в дресвяно-щебнистых и торфяно-почвенных образованиях существенно различаются.

Повышенные концентрации урана в дресвяно-щебнистых отложениях формируются путем разрушения и механического переноса акцессорных минералов гранитоидов. Геохимические особенности рудовмещающего комплекса пород в целом наследуют геохимическую специфику материнских гранитоидов.

Торфяно-почвенные образования характеризуются накоплением урана в результате сорбции на растительных остатках, в результате инфильтрации кислородных урансодержащих вод.

Рудогенез в Витимо-Каренгском районе проявлен концентрациями урана в безминеральной форме, в основном в виде многокомпонентных гелей и связан с отложением современного почвенно-торфяного слоя, обогащенного органикой; с формированием в нем грунтовыми водами в периоды сезонного оттаивания молодых приповерхностных концентраций урана и сопутствующих элементов Mo, Pb, Cu и др. на сорбционно-восстановительном геохимическом барьере.

Литература

1. Водяницкий Ю.Н., Гребенкин Н.А., Манахов Д.В., Сащенко А.В., Тюленева В.М. Положительные аномалии содержания урана в торфяниках гумидной зоны (обзор) // Почвоведение – М., 2019. – № 12. С. 1492-1501.

2. Карпунин А.М., Миронов Ю.Б и др. Криолитогенез как механизм уранового накопления в осадочных породах // Материалы по геологии урана, редких и редкоземельных металлов – М., 2011. – Вып.157. С. 25-32.

3. Петров О.В., Миронов Ю.Б., Лебедева Г.Б., Пуговкин А.А., Шатов В.В. «Поверхностные» месторождения – новое направление развития минерально-сырьевой базы урана России // Разведка и охрана недр – М., 2015. – вып. 10. С. 75 – 82.

4. Пешков П.А., Суматов Ю.М., Шумилин М.В. Молодой уран России // Разведка и охрана недр – М., 2015. – вып. 10. С. 24-28.

СТРАТИГРАФИЧЕСКОЕ РАСЧЛЕНЕНИЕ МЕЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ И РАЗВИТИЕ ЗОН ПЛАСТОВОГО ОКИСЛЕНИЯ НА ЗАПАДНО-ЗИАЭТДИНСКОЙ ПЛОЩАДИ

С.С. Собиров, В.А. Салихов
Госкомгеологии РУз, г. Ташкент, Республика Узбекистан

Стратиграфия является основой любого вида геологических исследований. Решение двух её основных задач – расчленение разреза и его корреляция с другими в пределах интересующей нас площади (вплоть до всей поверхности Земли) – создает фундамент геологической съемки, поисков различного вида минерального сырья, тектонических и палеогеографических построений и т.д. Решение этих проблем осуществляется через выделение и дальнейшие операции со стратиграфическими подразделениями. Последние могут быть установлены на основании распространения в пространстве самых различных материальных признаков: вещественных, структурных, палеонтологических, хроностратиграфических и др.

В геологической практике по мере прогресса науки количество стратиграфических методов постоянно растет, и эта тенденция неизбежно будет развиваться. Основное внимание в данной статье уделяется группе литологических методов [1] в пределах Западно-Зиаэтдинской перспективной площади.

Важно отметить, что применение стратиграфических методов позволяет не только расчленить и скоррелировать толщи, но и получить детальную комплексную характеристику рудоформируюших горизонтов – основу для определения его в качестве полезного ископаемого или в качестве толщи, вмещающей полезные ископаемые. Получение комплексной характеристики горизонта является важнейшим результатом применения стратиграфических методов.

Группа литологических методов является одной из важнейших, т.к. она основана на фиксации особенностей вещественного состава горных пород, которые слагают земную кору. С их применением начинаются все стратиграфические исследования.

В группе литологических методов рассмотрены: минералого-петрографические, физико-химические и геофизические методы.

Расчленение и корреляция по визуальным признакам. Изучение любого обнажения или скважины начинается с визуальной диагностики породы, или полевого определения [2]. В дальнейшем, после получения результатов аналитических исследований, полевое определение породы корректируется, а иногда меняется на иное. Основным объектом стратиграфического изучения являются первично слоистые горные породы – осадочные и вулканогенно-осадочные. К визуальным, т.е. легко наблюдаемым признакам пород, составляющим слой, относятся: тип

осадочной породы, цвет, плотность, крепость, минеральные компоненты, структура, текстура, включения (состав, форма, размер и количество), диагенетические изменения, признаки цикличности, наличия перерывов, биотурбированности, геоморфологическая выраженность и др. [4].

Следующий признак породы, который заносится в полевую документацию, это **цвет**. В ряде случаев именно окраска позволяет картировать отмеченные литостратоны, особенно это относится к событийным уровням (маркирующим горизонтам), контрастно выделяющимся по вещественному составу среди вмещающих толщ, в том числе и по окраске. Достаточно сложно оптимально охарактеризовать окраску породы при документации переслаивающихся пестроокрашенных толщ, например, мезозойские отложения Зирабулак-Зиаэтдинского урановорудного района. Алевролиты и аргиллиты здесь имеют розово- и кирпично-красные, фиолетовые оттенки и участками, даже в пределах одного слоя, переходят в голубовато-серые пески и песчаники. Такое разнообразие цветовой гаммы свидетельствует о сложном характере окислительно-восстановительных процессов в осадочном бассейне, т.к. вся эта «радуга» обязана присутствию разных окислов железа.

Такие признаки, как **плотность** и **крепость** породы, важны при описании обломочных неравномерно литифицированных пород, у которых возможно варьирование количества цемента, вплоть до его отсутствия. Очень часто в разрезе присутствуют: конгломераты и гальки, песчаники и пески, алевролиты и глины. Для несцементированных разностей обязательно указывается рыхлая порода или плотная, для сцементированных – степень крепости: слабые, средние, крепкие, иногда – «звонкие».

Структура является одной из основных характеристик породы. Среди обломочных пород выделяются, по размеру зерен, от тонкой до крупнозернистой структуры.

Текстурные особенности. Если в обломочных породах текстурный признак выступает как один из многих, то для карбонатных, глинистых, соляных, кремнистых и некоторых других пород это свойство следует считать ведущим.

Различают массивные, параллельно-косослоистые, тонко- и толстослоистые, ясно- и неяснослоистые и т.п. По этому же признаку выделяют кавернозные, пористые, выветрелые породы, а также толщи, обладающие определенной отдельностью [1].

Включения. К ним относятся органические остатки, конкреции карбонатного, кремнистого, железистого состава и др., для которых указываются: процентное содержание, размеры, форма, внутреннее строение, сортировка и др. особенности.

Диагенетические (или вторичные) изменения фиксируются в обязательном порядке. В осадочных разрезах часто встречаются вторичные изменения, зачастую характерные для отдельных интервалов

разреза и прослеживающиеся по латерали: сульфидизация, ожелезнение, налеты окислов марганца, пятна окремнения и др. [2].

Геофизические методы

Геофизика изучает различные физические поля нашей планеты, их параметры и взаимоотношения. Конкретные значения акустических, электрических, магнитных и других неоднородностей в земной коре передают разнообразие горных пород, слагающих верхнюю твердую оболочку Земли. Поэтому геофизические методы представляют собой специфическое выражение литостратиграфических методов и обладают всеми возможностями и ограничениями последних [3].

На Западно-Зиаэтдинской перспективной площади рудоконтролирующие зоны пластового окисления (ЗПО) развиваются преимущественно в северо-западном направлении согласно региональному движению подземных вод со стороны Тянь-Шаньской орогенной области, которое в свою очередь определяется северо-западной ориентировкой основных структур. Этому региональному потоку кислородных урановосных вод, подчиненному структурным, литолого-фациальным и геохимическим особенностям конкретных площадей, в основном обязано формирование рудных концентраций известных в районе месторождений и рудопроявлений урана в осадочном чехле. В связи с этим установленные выклинивания пластового окисления в контуре площади рассматриваются как юго-западное окончание регионального фронта выклинивания ЗПО, контролирующего урановое оруденение таких крупных объектов, как месторождения Канимех, Южный Букинай и т.д.

На Западно-Зиаэтдинской перспективной площади в разрезе меловых отложений выделяются три продуктивных горизонта: верхняя песчаная ритмопачка сантонского, нижняя ритмопачка кампанского и песчаные осадки коньякского ярусов, в которых ЗПО развивается обособленными языками и образует самостоятельные выклинивания. При общей субмеридиональной северо-восточной ориентировке границ выклинивания во всех горизонтах ЗПО в плане носит заливообразный характер, обусловленный как структурными, так и литолого-геохимическими особенностями отложений.

Для песчаных пачек как сантонского, так и кампанского ярусов характерно пространственно сближенное выклинивание языков ЗПО, в то же время области выклинивания ЗПО в отложениях сантона, кампана и коньяка в плане разобщены на расстоянии от нескольких десятков до нескольких сотен метров.

В кампанском, сантонском и коньякском ярусах ЗПО развиваются только в пределах южной и центральной частях площади. Протяженность фронтов выклинивания в каждом из рудовмещающих горизонтов составляет от 5 до 15 км.

В сантонском ярусе ЗПО имеет максимальное развитие в восточной части площади. Это обусловлено тем, что на большей части площади сантонский ярус сложен первично пестроцветными отложениями, представляющими собой «область транзита» для кислородосодержащих вод. Восточная часть площади ЗПО, развиваясь на всю мощность проницаемых отложений, постепенно прижимается к подошве верхней ритмопачки яруса, сокращается в мощности и выклинивается в части разреза. Протяженность границы выклинивания для верхней ритмопачки составляет 15 км.

В целом для сантонского яруса отмечается приуроченность выклинивания ЗПО к области русловых отложений. Литолого-фациальные особенности разреза обуславливают и заливообразный характер выклинивания, что особенно проявлено в южной части площади. В разрезе, развиваясь на всю мощность проницаемых песчаных отложений верхней ритмопачки, область выклинивания сокращается до 3-6 м.

В песчаных пачках кампанского яруса, также как и сантонского, ЗПО развивается отдельными языками, которые образуют сближенные до 50-200 м выклинивания. На площади месторождения ЗПО образует субмеридиональную ориентировку выклинивания во фронтальной части и субширотную на флангах. Протяженность границы выклинивания ЗПО в нижней ритмопачке около 10 км. Основным рудоносным является залив ЗПО, откартированный в центральной части площади. Влияние на заливообразный характер ЗПО оказывают литолого-фильтрационные свойства вмещающих отложений – выклинивание в общих чертах подчиняется областям развития в песках прослоев песчаников, алевролитов и глин, в связи с чем уменьшается мощность проницаемых отложений и, соответственно, ухудшаются фильтрационные свойства продуктивных пачек. Повышенное содержание $C_{орг}$, характерное для глинистых разностей, увеличивает восстановительную емкость разреза вмещающих отложений, что в свою очередь определяет как контрастность окислительно-восстановительного барьера, так и морфологию ЗПО. В областях выклинивания также, как и в сантонском ярусе, в разрезе наблюдается сокращение мощности ЗПО до 2-5 м.

Фронт выклинивания ЗПО в коньякском ярусе занимает самое южное положение по отношению к границам зон в верхнележащих рудовмещающих горизонтах и характеризуется наиболее прихотливой морфологией. В коньякском горизонте ЗПО также оказывает влияние на литолого-фильтрационные свойства вмещающих отложений – выклинивание в общих чертах подчиняется областям развития в песках прослоев песчаников, алевролитов и глин, которые постепенно переходят в непроницаемые породы, в связи с чем уменьшается мощность проницаемых отложений и соответственно ухудшаются фильтрационные свойства продуктивных пачек. Протяженность границы выклинивания составляет 5-8 км.

Урановое оруденение, контролируемое ЗПО, является закономерным членом геохимической зональности, сформированной пластовыми кислородными водами.

Тяготея в плане к областям выклинивания ЗПО, урановое оруденение локализуется в сероцветных породах.

Урановое оруденение представляет собой слабопрерывистые рудоносные полосы (по борту 0,010%), повторяющие конфигурацию границ выклинивания ЗПО. Протяженность рудоносных зон составляет от 4,0 до 12,0 км при ширине 100-700 м. В основном урановое оруденение концентрируется на выклинивании ЗПО как в области серых, так и окисленных пород, последнее характерно для крыльев рудных тел, но локализуется повсеместно в серых породах.

Таким образом, в сантонском ярусе проявленность эпигенетических процессов кислородной зональности в западной части площади фиксируется четко, выдержанной структурой. Однако своеобразная морфология выклинивания лимонитизированных пород – тяготение окисленных пород к кровле продуктивных пачек, отсутствие повышенных концентраций урана, – свидетельствуют в пользу того, что на северном фланге выклинивание лимонитизированных пород в сантоне в основном представляет собой границу восстановления первичных красноцветов и пестроцветов.

Литература

1. Прозоровский В.А. Общая стратиграфия. 2-е изд. М., 2010. 208 с.

2. Степанов Д.Л., Месежников М.С. Общая стратиграфия (Принципы и методы стратиграфических исследований). Л., 1979. 423 с.

3. Стратиграфический кодекс. Изд. 3-е, дополненное. СПб, 2006, 96 с.

4. Силантьев В.В., Зорина С.О. Основы стратиграфии: лекции. Часть 1. Учебно-метод. пособие. Казань, 2010. 44 с.

ВЛИЯНИЕ УГЛЕКИСЛЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА РУДОСОХРАНЕНИЕ И СПВ УРАНА (ХИАГДИНСКОЕ РУДНОЕ ПОЛЕ)

И.Н. Солодов
АО «Атомредметзолото», г. Москва

Введение. Поствулканические углекислые минеральные подземные воды широко распространены на территории Забайкалья, что типично для альпийских складчатых структур. Обнаружено около 300 источников этих вод. Из них примерно 30 источников – это термальные воды (20÷77 °С), выявленные в горной части северного и восточного Прибайкалья. По составу они преимущественно сульфатно-гидрокарбонатные натриевые кремнистые, часто с сероводородом и слабоминерализованные (до 1 г/л). На основной территории Забайкалья, включая и Байсыханское поднятие (Хиагдинское рудное поле – ХРП), распространены весьма холодные углекислые подземные воды с температурой 2÷6 °С. Углекислые гидрокарбонатно-магниевые подземные воды повсеместно встречаются на месторождениях Намаруское и Кореткондинское и в виде аномалий присутствуют на месторождениях Хиагдинское (залежи Х1, Х4), Вершинное (залежь В1) и Дыбрынское (залежь Д1) (рис. 1).

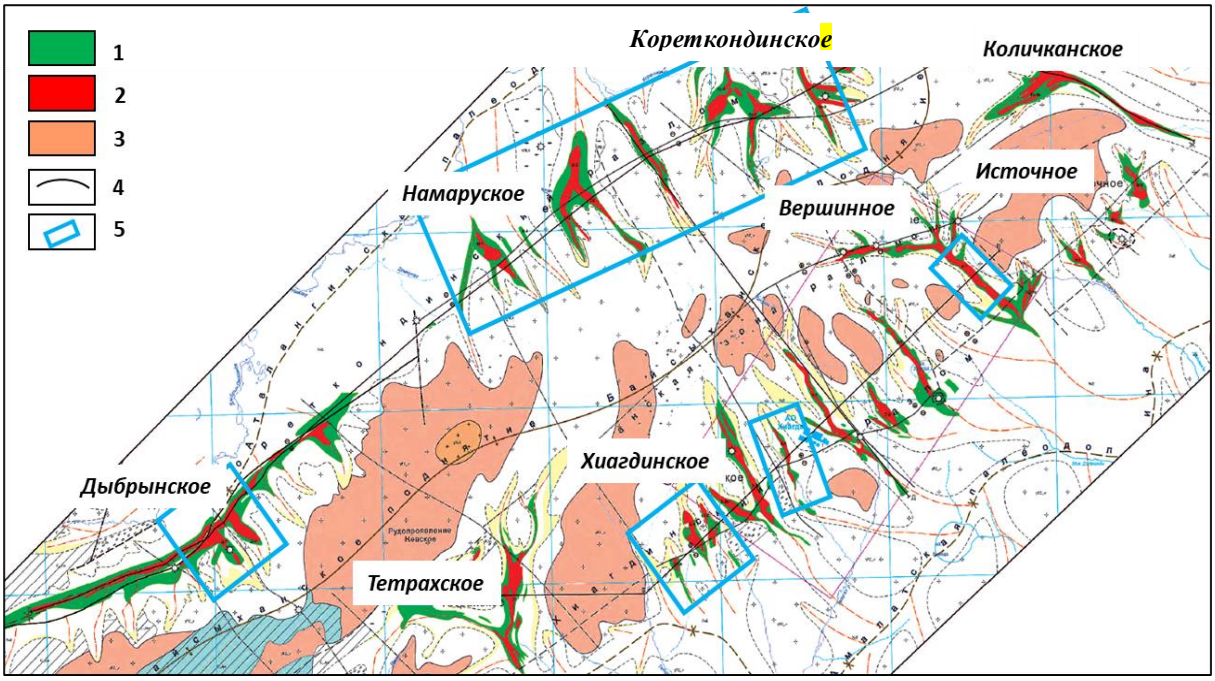


Рис. 1. Месторождения Хиагдинского рудного поля и участки преобладания углекислых гидрокарбонатно-магниевых подземных вод.
1 – забалансовые урановые руды (mC<0,075 м%); 2 – балансовые урановые руды (mC>0,075 м%); 3 – выходы пород палеозойского фундамента на дневную поверхность; 4 – разрывные тектонические нарушения; 5 – участок распространения углекислых гидрокарбонатно-магниевых подземных вод

Представители гидротермальной теории рудообразования месторождений ХРП придают большое значение участию телетермальных углекислых подземных вод в урановом рудообразовании [1] и вторичном пострудном восстановительном преобразования руд и рудовмещающих отложений [2]. Сторонники экзогенного эпигенетического рудообразования месторождений ХРП [3] предполагают существование в пострудную стадию процесса проникновения из фундамента глеевых углекислых растворов в тальвеговой части палеооврагов и обогащение ураном этих участков рудных залежей.

В представленной статье приводятся фактические данные, иллюстрирующие рудосохраняющую роль углекислых подземных вод сложного состава, содержащих растворенные минеральные и органические восстановители урана, и влияние этих вод на процесс скважинного подземного выщелачивания (СПВ) урана.

Рудосохраняющая роль углекислых подземных вод

Современная инфильтрация метеорных вод в рудоносный горизонт. В гидрогеологическом разрезе ХРП выделены четыре водоносных горизонта: в трещиноватых породах палеозойского фундамента, перекрытых слабопроницаемыми отложениями глинистого элювия гранитоидов витимканского комплекса; рудоносный нижнеджилиндинский (миоцен) водоносный горизонт, изолированный сверху водоупорной вулканогенно-осадочной толщей болотно-озерных отложений верхнеджилиндинской подсвиты (миоцен); водоносный горизонт в трещиноватых неоген-четвертичных базальтах ниже подошвы многолетнемерзлых пород (ММП) – базальтовый горизонт; завершают разрез сезонные надмерзлотные воды – зона летнего оттаивания.

До начала оледенения 2,5 млн лет назад базальтовый покров не являлся монолитным образованием и не выступал в роли водооупора. Базальты на всю мощность сильно разрушены процессами выветривания и разбиты сетью трещин на отдельные глыбы различных размеров (рис. 2). Инфильтрация атмосферных вод через базальты и питание базальтового горизонта происходило практически беспрепятственно. На фотографиях, полученных с помощью бокового видеокаротажа, хорошо видны следы окисления метеорными водами черно-зеленых базальтов в виде охр красного и желтого цвета.

Многолетнемерзлые породы также не являются водоупором, о чем свидетельствуют следующие факты. Мерзлота на территории ХРП плохо изучена. Ее мощность 40-90 м определена в пределах рудоносных палеодолин. На водоразделах между палеодолинами и в центральной части Байсыханского поднятия сведения о параметрах ММП отсутствуют. Тем не менее известно, что нормативная глубина сезонного оттаивания в данном районе составляет 6,0 м. На склонах южной экспозиции глубина оттаивания в летний период может достигать 10 м и более, а мощность

ММП на региональном (ось Байсыханского поднятия) и локальных водоразделах между палеодолинами – сокращаться до величины <40 м. Таким образом, весьма вероятно появление на этих участках сезонных сквозных таликов, через которые может происходить инфильтрация атмосферных вод. Подтверждением существования этого процесса служат данные о летнем опреснении подземных вод в трещиноватых породах палеозойского фундамента и в рудоносном водоносном горизонте осадочных отложений [4].

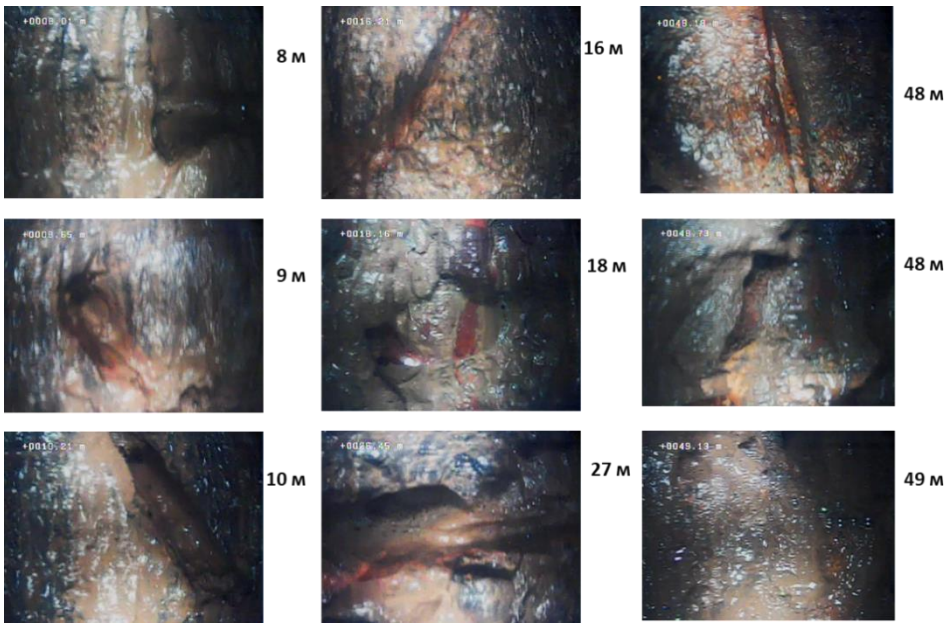


Рис. 2. Результаты бокового видеокаротажа в скважине на месторождении Вершинное. Приведены фотографии базальтов в пределах многолетней мерзлоты. Тип мерзлоты – льдистый, трещины заполнены льдом

На всех крупных залежах месторождений ХРП между гидрогеологическими скважинами установлен гидравлический уклон 0,00n, что свидетельствует о наличии замедленного, типичного для гидрогенных месторождений урана при глубине залегания рудных залежей до 300 м. Наиболее детально гидродинамика подземных вод изучена в пределах Залежи В1 месторождения Вершинное. При протяженности залежи 5,5 км гидрогеологические скважины расположены через каждые 0,8 км. Это позволило точно установить изменение пьезометрической поверхности подземных вод по простиранию залежи в направлении от Иранского к Хиагдинскому разлому и подтвердить наличие потока подземных вод от верховьев к низовьям палеодолины В1 [4]. Гидравлический уклон здесь снижается от 0,008 до 0,001 и пьезометрическая поверхность выполаживается перед Хиагдинским разломом, т.к. зона разлома выступает в роли слабопроницаемого гидравлического экрана.

От верховья (Иранский разлом) к низовью (Хиагдинский разлом) палеодолины минерализация подземных вод увеличивается от 240 до 995 мг/дм^3 и химический состав подземных вод гидрокарбонатно-кальциево↔натриевый становится гидрокарбонатно-магниевым, что свидетельствует о развитии инфильтрационного потока от верхней части палеооврага.

Руды хиагдинского типа по сравнению с большинством промышленных руд гидрогенных месторождений специфичны не только фосфатным составом урановых минералов [5], но и преобладанием среди карбонатов сидерита [4], тогда как наиболее распространенным минералом на месторождениях этого класса является кальцит.

Сидерит идеальный индикатор окислительных и восстановительных геохимических процессов. Изучение М.В. Нестеровой прозрачных шлифов под бинокулярным микроскопом показало, что в скважинах по разведочной линии РЛ 117 в верхней части рудной Залежи В1 сидериты окислены, а в нижней части по разведочной линии РЛ 66 они восстановлены [4].

Еще одним доказательством существования современного инфильтрационного питания рудоносного водоносного горизонта служат данные измерения Eh в системе вода-порода, выполненные по методике [6] на образцах керна разведочных скважин на месторождении Дыбрынское (рис. 3). Исследования проведены по трем разведочным скважинам в поднятом тектоническом блоке, погружающемся в северо-восточном направлении. В этом же направлении распространяется поток подземных вод и окислительная обстановка (Eh +150 ÷ +190 мВ), типичная для кислородсодержащих метеогенных вод, сменяется сильно восстановительной – Eh -420 ÷ -330 мВ, наиболее благоприятной для образования нингиоита [7] и сидерита [8].

Вывод: об инфильтрации метеорных вод свидетельствует ряд факторов, проявленных в направлении от верховьев к низовьям рудоносных палеодолин: 1) наличие потока подземных вод; 2) увеличение минерализации подземных вод в этом направлении; 3) смена гидрокарбонатных кальциевых↔натриевых вод гидрокарбонатно-магниевыми; 4) смена окислительных (Eh +70 ÷ +150 мВ) условий на сильно восстановительные (Eh -400 ÷ -300 мВ); 5) появление в верховьях сульфата в количестве до 25 мг/дм^3 (признак окисления сульфидов), отсутствующего в нижней части палеодолин; 6) окисленные сидериты в верхней части и неизмененные их формы в низовьях палеодолин.

Очевидно, что и до оледенения в период формирования урановых руд 12,5–5 млн лет назад [9] через базальты и выходы на поверхность трещиноватых пород палеозойского гранитного скального основания происходила инфильтрация атмосферных кислородсодержащих вод. В связи с этим возникает вопрос: почему при сравнительно малой глубине залегания рудных тел (60–330 м) не произошло окисление и разрушение

урановых руд? Какой агент выступал в роли рудосохраняющего фактора и формирования постоянного в пространстве восстановительного геохимического барьера?

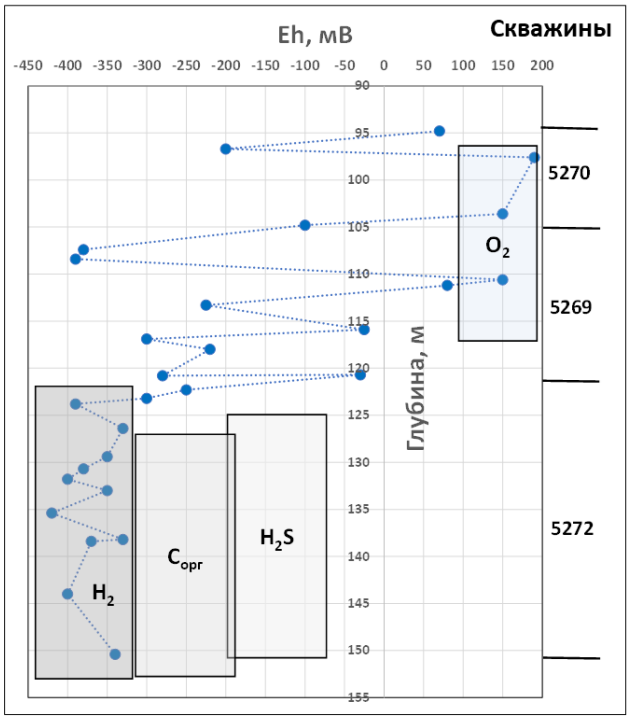


Рис. 3. Возрастание с глубиной (б) степени восстановленности гидрогеохимической среды в поднятом тектоническом блоке на месторождении Дыбрынское по данным измерения Eh в системе вода-порода (аналитик Ганина Н.И.). Прямоугольниками выделены поля распространения Eh подземных вод для окислительно-восстановительных систем O_2, H_2S, $C_{орг}$ и биогенного H_2 по [6]

Современная эксфильтрация углекислых подземных вод сложного состава. Обобщение результатов гидрогеохимического опробования гидрогеологических скважин, полученных в ходе геологоразведочных работ на месторождениях ХРП, показало, что в области распространения рядовых и богатых урановых руд преобладают углекислые гидрокарбонатно-магниевые подземные воды. Содержание HCO_3 и Mg закономерно возрастает с глубиной на всех месторождениях ХРП (рис. 4а и 4б). Между этими компонентами существует идеальная прямая связь (рис. 4в), что свидетельствует о их генетической взаимосвязи. Углекислый газ и, соответственно, гидрокарбонат имеют глубинное происхождение [10]. Зависимость концентрации магния от гидрокарбоната указывает на наличие эксфильтрации не только газовой, но и жидкой фазы. Причем этот процесс связан с древними (по отношению к руде) тектоническими нарушениями в осевых частях палеодолин С-З простирания, которые рудоносные палеодолины наследуют. Руды на месторождениях ХРП – контрастные. При среднем содержании урана 0,05% именно к тальвеговой части палеооврагов, откуда в основном поступают углекислые воды, приурочены богатые руды с содержанием урана до 3,0–4,5 %.

Концентрация свободного CO_2 возрастает с глубиной, достигая на глубине 330 м 3,5 г/дм^3 (измерено на поверхности). Соответственно, с ростом глубины увеличивается содержание HCO_3 до 6 г/дм^3 и Mg до 620 мг/дм^3. При этом связь гидрокарбоната с Ca и Na отсутствует.

Кальций и натрий в подземных водах этого типа присутствуют в подчиненном количестве.

Источником магния в подземных водах, вероятнее всего, являются роговая обманка и хлориты метаморфических и изверженных пород скального основания, отличающиеся более высокой магнезиальностью (MgO 2,5–5,1 %) по сравнению с рудовмещающими терригенными отложениями (MgO 0,2–0,4 %).

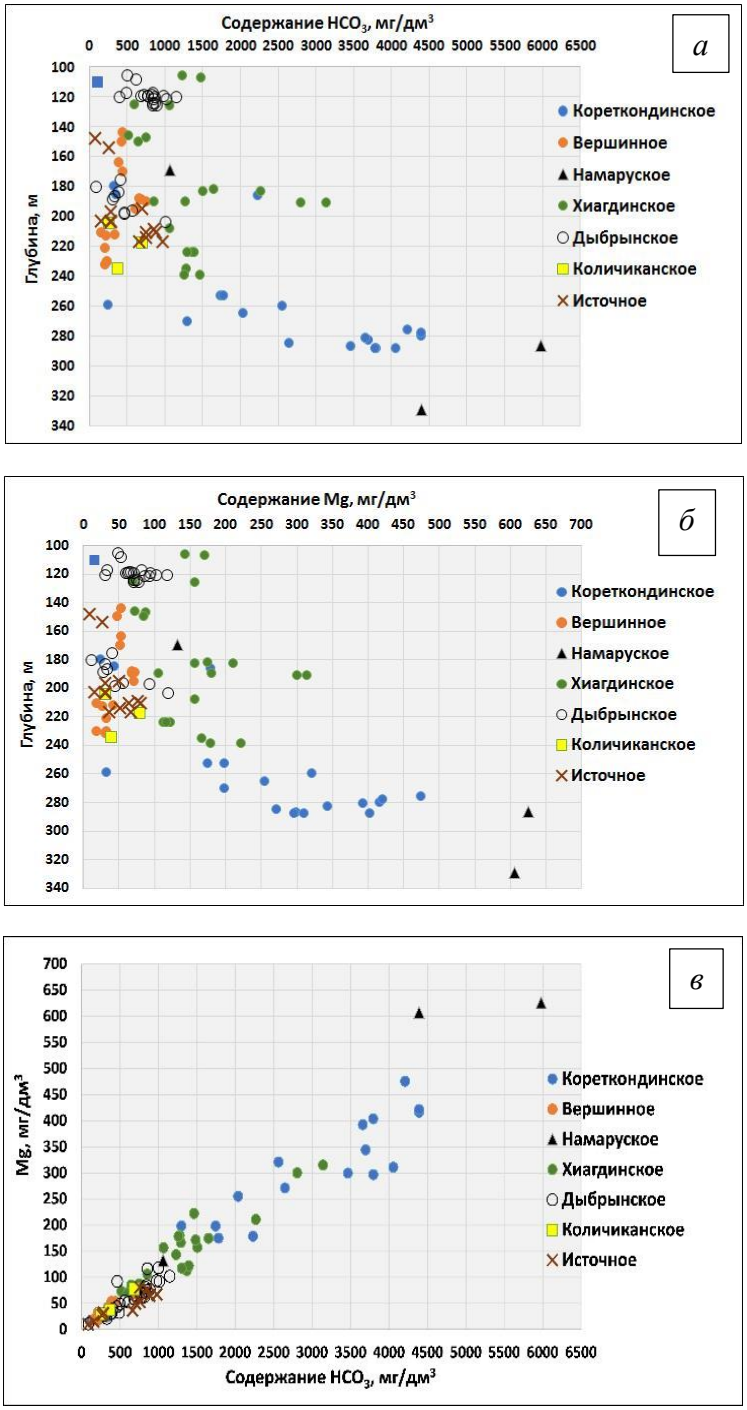


Рис. 4. Увеличение с глубиной залегания подземных вод концентрации HCO_3 (а) и Mg (б), прямая корреляционная зависимость содержания магния от концентрации гидрокарбоната (в) в подземных водах месторождений ХРП

Связь уранового оруденения с эксфильтрующимися глубинными гидрокарбонатно-магниевыми водами иллюстрирует сопоставление удельной площадной продуктивности пласта (рис. 5а) с изменением HCO_3 и Mg (рис. 5б) по простиранию Залежи В1 месторождения Вершинное. Концентрации гидрокарбоната и магния в подземных водах симбатны, что дополнительно указывает на их генетическую взаимосвязь. Самые богатые по содержанию урана руды (продуктивность достигает 45–50 кг/м^2) пространственно точно совпадают с аномально высокими содержаниями HCO_3 и Mg.

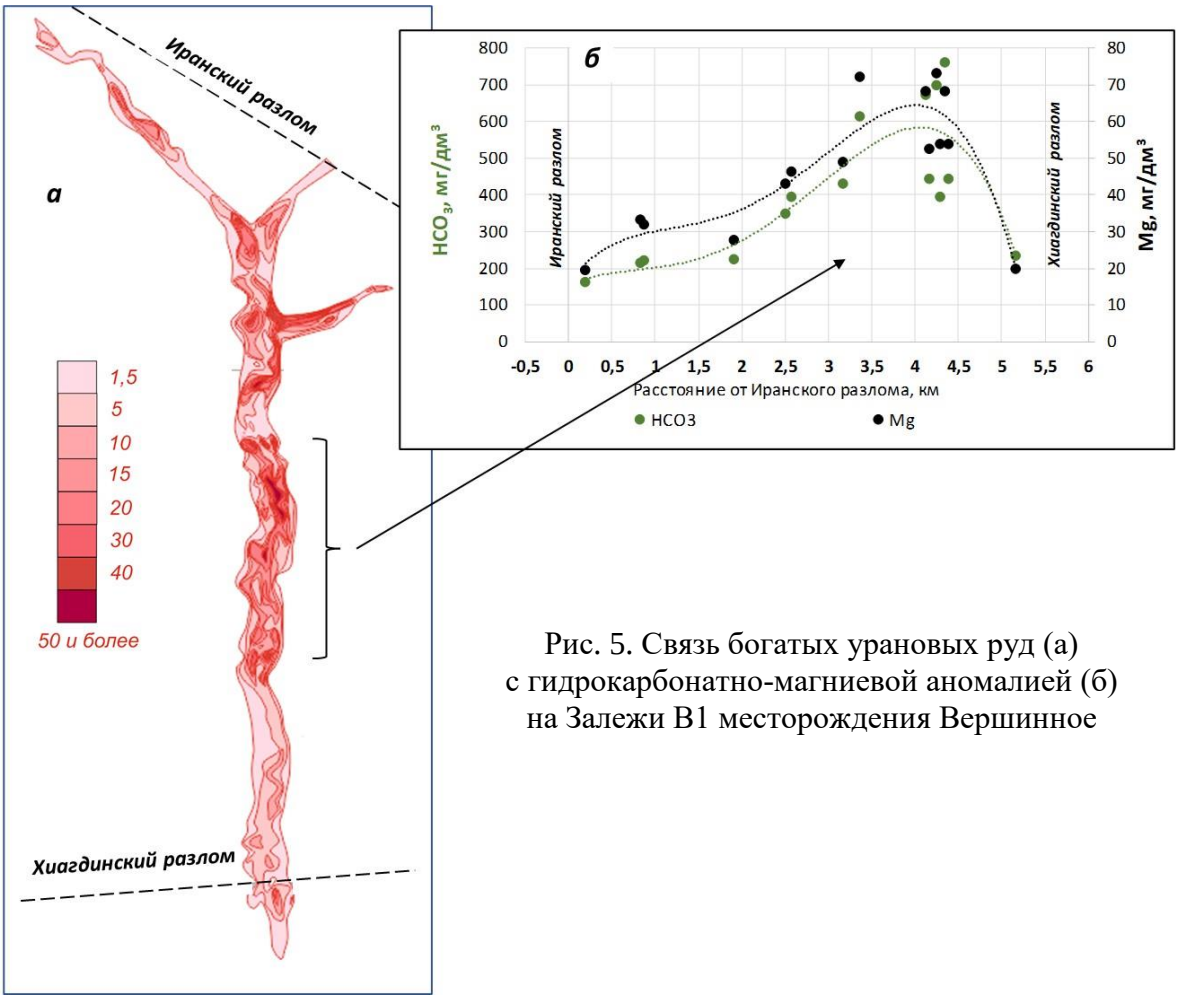


Рис. 5. Связь богатых урановых руд (а)
с гидрокарбонатно-магниевой аномалией (б)
на Залежи В1 месторождения Вершинное

Вероятно, интенсивность поступления восстановительных углекислых гидрокарбонатно-магниевых вод значительно возрастала в периоды тектоно-магматической активизации при формировании нижнеджилиндинской вулканогенно-осадочной толщи и базальтового покрова. Базальтовый вулканизм в пределах Амалатского плато протекал в четыре этапа в период с 9,5 до 0,6 млн лет назад [11]. Наиболее интенсивная тектоно-магматическая активизация проявилась в период последних двух циклов (5,0–3,0 и 1,8–0,6 млн лет н.), когда значительная часть территории Байсыханского поднятия была покрыта базальтовым покровом (хойготская свита – Q-N_2hg), перекрывшим мощным слоем

до 285 м осадочные и вулканогенно-осадочные отложения джилиндинской свиты. По-видимому, в этот же период произошло формирование пострудных разломов СВ простирания – Кореткондинского, Иранского и Хиагдинского (см. рис. 1). В зоне этих тектонических нарушений амплитуда смещения по субвертикальному сместителю на некоторых месторождениях достигает 60 м. По данным опытно-фильтрационных работ, зоны разломов Кореткондинский и Хиагдинский в основном представляют собой слабопроницаемые гидравлические экраны.

Выводы:

- рудосохраняющим фактором в отношении урановых руд являются глубинные углекислые гидрокарбонатно-магниевые подземные воды сложного состава, содержащие эпигенетические газы-восстановители (сероводород, водород, метан, углеводороды нефтяного ряда) и растворенное органическое вещество (1,44–6,25 мг/дм^3), в составе которого определены кислые смолы, асфальтиты и кислые битумы [12];

- наличие аномально высоких содержаний гидрокарбоната и магния в подземных водах – это еще один поисковый признак для нахождения урановых руд хиагдинского типа в Витимском ураново-рудном районе.

Концептуальная модель рудосохранения представлена на рис. 6.

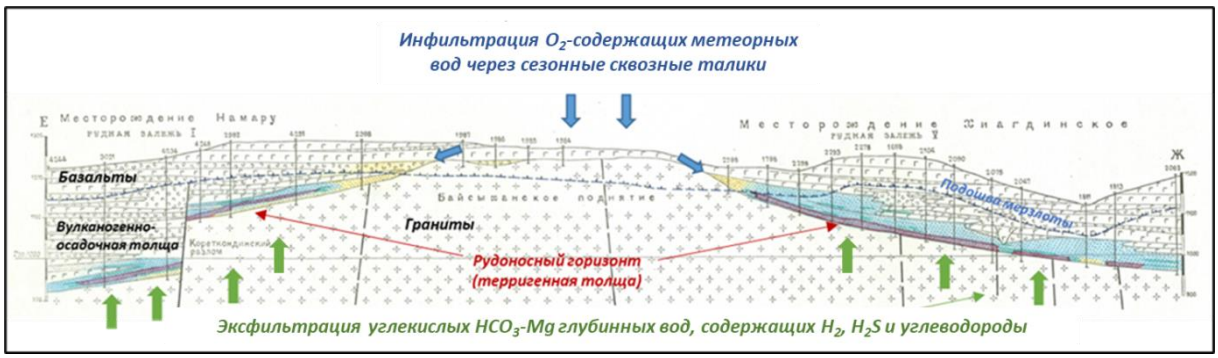


Рис. 6. Концептуальная модель рудосохранения в рудных залежах месторождений Хиагдинского рудного поля

Влияние углекислых гидрокарбонатно-магниевых подземных вод на СПВ урана

Углекислые подземные воды с содержанием растворенного CO_2 ≥ 1 г/дм^3, а также воды с низким содержанием CO_2 $< 1{,}0$ г/дм^3, но с повышенной концентрацией HCO_3 $> 0{,}5$ г/дм^3 отрицательно влияют на СПВ урана. Это влияние проявляется в снижении проницаемости рудоносных отложений в результате возникновения газовой и твердофазовой кольматации рудоносных отложений и эксплуатационных откачных скважин и, как следствие, через падение производительности откачных скважин к снижению добычи урана.

Собственно углекислые гидрокарбонатно-магниевые воды распространены на месторождениях Намаруское и Кореткондинское. При

залегании рудных тел на глубине 210–330 м известны случаи фонтанирования разведочных скважин с высотой газово-жидкого фонтана до 20 м (рис. 7). Можно грубо оценить давление насыщения подземных вод CO_2 в пластовых условиях при фонтанировании скв. 5420г на Намаруском месторождении. При глубине залегания кровли водоносного горизонта – 282,8 м и высоте фонтана 20 м $P_{CO2} = P_{нас} \approx 3{,}07$ МПа. Точное значение парциального давления CO_2, содержания HCO_3 и растворенного CO_2 можно определить при использовании герметичного пробоотборника с датчиками pH, давления и температуры, а также теории поведения углекислого газа в вертикальном сечении скважины. Дополнительным параметром также является установление в скважинах, например, методом фронтального видеокаротажа точки эвазии (начала дегазации).



Рис. 7. Фонтан газово-жидкой эмульсии при сооружении гидрогеологической скважины 5420г на месторождении Намаруское

Газовая кольматация порового пространства рудоносных отложений. Совместное действие трех процессов – растворение в серной кислоте карбонатных минералов (средняя карбонатность рудоносных отложений 0,2%), образование CO_2 в результате разрушения гидрокарбоната подземных вод серной кислотой в зоне дисперсии (смешение природных и техногенных подземных вод), высаливание до 30% природного и техногенного CO_2 при росте минерализации выщелачивающих растворов при конгруэнтном и инконгруэнтом растворении минералов рудоносных отложений – в совокупности приводит к возникновению газовой кольматации. При движении выщелачивающих растворов в направлении от закачной к откачной скважине гидродинамическое давление снижается, достигая минимума

в разгрузочной скважине. В связи с этим объем свободной газовой фазы достигает максимальных значений вблизи откачной скважины и, соответственно, в этой области возрастает интенсивность газовой кольматации порового пространства. Согласно экспериментальным исследованиям фазовой проницаемости пористых сред при движении двухфазной смеси при появлении свободной газовой фазы 10-20 объемн.% проницаемость жидкой фазы снижается до 48-70% [13].

Вывод: чтобы снизить или полностью исключить газовую кольматацию рудоносных отложений необходимо закисление пласта проводить слабокислыми растворами с содержанием серной кислоты 5 г/л. Целью такого процесса является замещение природных углекислых гидрокарбонатно-магниевых подземных вод слабокислыми выщелачивающими растворами. Это также позволяет уменьшить интенсивность газообразования при взаимодействии серной кислоты с карбонатными минералами и подавить процесс высаливания, связанный с ростом минерализации выщелачивающих растворов, особенно на фронте закисления. Завершают процесс «мягкого» закисления рудоносного пласта при снижении концентрации HCO_3 ниже его концентрации в подземных водах и начинают увеличивать содержание H_2SO_4 в рабочих растворах до 15-20 г/л. Обычно процесс замещения природных гидрокарбонатных подземных вод сернокислыми растворами при расстоянии между нагнетательными и разгрузочными скважинами 40 м длится не более 4 месяцев.

Твердофазовая кольматация порового пространства рудоносных отложений. Снижение парциального давления углекислого газа вблизи откачной скважины, распространяющееся вглубь пласта до 10-15 м [14], сопровождается смещением карбонатного равновесия в сторону образования CO_3^{2-} и увеличению pH. Источниками Ca^{2+} в техногенных подземных водах являются концентрации кальция в природной пластовой воде и продукты растворения кальцита (присутствует в рудах в подчиненном количестве) серной кислотой и выщелачивания кальция из алюмосиликатов рудовмещающих отложений (CaO – 0,6–1,6 %). В результате роста концентраций CO_3^{2-} и Ca^{2+} вблизи разгрузочных скважин происходит пересыщение растворов карбонатом кальция и начинается кальцитизация прискважинной зоны, фильтра и внутреннего пространства обсадной колонны скважины (рис. 8). Существование этого процесса подтверждено результатами контрольного бурения и изучения осадков, отобранных с внутренней поверхности скважин [14].

Вывод: важно в период кальцитизации скважины и прискважинного пространства проводить солянокислотные химические обработки скважин с нагнетанием растворов соляной кислоты в пласт. Если этого не делать своевременно, кальцит замещается гипсом (рис. 9) и за счет вдвое большего мольного объема твердофазовая кольматация порового пространства рудоносных отложений усиливается. Для удаления отложений гипса из

скважин и прискважинной зоны приходится применять более дорогостоящие химические обработки с использованием бифторида аммония [14].

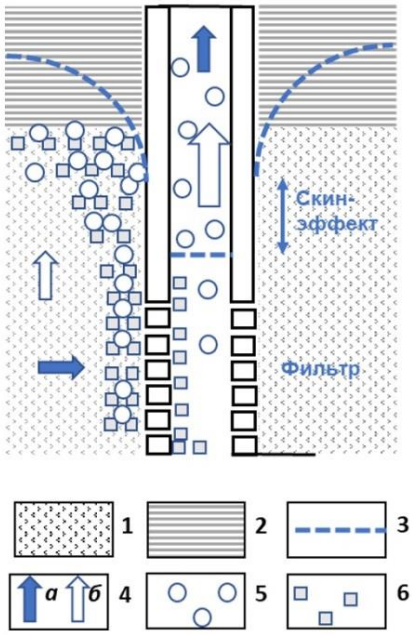


Рис. 8. Схема газовой и твердофазовой кольматации порового пространства отложений рудоносного пласта и откачной скважины.
1 – рудоносные пески; 2 – верхний водоупор (глины, алевриты); 3 – уровень подземных вод; 4 – движение жидкости (а) и газа (б); 5 – углекислый газ; 6 – кальцит

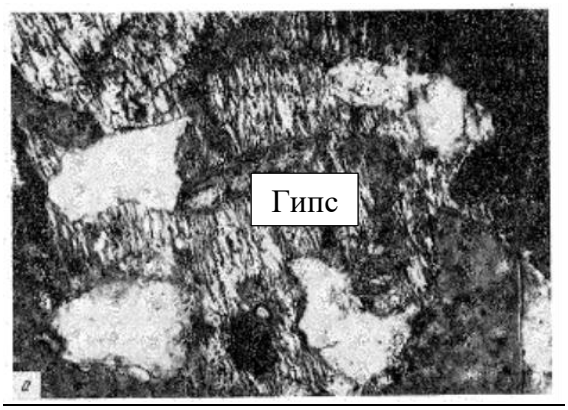


Рис. 9. Пластовая гипсовая кольматация рудоносных отложений. Техногенный гипс замещающий новообразованный кальцит в средне-мелкозернистом рудоносном песке
(съемка в скрещенных николях)

Заключение

Приведенный фактический материал показывает существенную роль восстановительных углекислых гидрокарбонатно-магниевых подземных вод в сохранении урановых руд от окислительного воздействия метеорных кислородсодержащих вод. Важно отметить, что при СПВ крайне нежелательно останавливать эксплуатационные блоки и полигоны СПВ на длительный срок, т.к. помимо нейтрализации серной кислоты рудоносными отложениями будет также происходить восстановление урана эксфильтрующимися углекислыми водами, обладающими высокой восстановительной способностью.

Также показано, что в условиях высоких содержаний гидрокарбоната в природных подземных водах для снижения газовой и твердофазовой кольматации рудоносных отложений и технологических скважин целесообразно процесс закисления рудоносного пласта проводить

слабокислыми растворами и своевременно в этот период выполнять солянокислотные обработки скважин и прифильтрового пространства.

Литература

1. Ильичев А.В., Данковцев Р.Ф., Лукьянова В.Т., Маринов Б.Н. К вопросу о генезисе уранового оруденения в неогеновых палеорусловых структурах под покровом базальтов Витимского плато (Забайкалье) // Мат-лы по геол. мест. урана. Инф. сб. КНТС. М.: ВИМС, 1990. Вып. 125. С. 46–57.
2. Винокуров С.Ф. Генетическая модель формирования уранового оруденения витимского типа. 2018 (не опубликованные данные).
3. Кочкин Б.Т., Тарасов Н.Н., Андреева О.В. и др. Полигенность и полихронность урановой минерализации на месторождениях Хиагдинского рудного поля (Бурятия) // Геол. рудн. мест., 2017, том 59, № 2. С. 124–140.
4. Солодов И.Н., Нестерова М.В. Углекислые подземные воды – рудосохраняющий фактор на урановых месторождениях Хиагдинского рудного поля (Республика Бурятия) / Всероссийская конференция с международным участием «Породо-, минерало- и рудообразование. Достижения и перспективы исследований». М.: ИГЕМ РАН, 5-9 апреля 2021.
5. Дойникова О.А., Тарасов Н.Н., Карташов П.М. Урановая минерализация палеодолинных месторождений Витима // Разведка и охрана недр, 2018, №12. С. 24-30.
6. Лисицин А.К. Гидрогеохимия рудообразования. М.: Недра, 1975. 248 с.
7. Kajitani K. A geochemical study on the genesis of ningyoite, the special calcium uranium phosphate mineral. Economic Geology №65. 1970. P. 470-480.
8. Гаррелс М.Р., Крайст Ч.Л. Растворы, минералы, равновесия. М.: изд. «Мир», 1968. 370 с.
9. Голубев В.Н., Чернышев И.В., Чугаев А.В. и др. U-Pb системы и изотопный состав урана в урановом месторождении «песчаникового» (палеодолинного) типа: месторождение Дыбрын, Витимский урановорудный район, Россия // Геол. рудн. мест., 2017. Т. 55. № 6. С. 467-480.
10. Маринов Б.Н. К вопросу о происхождении гидрокарбонатных магниевых вод во впадинах Забайкальского типа // Геохимия, 1974, № 7. С. 1093-1099.
11. Рассказов С.В., Лямина Н.А., Черняева Г.П. и др. Стратиграфия кайнозоя Витимского плоскогорья: Феномен длительного рифтогенеза на юге Восточной Сибири. Ин-т земной коры СО РАН. Новосибирск: Академическое изд-во "Гео", 2007. – 193 с.
12. Макаров С.И., Ильичев А.В., Шуршалина М.А. Углекислые урароносные источники южной части Витимского района (Западное Забайкалье) // Мат-лы по геол. мест. урана. Инф. сб. КНТС. М.: ВИМС, 1985, Вып. 95, С. 131-137.
13. Пыхачев Г.Б., Исаев Р.Г. Подземная гидравлика // М.: Недра, 1973 – 361 с.
14. Авдонин Г.А., Солодов И.Н. Механизм гипсовой кольматации откачных скважин // Научно-практическая конференция с международным участием «Геотехнологические методы освоения месторождений твердых полезных ископаемых». М.: ФГУП «ВИМС», 17-19 ноября 2015 г.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГИДРОГЕННОГО ТИПА И ИХ ПОИСКОВЫЕ ЗНАЧЕНИЯ

Р.А. Турсунметов[1], Х.Х. Оловов[2], Ш.И. Жураев[3]

1 – ГУ «Институт ГИДРОИНГЕО», г. Ташкент, Республика Узбекистан,
2 – АО «Уранредметгеология», г. Ташкент, Республика Узбекистан,
3 – Госкомгеологии РУз, г. Ташкент, Республика Узбекистан

В Узбекистане урановые месторождения гидрогенного типа в большей степени развиты в переделах Кызылкумской урановорудной провинции [24]. В последние годы комплексные геологоразведочные работы направлены на выявление скрытых урановых месторождений гидрогенного типа на большой глубине. В настоящее время выявлено урановое оруденение, залегающее на глубине более 800 метров. Для выявления уранового оруденения по существующей методике потребуется выполнение большого объема буровых работ. В связи с этим первоочередной задачей является выявление поисковых критериев, связанных с урановым оруденением, залегающим на большой глубине. В этом аспекте основной проблемой является установление особенностей формирования урановых месторождений гидрогенного типа, которые будут служить в качестве поисковых признаков. Исходя из особенностей формирования уранового оруденения, эти процессы целесообразно рассмотреть в иерархии пространства и времени при эволюции земной коры [21].

Ураноносные зоны преимущественно приурочены к краевым частям артезианских бассейнов, примыкающих к магматическим телам лейкогранитного, гранитного, гранит-порфирового состава. Они являются основными источниками урана, т.к. в альпийский период развивалась тектономагматическая активизация, в результате чего благодаря процессу выщелачивания происходит вынос урана, содержащегося в потоке подземных вод. В свою очередь уран и другие геохимические элементы мигрируют в краевые части артезианских бассейнов. С другой стороны, тектономагматическая активизация привела к своеобразным изменениям не только физических свойств магматических тел, но и ураноносной зоны в целом за счет выноса полезных компонентов из магматических тел. Они характеризуются низкой магнитностью, тогда как активизация привела к уплотнению магматического тела. Таким образом, магматические тела, являющиеся источником урана, характеризуются локальной отрицательной аномалией геомагнитного поля, в то же время положительной аномалией гравитационного поля. Следует отметить что уплотнение магматических тел сопровождается разуплотнением ураноносной зоны. Отсюда следует, что магматические тела и ураноносная

зона находятся в изостатическом равновесии, что свидетельствует о тесной связи между магматическими телами и ураноносной зоной.

В качестве примера приводим результаты бурения, по которым составлен детальный разрез, где вскрыто урановое оруденение в отложениях маастрихта и эоцена.

Из представленного следует, что присутствие уранового оруденения характеризуется монотонным повышением геомагнитного поля, тогда как по поведению поля силы тяжести указанные тела отмечаются его понижением в отдельности. Площадь распространения урановых оруденений можно рассматривать по поведению изолиний как геомагнитного поля, так и гравитационного поля. Урановое оруденение преимущественно приурочено к изолиниям, характеризующимся пониженными значениями поля силы тяжести, тогда как указанные оруденения тяготеют к повышенным значениям геомагнитного поля (рис. 1-3).

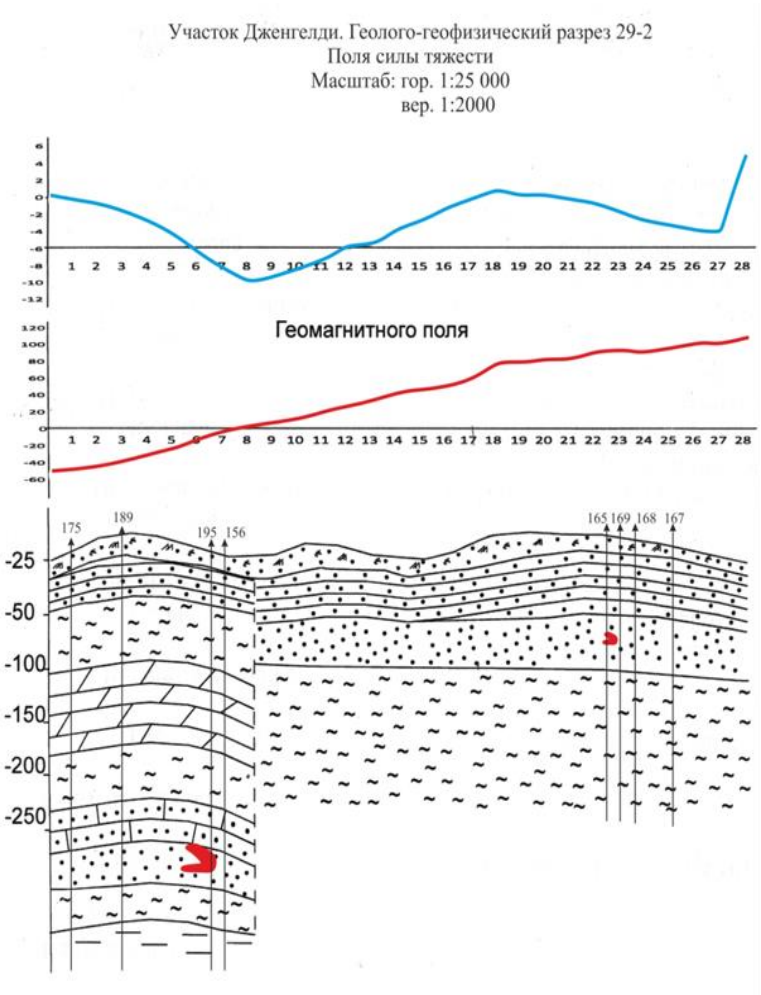


Рис. 1. Результаты грави- и магниторазведки по участку Дженгельды

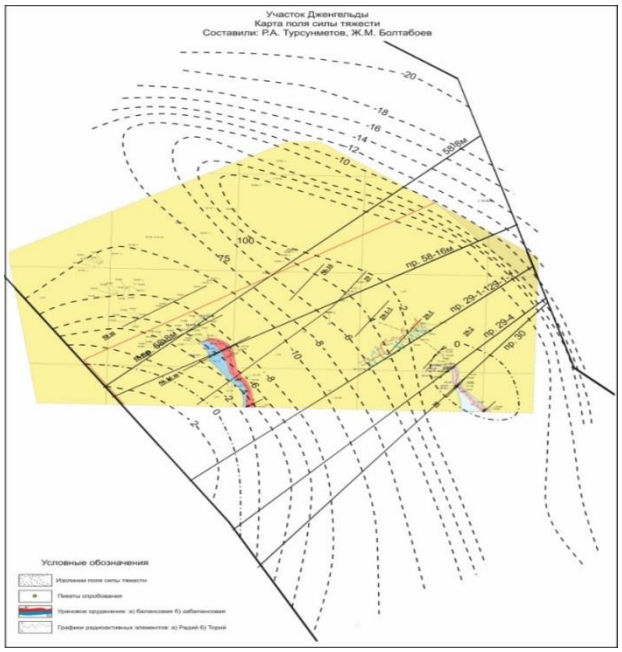


Рис. 2

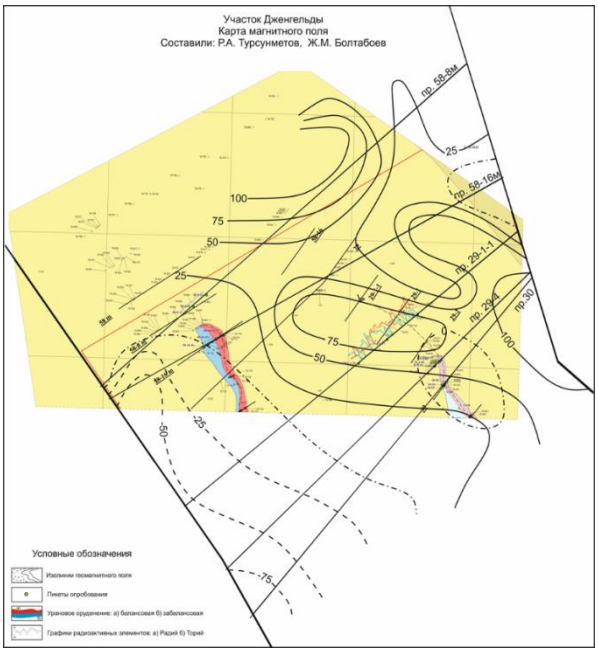


Рис. 3

Необходимо отметить сторону вкрест простирания рудных тел, где развиты магматические образования лейкогранитового состава, которые отмечаются повышенными значениями изолиний поля силы тяжести, а геомагнитного поля – пониженными значениями. Таким образом особенности изменения гравитационного и магнитного поля могут привлекаться при установлении ураноносных зон.

Другой особенностью формирования уранового оруденения является то, что оно локализуется в рамках развития адвективных структур [4]. Эти структуры формируются при тектонических процессах, происходящих при ограниченных глубинах. Особенность таких структур заключается в том, что они состоят из двух блоков, отличающихся по степени уплотненности. Причем при поднятии разуплотненного блока наблюдается развитие трещиноватости, которая благоприятствует локализации уранового оруденения. Второй блок отличается уплотненностью, следовательно, характеризуется повышенными значениями плотности. В целом описанная структура характеризуется инверсией физических свойств горных пород.

С точки зрения тектоно-физических процессов рудолокализующие структуры характеризуются касательными напряжения слабо и слабо-умеренного характера.

С точки зрения тектоно-динамических процессов они также отличаются подвижностью, и это явление четко проявляется при воздействии лунно-солнечного прилива и отлива.

На основе этого была составлена физико-геологическая модель, которая отражает особенности рудолокализующей структуры (рис. 4).

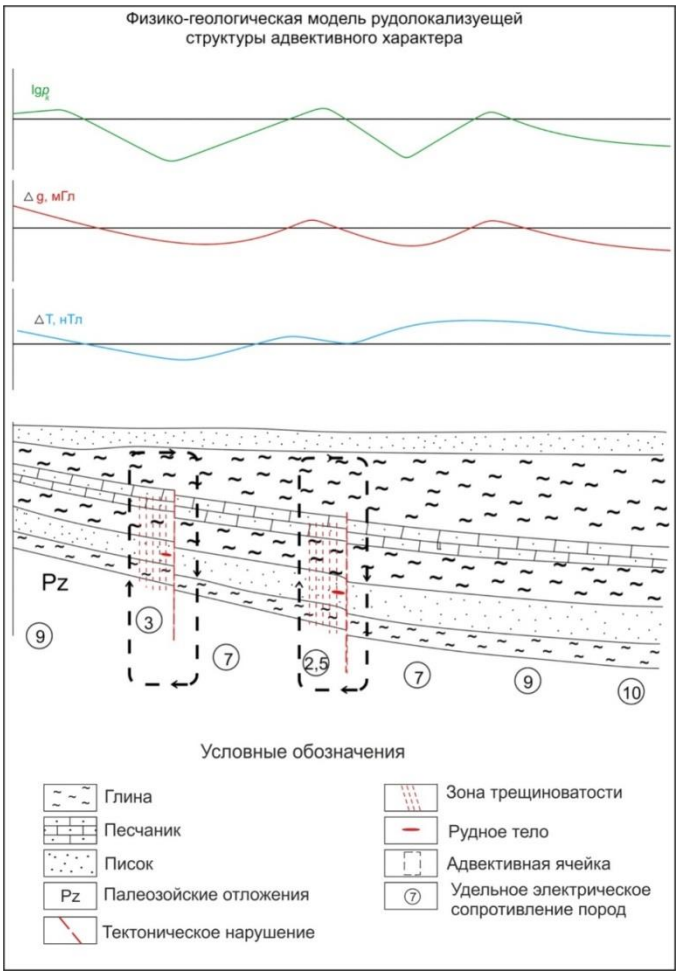


Рис. 4

Отметим, что эти структуры отмечаются подвижностью и под воздействием лунно-солнечного прилива-отлива создают аномально суточную динамику гравитационного поля. На рис. 5 представлены результаты измерения поля силы тяжести над урановым оруденением, залегающем на глубине 100 м. Рудосодержащие структуры отмечаются заметным приращением поля силы тяжести. Следовательно, аномально-суточная динамика может использоваться при прослеживании рудных объектов. Приуроченность урановых месторождений к определенным тектоническим структурам можно рассматривать в рамках эволюции тектонических структур, так как урановые структуры формируются при участии палеозойских, альпийских и неотектонических структур. В целом урановые месторождения тяготеют к палеозойским структурам, которые служат в качестве фундамента артезианских бассейнов. Эти структуры служат в качестве ураноносного рудного района. В пределах подвижных зон тектонической структуры образовались проницаемые рудовмещающие отложения песчаников и песков, которые отличаются блоково-зональным строением. В дальнейшем рудовмещающие горизонты благодаря неотектоническим процессам образуют сквозные рудолокализующие структуры, благоприятствующие скоплению урана. Эти структуры обладают особой энергетикой при тектоно-динамических явлениях, возникших в процессе тектонической активизации территории.



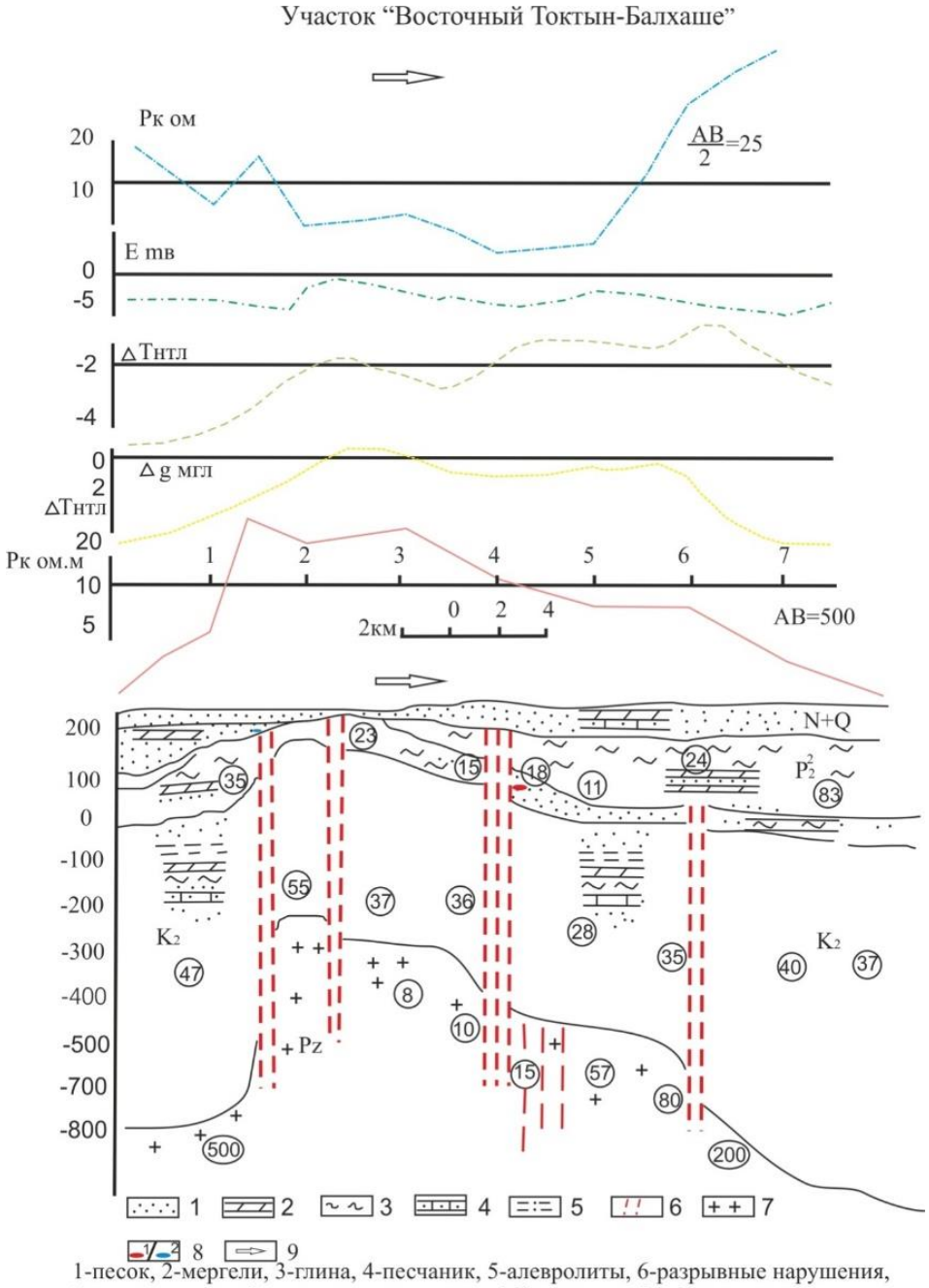
Рис. 5. Изучение аномально-суточной динамики гравитационного поля

В качестве примера рассмотрим результаты комплексных исследований на участке Восточный Токтын-Балхаше по выявлению уранового оруденения в эоценовых проницаемых отложениях, которые приурочены к палеозойским отложениям. В палеозойских отложениях по результатам геофизических наблюдений выявлен ряд тектонических нарушений, которые служили в качестве миграционных каналов H_2 и H_2S, выступающих в качестве гидрогеохимического барьера. В целом присутствие уранового оруденения отмечается слабыми аномалиями геофизических полей (рис. 6).

Гидрогеохимическая зональность рудовмещающего водоносного горизонта играет особую роль в осаждении урана и в формировании минералов урана (коффинит, настуран и т.д.). В этом аспекте особое внимание уделяется распределению окислительно-восстановительного потенциала (ОВП), Eh и pH [2]. Своеобразное распределение последнего указывает на развитие окислительных и восстановленных процессов в геологической среде. В настоящее время в достаточной степени разработана гидрогеохимическая зональность водоносных горизонтов при осаждении урана. Мы ниже отметим лишь особенности формирования уранового оруденения с точки зрения поискового значения.

На границе зоны пластового окисления и рудной зоны наблюдается резкое увеличение содержания радиоактивных и геохимических элементов благодаря развитию гидрогеохимических барьеров H_2, H_2S и др. При этом при повышении содержания радия и других радиоактивных элементов наблюдается резкое увеличение содержания макрокомпонентов – Ca, Mg, HCO_3, а также снижение других макрокомпонентов (SO_4, Na и Cl). Данные элементы наряду с Ra и Rn служат как восстановителями урана, так и сопровождающими элементами. При осаждении урана особую роль играет значение ОВП-Eh, снижение которого указывает на развитие уранового оруденения. По нашему мнению, на снижение Eh существенно оказывает

влияние присутствие гидратированных электронов, которые связаны с активизацией трещиноватых зон, развивающиеся в нижележащих горизонтах [3]. Присутствие гидратированных электронов обуславливает переход трехвалентного железа в двухвалентное железо, собственный электрический потенциал которого характеризуется отрицательными значениями. Следовательно, присутствие Fe^{2+} в водовмещающем горизонте приводит к снижению ОВП, в результате чего создается восстановительная среда, способствующая осаждению урана. В целом гидратированные электроны способствуют снижению ОВП.



1-песок, 2-мергели, 3-глина, 4-песчаник, 5-алевролиты, 6-разрывные нарушения, 7-гранодиориты, 8-урановые оруденение: 1.балансовое, 2.забалансовое , 9-направление движения грунтовых вод

Рис. 6

Осаждение урана сопровождается увеличением содержания радона, свинца, мышьяка, висмута, селена, лантана, цезия, никеля, марганец, сурьмы, тория, рения, гафния, стронция, рубидия, кобальта, что в дальнейшем может служить в качестве поисковых гидрогеохимических критериев. С точки зрения поисковой стратегии рассмотрим особенности вышеперечисленных макро- и микрокомпонентов, т.к. в реальных условиях скважины могут находиться в зонах пластового окисления и вблизи зоны осаждения урана. В этом случае о наличии уранового оруденения между скважинами можно судить по особенностям изменения макро- и микрокомпонентов, которые отличаются градиентным повышением. Такими же закономерностями обладают такие микрокомопоненты, как селен, никель, цинк, кобальт, лютеций, европий, серебро. При этом наблюдаем обратную картину поведения макрокомпонентов SO_4, Na и Cl, которые коррелируются с поведением микрокомпонентов железо, сурьма, мышьяк, марганец.

Ниже приводим наиболее характерные графики радиоактивных и геохимических элементов, электрохимических показателей, которые отражают особенности отмеченных предпосылок наличия уранового оруденения между скважинами (рис. 7).

С точки зрения поисковых признаков уранового оруденения представляет интерес изучение геохимических процессов, происходящих над урановым оруденением. Эти процессы во многом определяют поведение вторичных ореолов рассеяния на поверхности земли [27]. В этом аспекте, исходя из особенности поведения радиоактивных и геохимических элементов, можно сформулировать основные показатели самостоятельной геохимической структуры, исходящей из рудовмещающего водоносного горизонта. При этом над урановым оруденением формируются энергетические каналы миграции радиоактивных и геохимических элементов [7]. Пространство, в котором расположены энергетические каналы, можно рассматривать как продолжение рудовмещающей среды трещиноватого характера и подвижных палеозойских отложений. В результате развития тектоно-динамических процессов за счет лунно-солнечных приливов-отливов в эволюции земной коры образовались полосы различной степени уплотнённости, характерно направленные к поверхности земли. Именно эти полосы служат в качестве энергетических каналов для струйной миграции радиоактивных и геохимических элементов [17].

В связи с этим в последние годы предлагается солитоновый перенос геохимических элементов, который исходит от рудного оруденения и примыкает к поверхности земли, где происходит скопление элементов [22]. При этом по всему каналу присутствуют геохимические элементы, тем самым их можно рассматривать, как непрерывную цепь сосредоточенных элементов. Такой подход указывает, что по этому каналу происходит миграция геохимических элементов, а также осуществляется перенос

энергии. В том числе радиоактивные частицы (α, β, γ). В солитоновом энерго-масса-переносе деформационные явления вызваны лунно-солнечными прилив-отливами. Замечено, что при развитии деформации сжатия наблюдается повышение интенсивности радиоактивных частиц, за счет их выдавливания. При развитии деформации растяжения наблюдаем обратную картину, что по двум измерениям удается установить аномально суточное изменение интенсивности радиоактивных частиц, которое характеризует источники возбуждения.

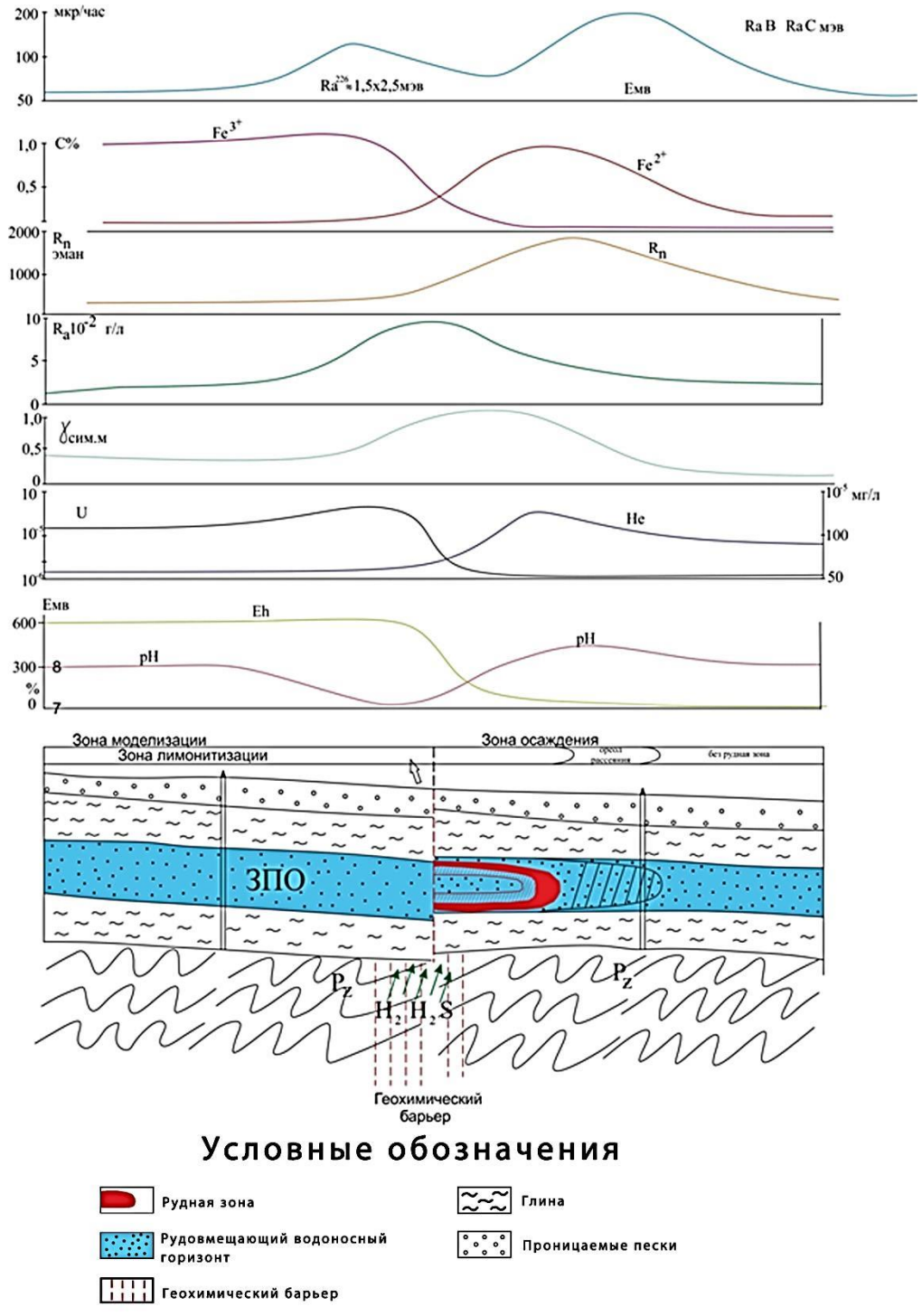


Рис.7. Физико-геологическая модель гидрогеохимической зональности подземных вод

Около поверхности земли установлен энергетический слой мощностью около метра, и особенность этого слоя заключается в скоплении в нем геохимических элементов. При анализе поведения элементов во вторичном ореоле особое внимание необходимо обратить на природу формирования радиоактивных и геохимических элементов, т.к. радиоактивные элементы формируются не только за счет разрушения минералов, но и формируются за счет деления, а также за счет распада уранового ряда.

В связи с этим наряду с радиоактивными элементами были установлены изотопы геохимических элементов, связанные с урановым оруденением.

Ниже рассмотрим установленные особенности радиоактивных и геохимических элементов, которые получены по урановым месторождениям Центрально-Кызылкумской урановорудной провинции. Миграционной подвижностью в большей мере обладают радий и радон, которые характеризуются определенным энергетическим спектром.

Изучение гамма-активности в диапазоне от 400-800 кэВ над залегающим на глубине 100 м урановым оруденением показало аномальные изменения гамма-излучения.

Подобное поведение гамма-излучения вызвано прежде всего распадом радона, при котором испускается гамма-излучение с энергетическим спектром 500 кэВ (рис. 8). Следовательно, гамма-излучение на указанном энергетическом спектре можно рассматривать как информативный параметр, указывающий на наличие уранового оруденения на глубине.



Рис. 8

На рис. 9 представлены результаты измерения геохимических проб по разрезу профиля, где вскрыто урановое оруденение на глубине 130 м. Этот пример характерен тем, что над урановым оруденением наблюдаются

локальные аномалии концентрации радона и аномалии концентрации радия, полученные посредством измерения альфа-излучения.

Подобные изменения данных элементов вызваны тем, что по энергетическому каналу также мигрирует радий в виде субмикроскопических частиц, тем самым обеспечивая аномальные изменения радона около поверхности земли.



Геологический разрез по материалам КГСП

Рис. 9. Результаты измерений, 30 профиль

На рис. 10 представлены результаты изучения геохимических проб, где урановое оруденение вскрыто на глубине 520 м. Также, как и на предыдущем примере, урановое оруденение отмечается локальными аномалиями радия и радона. Наряду с этими аномалиями наблюдаются аномалии значений редкоземельных элементов и pHmB. Во всех случаях энергетические каналы над урановым оруденением характеризуются повышенными значениями ОВП, pH и удельной электропроводности, способствующими переносу солей и геохимических элементов. Представляет интерес изучение pHmB,

характеризующий восстановительные и окислительные процессы. В частности, в нашем случае урановое оруденение характеризуется относительно положительными значениями pHmB, что свидетельствует о развитии у поверхности земли окислительно-восстановительных процессов. Таким образом, урановое оруденение с уверенностью выявляется по данным изучения радиоактивных и электрохимических свойств геохимических проб.



Рис. 10

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1) Площадь развития урановосных зон тесно связана с магматическими телами гранитного, гранит-порфирового, лейкогранитного состава. Эта площадь четко проявляется в поведении гравимагнитных полей, а именно – отмечается понижением гравитационного поля и в то же время повышением геомагнитного поля. Наконец, магматические тела и урановосная зона находятся в изостатическом равновесии.

2) Рудолокализующая структура представляет собой адвективную структуру, отличающуюся подвижностью, которая явно отмечается аномально-суточной динамикой гравитационного поля.

3) Формирование уранового оруденения рассматривается в рамках эволюции тектонических структур, в которых участвуют палеозойские, альпийские и неотектонические структуры. В результате образуются сквозные рудоконцентрирующие структуры. В рамках модели рудовмещающего водоносного горизонта выявлены особенности изменения радиоактивных и других элементов, свидетельствующие о наличии уранового оруденения.

4) Сформулированы геохимические структуры, исходящие из уранового оруденения, включающие в себя энергетические миграционные каналы, способствующие переносу радиоактивных элементов, и энергетический слой, благоприятствующий скоплению геохимических элементов вторичного рассеяния.

Литература

1. Джураев А.Д., Скрябин В.Ф. Эффективность геохимических поисков в Узбекистане / Сб. Прикладная геохимия. Вып. 3. Прогноз и поиски. М.: ИМГРЭ, 2002. С. 449-471.

2. Перельман А.И. Геохимия эпигенетических процессов. М.: Недра, 1965. 272 с.

3. Перельман А.И. Гидрогенные месторождения урана. М.: Атомиздат, 1980. 270 с.

4. Белоусов В.В. Геотектоника. М.: Издательство Московского Университета, 1976. 334 с.

5. Батулин С.Г., Головин Е.А., Зеленова О.И. и др. Экзогенные эпигенетические месторождения урана. М.: Атомиздат, 1965. 324 с.

6. Бойцов В.Е., Пилипенко Г.Н., Солодов Н.А. Месторождения благородных, радиоактивных и редких металлов. М.: НИА-Природа, 1999. 220 с.

7. Василиев Ю.В. Оценка влияния геоэлектрических полей на миграцию ионных компонент радионуклидов в геологических средах / Исследования гранитоидов Нижнеканского массива для захоронения РАО: Материалы КНТС. СПб., 1999. С. 61-65.

8. Геология, геохимия, минералогия и методы оценки месторождении урана / Под ред. Де Виво Б., Ипполито Ф., Капалди Г., Симпсон П.Р. М.: Мир, 1988. 336 с.

9. Геохимия урана в зоне гипергенеза. / Евсеева Л.С., Перельман А.И., Иванов К.Е. М.: Атомиздат, 1975. 280 с.

10. Голомолзин В.Е., Высокоостровская Е.Б., Краснов А.И., Мац Н.А. Современные геофизические технологии при прогнозно-поисковых работах на уран // Разведка и охрана недр. 2009. № 3. С. 46-54.

11. Гольдштейн Р.И., Бровин К.Г., Каримов Х.К. и др. Металлогения артезианских бассейнов Средней Азии. Ташкент: Фан, 1992. 272 с.

12. Виноградова И.В., Виноградов В.Н. Новые перспективные геохимические методы поисков и оценки глубокозалегающих месторождений полезных ископаемых / Сб. Прикладная геохимия. Вып.3. Прогноз и поиски. М.: ИМГРЭ, 2002. С. 343-364.

13. Временные методические указания по проведению геохимических поисков на закрытых и полузакрытых территориях. СПб.: Изд. ВСЕГЕИ. 2005. 96 с.

14. Агапова Г.Ф., Модников И.С., Шмариович Е.М., Константинов А.К. Моделирование процесса гидротермального выщелачивания урана и его спутников из гранитов // Геология руд. месторождений. 1990. № 2. С. 78–84.

15. Новые методы инженерной геофизики / Бондаренко В.М., Викторов Г.Г., Демин Н.В. и др. М.: Недра, 1983. 224 с.

16. Лаверова Н.П. Подземное выщелачивание полиэлементных руд. М.: Изд. Академии горных наук, 1998. 446 с.

17. Рысс Ю. С., Гольдберг И. С., Алексеев С. Г., Духанин А. С. Струйная миграция вещества в образовании вторичных ореолов рассеяния // ДАН СССР. 1987. Т. 297, № 4. С. 956–958.

18. Геолого-промышленные типы урановых месторождений урана стран СНГ / Под ред. Машковцева Г.А. М.: ВИМС, 2008. 72 с.

19. Турсунметов Р.А. К математическому моделированию рудоконтролирующих факторов для прогнозирования перспективных участков на урановое оруденение гидрогенного типа / Инновационные технологии прогноза, оценки и освоения минерально-сырьевой базы твердых полезных ископаемых Республики Узбекистан: тез. междунар. науч.-техн. конф. «Узгеоинновация-2010». Ташкент, 2010. С. 113-116.

20. Турсунметов Р.А., Абдуллаев Б.Д., Турапов М.К. О совершенствовании методики поисков скрытых рудных месторождений / «Геология и Минеральные ресурсы». Ташкент, 2018. С. 54-63.

21. Турсунметов Р.А. и др. Иерархическая физико-геологическая модель урановых месторождений гидрогенного типа и их поисковые значения / «Актуальные проблемы геологического образования в Республике и перспективы развития наук о Земле 2020 г.». Ташкент, 2020. С. 270-275.

22. Турсунметов Р.А., Абдуллаев Б.Д. Возможности радиогеохимического метода при поисках уранового месторождения гидрогенного типа // Разведка и охрана недр. 2013. № 8. С. 78-82.

23. Уран на рубеже веков: природные ресурсы, производство, потребление: труды Международного симпозиума по геологии урана (Москва, 29 ноября – 1 декабря 2000 г.) / Под ред. Гаврилина В.И., Дмитриевой И.Е., Печенкина И.Г. М.: ВИМС МПР, 2002. 317 с.

24. Учкудукский тип урановых месторождений Республики Узбекистан / Каримов Х.К., Бобоноров Н.С., Бровин К.Г. и др. Ташкент: Фан, 1996. 336 с.

25. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М.: Недра, 1978. 287 с.

26. Щербина В.В. Основы геохимии. М.: Недра, 1972. 296 с.

27. Global Uranium Symposium keystone, Colorado. May 11-13, 2009. 250 p.

28. Exploration for Uranium Ore Deposits / Proccedings of a Symposium on Exploration of Uranium Ore Deposits organized by the International Atomic Energy Agency and the OECD Nuclear Energy Agency and held in Vienna, 29 March – 2 April. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1976. 807 p.

НЕКОТОРЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ К ГЕНЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТИПА НЕСОГЛАСИЯ, ПРИНЯТОЙ ЗА РУБЕЖОМ

М.В. Шумилин

Урановые месторождения типа несогласия, наряду с месторождениями песчаникового типа, являются основными источниками урана, сохраняющими рентабельность в условиях современных низких цен. Как известно, их отличает исключительно высокое содержание урана в рудах, достигающее на отдельных объектах десятков %. Эти месторождения широко распространены в Канаде и Австралии, но в России пока представлены единственным мелким объектом – Карху в Северном Приладожье. Оценка перспектив развития сырьевой базы урана в нашей стране за счет месторождений данного типа представляется актуальной проблемой российской геологии.

Характеристике зарубежных месторождений несогласия посвящена обширная, главным образом иностранная литература. Краткий обзор особенностей их строения и принимаемой генетической модели приведены в нашей предыдущей работе [3]. Эта модель является оригинальной и имеет ряд отличий от классических моделей, как эндогенного, так и экзогенного классов. Считается, что образование руд этих месторождений связано с конвекционной циркуляцией захороненных бассейновых вод (рассолов), динамику которой определяла специфическая структурная обстановка контактовой зоны кристаллического фундамента, заключающего слои тектонически нарушенных графитистых пород (восстановительная среда), с покровом пористых, песчанистых осадков, лишенных восстановителей [4, 5].

В качестве источника урана при этом рассматривается акцессорный минерал осадков (монацит). В обоснование этой точки зрения приводятся следующие факты:

- монацит в осадках встречается исключительно в виде полуразложенных зерен или изолированных выделений внутри породных обломков;
- в рудах и околорудных ореолах распространены новообразованные алюмо-фосфат-сульфаты редких земель (флоренсит, сванбергит), рассматриваемые, как продукты переотложения компонентов монацита;
- лабораторными экспериментами установлено, что монацит в хлоридных рассолах подвергается коррозии за время, исчисляемое месяцами, а следовательно в геологических временных масштабах должен считаться неустойчивым [3, 5].

Однако содержание урана в монаците не превышает первых процентов. Повышенные концентрации монацита в виде россыпей в песчаниковом покрове не зафиксированы, а общее среднее содержание урана в массе песчаников вряд ли превышало кларковое. При этом уран

(которого в монаците очень мало) образует в рудах концентрации до нескольких %, а редкие земли (основной компонент монацита) практически остаются в рассеянном состоянии.

По данным изучения газово-жидких включений в новообразованном кварце концентрация урана в рассолах была очень высокой – в среднем 10-20, до сотен мг/л (рис. 1).

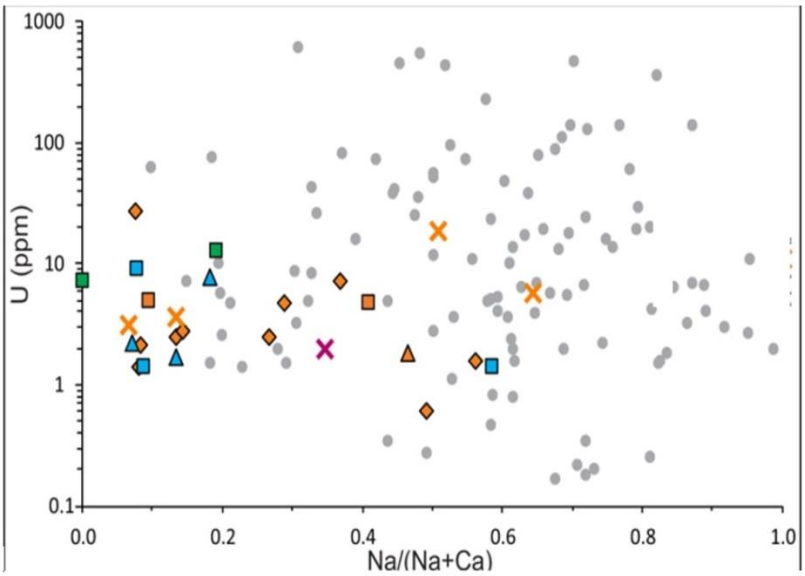


Рис. 1. График содержания урана в ГЖВ по бассейну Атабаска в зависимости от отношения Na/Ca. Серые значки – пробы по месторождениям; цветные – за пределами месторождений с различных толщ разреза [по 4]. Серые точки – данные по разным месторождениям; цветные значки – по скважинам разных участков вне месторождений, вскрывающим различные слои формации Атабаска: голубой – Лазерби лейк; оранжевый – Маниту Фоллс; зеленый – Вулверин пойнт

Напомним, что содержание урана в промышленных растворах при отработке месторождений способом подземного выщелачивания практически имеет тот же порядок (40-100 мг/л). Однако в этом случае агрессивными растворами промывается ограниченный объем рудного пласта с повышенным содержанием урана. В рассматриваемой модели генезиса месторождений типа несогласия объем циркуляции рудообразующих растворов соответствовал объему пор всей толщи песчаных осадков, мощностью в сотни метров, в то время как содержание урана не превышало кларка.

Попытаемся оценить возможную концентрацию урана в рассолах для таких условий циркуляции, допустив, что весь кларковый уран содержался в твердой фазе и полностью переходил в раствор. Примем, что плотность среды соответствует плотности утрамбованного влажного песка (2,545 т/м^3), при плотности сухого 1,920 т/м^3. Соответственно, объем пор такой среды 2,545-1920=0,625 м^3 *. Кларк урана для песчаных пород 2,5 г/т.

* Значения плотности взяты по сайту «Справочник строителя».

Соответственно, при указанной сухой плотности в 1 $м^3$ среды в твердой фазе заключено 2,5*1,920=4,8 г урана. Приняв, что он полностью переходит в раствор, получаем концентрацию в растворе 4,8/0,625= 7,68 мг/л.

Рассчитанное значение, хотя и близко к средней величине концентрации, полученной при изучении ГЖВ (10-20 мг/л), но все же не достигает уровня указанного интервала. При этом исходное допущение, что весь кларковый уран связан с монацитом и полностью переходит их него в раствор, заведомо неверно. Зерна монацита частично сохранились, значит уран из него не перешел в раствор полностью, а кроме того, в песках могли присутствовать и другие, более устойчивые его носители, например – циркон.

В то же время известно, что в гранитоидах, являющихся коренным источником материала при формировании песчаниковых толщ, значительная часть кларкового урана вообще связана не с акцессориями, а находится в т.н. «свободной» форме, т.е. в виде сорбированных ионов на кристаллах породообразующих минералов, ионов в поровых растворах и кристаллизационной воде. Этот свободный уран при выветривании и дезинтеграции гранитов легко переходит в грунтовые и поверхностные воды.

Геохимическая обстановка на земной поверхности в протерозое способствовала гораздо более интенсивному протеканию процессов химического выветривания пород и выщелачиванию урана в области питания бассейнов. Время формирования урановых месторождений типа несогласия (1600-1200 млн лет) было уже временем существенно кислородной атмосферы. Следовательно, миграция урана в поверхностных условиях Земли должна была происходить в основном в растворной форме. Эта форма должна была превалировать и в процессе накопления этого элемента в замкнутых осадочных бассейнах.

Замкнутые бассейны с повышенным содержанием урана в водах известны и на современной Земле. Уникальным таким объектом является высокогорное озеро Сасык-куль на Памире (Таджикистан). Озеро расположено в Горно-Бадахшанской области республики на высоте около 3800 м. Его координаты 37°41’49” СШ и 73°10”52” ВД (рис. 2) [2].

Озеро бессточное, площадь водного зеркала около 8 $км^2$. Вода озера сильно минерализована и представляет собой рассол (рапу) с содержанием солей 150-200 г/л, при pH=9,2. Содержание урана в этой рапе 20-30 мг/л. Окружающая озеро местность практически лишена растительности и почвенного слоя (рис. 3).

Климат района резко континентальный, солнечная радиация сильнейшая. Урановых месторождений в районе озера не известно, поэтому связывать повышенное содержание урана в рапе с наличием какого-то особо концентрированного коренного источника оснований нет.

По нашему мнению, озеро Сасык-куль может рассматриваться, как современная природная модель бассейнов протерозоя, в которых формировались урановые месторождения типа несогласия. Основным

отличием является щелочная реакция рапы этого озера, в то время как рассолы протерозойских бассейнов полагаются кислыми. Однако в атмосфере протерозоя, вероятно, в повышенной концентрации присутствовали вулканические газы, способствовавшие выпадению кислотных дождей.

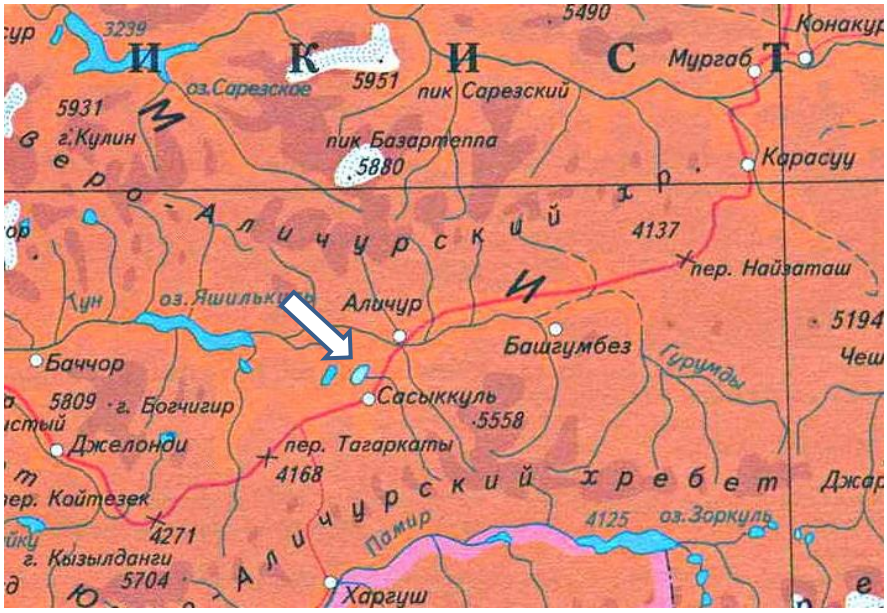


Рис. 2. Положение оз. Сасык-куль (показано стрелкой) на карте Памира



Рис. 3. Озеро Сасык-куль. Фото с сайта National Geographic

Озера с повышенным содержанием урана на уровне <1 мг/л распространены на современной Земле более широко. Так, в Монголии известно около десятка озер с содержанием урана в воде 0,1-0,5 мг/л, причем в двух оно достигает 2-2,5 мг/л [1]. В водах озера Иссык-куль содержание урана составляет около 0,03 мг/л, а в воде Каспийского моря – 0,003 мг/л. Таким образом, процесс водной миграции и накопления урана в замкнутых бассейнах сохраняется и в настоящее время, но в протерозое должен был проявляться гораздо сильнее, как по масштабам, так и по уровню концентрации урана в водах. Как представляется автору, именно привнос урана в бассейны поверхностными водами с области сноса в

период осадконакопления, а не выщелачивание этого металла из акцессориев осадков в период диагенеза, являлся основным его источником для месторождений типа несогласия.

Однако в такой модели главным фактором, определяющим формирование руд, становятся палеогидрогеологические условия, т.е. бессточный характер и эвапорационный режим бассейнов, окислительный тип осадков, их высокая проницаемость, наличие в области питания гранитоидов и других ураноносных образований, подвергающихся интенсивной химической эрозии, отсутствие на путях миграции вод осадителей урана (органики) и т.п.

Все эти критерии отчетливо проявлены в ураноносных бассейнах Атабаска, Пайн-Крик и др. Однако, при прогнозных построениях для подобных потенциально ураноносных районов России этой стороне проблемы до сих пор внимания не уделялось.

Подобные обстановки могли возникать на Земле исключительно в среднем протерозое, когда кислородный состав атмосферы уже определял миграцию урана в растворной форме, но на суше еще практически отсутствовала жизнь и восстановители (органика), как на путях миграции, так и в осадках бассейнов. Предлагаемая модель объясняет избирательную приуроченность месторождений типа несогласия к протерозою и исключает отнесение к этому классу месторождений иных эпох, локализованных в сходной структурной обстановке.

Пример озера Сасык-куль показывает, что в условиях замкнутых бассейнов при интенсивном развитии процессов выветривания в области сноса и испарительном режиме концентрация урана в бассейновых водах легко достигает значений, фиксируемых по ГЖВ в ураноносных бассейнах типа Атабаски. Не исключено, что именно привнос урана в бассейны в растворенной форме, устойчиво продолжавшийся в течение длительного времени и обеспечивавший постоянное пополнение его ресурсов в бассейновых водах, обусловил формирование в месторождениях типа несогласия уникально-богатых руд.

Литература

1. Самойлов В.И., Серикбаева А.Т. Гидроминеральное урансодержащее сырье. Вост.Казахстанский ГНТУ, 2015.

2. Хакимов Н., Назаров Х., Мирсаидов Н. О возможности извлечения урана из рапы озера Сасык-куль. Докл. АН Кыргызстана, т 54, № 9, 2011.

3. Шумилин М.В. Урановые месторождения типа несогласия: геология, генетическая модель и перспективы выявления в России. ВИМС, Минеральное сырье № 41, 2021.

4. Chi G., Chu H., Petts D., Potter L. Uranium-rich diagenetic flutds provide the key to unconformity related uranium mineralization. Scenyific reports v.9, № 5530Б 2019.

5. Dargent M., Truche L., Dubsy J. Reduction kinetics of aqueous U(VI) in acidic chloride brines to uraninite by hydrogen or C-graphite under hydrothermal conditions: Implications for the genesis of unconformity-related uranium ore deposits. Geochimia et Cosmochimia, vol.167, 2015.

ТЕХНОЛОГИИ ПОИСКОВ И ОЦЕНКИ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

ГИДРОМИНЕРАЛЬНОЕ СЫРЬЕ УЗБЕКИСТАНА КАК СЫРЬЕВОЙ РЕСУРС УРАНА: ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Р.Д. Аллабергенов, Г.А. Бимурзаев, С.А. Бакиев, А.С. Ибрагимов, Т.А. Гафуров

Институт «ГИДРОИНГЕО» Университета геологических наук, г. Ташкент, Республика Узбекистан

В докладе обсуждаются перспективы расширения сырьевой базы урана Узбекистана за счет вовлечения в переработку жидко-рудного гидроминерального сырья (сточных и подземных пластовых вод и рассолов), а также обзор известных и новых технологических разработок с оценкой возможности их использования для извлечения урана из этого сырья.

Для Узбекистана проблема утилизации металлоносного гидроминерального сырья особенно актуальна, а решение её весьма востребовано в связи с известной проблемой азиатского региона по обеспечению населения страны питьевой водой, особенно для областей страны с дефицитом пресных и слабосолоноватых подземных вод. Кроме этого, разработка и внедрение технологии переработки такого сырья, сочетающая производство чистой воды с извлечением металлов, в том числе урана, считается не только социально значимой, но и инвестиционно привлекательной.

Жидко-рудное сырье – нетрадиционный ресурс для страны, к которому относят подземные воды хлоридно-натриевого типа верхнеюрских отложений Бухара-Каршинского артезианского бассейна (БКАБ), связанные с техногенными процессами эксплуатации нефтяных месторождений [1]. Минерализация в них достигает от 50 до 250 г/л, содержание урана – до 35 мкг/дм^3, что существенно превышает минимальное технологическое требование (>1,0 мкг/дм^3), водородный показатель pH=5-6.

Освоение минеральных ресурсов урана в мировом масштабе станет в ближайшие десятилетия важнейшим фактором в развитии ядерной энергетики, доля которой на глобальном энергетическом рынке к 2050 году возрастет до 13,7% (МАГАТЭ [2]). Между тем известно, что запасов урана в горнодобывающей промышленности хватит по крайней мере на 100 лет. Очевидно, что развитие ядерной энергетики зависит не только от разработок новых технологических стратегий для рационального использования имеющихся природных ресурсов, но и за счет расширения сырьевой базы урана.

В настоящее время ведутся поиск и исследования альтернативных источников урана, в том числе гидроминеральных ресурсов, номенклатура которых включает морскую, подземную пластовую, сточную воду, рассолы и др. При этом, помимо прочего, добыча урана из жидко-рудного сырья обещает стать безопасным для экологии и устойчивым источником

урана, дополняющим мировые рудные месторождения суши. Возможность воплощения такой перспективы в практику в значительной степени зависит от ионно-солевого состава гидроминерального сырья (ГМС), контролирующего образование и миграцию в воде растворимых комплексов урана (табл. 1).

Сегодня очевидно, что технология извлечения урана из подземной воды в промышленных количествах неоднозначно проще, чем из руды. Причина этой неоднозначности в том, что процессу образования водорастворимых форм урана – продуктов устойчивых химических реакций «вымывания» урана из горных пород – подвержены и другие микро- и макрокомпоненты горных пород, образуя рассол из суммы солей этих компонентов – минерализацию. Содержание её в подземной воде широко варьирует в зависимости от месторождения горной породы, из которой «вымывался» уран, или водоносного горизонта и в значительной степени влияет как на миграцию урана в этих водах, так и на показатели последующего технологического процесса извлечения урана из подземных вод [1]. Это, прежде всего, касается общей минерализации: так, например, повышенная минерализация подземной воды затрудняет извлечение урана из нее с применением традиционных сорбционных технологий на ионообменных смолах, что, по-видимому, связано с кинетическими особенностями конкурирующих сорбционных процессов для урана и ионов в составе «минерализации».

Таблица 1

Ионно-солевой состав пластовых вод БКАБ [2,3]

Макрокомпоненты	Микрокомпоненты
Это хлор, сульфат, бикарбонат, карбонат–анионы, а также катионы щелочных и щелочноземельных и др. металлов. Для подземных вод БКАБ характерен следующий состав (в г/дм^3): Cl-иона до 50, SO_4-иона 0,55, HCO_3-иона 0,24, NO_3-иона 0,22, Na до 59, Ca до 28, Mg 2,3, K 0,24. Это элементы, природные соединения которых хорошо растворимы в воде. Они определяют химический тип воды и ее главные свойства, в том числе, возможность регулировать миграции того или иного элемента. Формы нахождения урана в подземной воде мало зависят от основного катионного состава, но роль анионов при этом весьма существенна. В отдельных типах подземных вод характерно коллоидно-растворенное состояние диоксида кремния, гидратов оксидов железа и алюминия и др., а также соединения азота (нитраты, нитриты, аммиак и аммоний), растворенные углеводородные газы, углекислый газ.	Это элементы: I, Br, Li, Sr, F, B, Zn, Pb, Ni, Co, U, Th, драгоценные металлы и редкоземельные элементы и др., природные соединения которых растворимы плохо, из-за чего в природных водах их незначительное количество. Содержание урана в них варьирует в пределах 8,4-14,0 мкг/дм^3. По А.П. Виноградову, к микроэлементам в природных водах относят все элементы, среднее содержание которых составляет не более 10 мг/дм^3.

Изучение влияния примесей в составе минерализации подземной воды на сорбцию урана показывает, что при использовании сильноосновных анионитов, например, стирол-дивинил-бензольного типа марок Дауэкс-1и Дауэкс-2, сопутствующие урану примеси ведут себя по-разному: катионы щелочных и щелочноземельных металлов, а также ионы меди, железа, кобальта и марганца при этом не сорбируются и являются балластными примесями; в то же время ряд анионов, напротив, хорошо сорбируется на анионитах, составляя конкуренцию извлекаемым ионам урана. К ним относятся анионы сульфата, нитрата, хлорида, фторида и фосфата, которые относят к разряду депрессирующих примесей с повышенным сродством к сильноосновным анионитам, которые, накапливаясь со временем в анионитах, отравляют их, лишая способности поглощать полезные компоненты, в частности уран. Поэтому избыточное количество накопившихся солей выводят из процесса. В связи с этим является недопустимым содержание в водах нитрат-ионов в количествах более 0,1 мг-экв/л, хлорид- и фосфат-анионов – более 0,2 и 0,4 мг-экв/л соответственно.

Таким образом, изучение и знание общей минерализации жидко-рудного сырья, концентрации и формы нахождения микро- и макрокомпонентов в сырье и других гидрогеохимических свойств химических элементов, находящихся в подземных водах, являются базой, основанием и предпосылками для разработки инновационных технологий утилизации минерального сырья с учетом требований диверсификации такого проекта.

Проведенные в настоящее время гидрохимические исследования пластовых вод БКАБ показали возможность воплощения перспективы использования водных ресурсов в практику урандобывающей отрасли экономики. Развитие этой отрасли сформулировано в «Дорожной карте МАГАТЭ»: «Новые технологии должны сыграть важнейшую роль в создании устойчивых моделей производства урана».

Для развития технологических исследований извлечения урана из промышленных вод представляется важным учитывать следующие гидрохимические особенности пластовых вод:

1. В зоне интенсивного водообмена, где в подземных водах присутствует свободный кислород, уран окисляется до шестивалентной формы [U(VI)], соединения которой хорошо растворяются в воде.

2. Уран (VI) в виде уранил-иона (UO_2^{+2}) образует растворимые хлоридные химические комплексы состава [$Na_2(UO_2)Cl_4$)], которые в повышении концентрации урана при формировании подземных вод хлоридного типа играют решающую роль, имеющую значение в целенаправленном поиске технологического подхода, способного эффективно решать проблему извлечения урана из гидрохимического сырья.

3. В подземных водах также присутствуют, но в меньших концентрациях, плохорастворимые соли урановой или диурановой кислот (пероранаты Na_2UO_4 и $Na_2U_2O_7$), а также растворимые микрокомпоненты:

UO_2Cl_2, UCl_4, сульфатные, нитратные и гидрокарбонатные комплексы {$Na_2[UO_2(SO_4)_2]$, $Na_2[UO_2(NO_3)_4]$ и $Na_2[(UO_2)(HCO_3)_4]$}. Они препятствуют выпадению урана в осадок, чем облегчают его миграцию в подземных водах и играют положительную роль в реализации технологии извлечения его из воды сорбционным методом.

4.Отрицательную роль для миграции соединений урана в подземных водах играет присутствующий в воде сероводород, восстанавливающий уран до четырехвалентного состояния и способствующий его осаждению из раствора, вследствие чего вода в той или иной степени теряет «квалификацию» урансодержащего ресурса.

5. Процесс образования и стабильного существования водорастворимых форм урана U(VI) в воде и рассолах реализуется в гидрохимической среде за счет повышенного окислительно-восстановительного потенциала (Eh) среды, который контролирует, главным образом, кислород. При этом основным «тормозящим фактором» целевого действия кислорода является его низкая растворимость в воде в нормальных условиях. Между тем, вода зоны гипергенеза содержит значительные количества растворенного кислорода – его растворимость в воде в этой зоне достигает 10 мг/л, что создает Eh, достаточный для фиксации водорастворимого состояния урана, мигрирующего в воде.

6. Положительным обстоятельством для миграции водорастворимых форм урана в водах является также присутствие в подземных водах оксидного железа Fe(III) в количествах, превышающих закисное Fe(II).

Для извлечения урана из различного гидроминерального сырья (растворов, воды, рассолов) известны [4]:

1) Оксалатный метод осаждения, который реализуется по реакциям:

$UCl_4 + 2H_2C_2O_4 + 6H_2O \rightarrow U(C_2O_4)_2 \cdot 6H_2O\downarrow + 4HCl$ (1),

$UO_2Cl_2 + H_2C_2O_4 + 6H_2O \rightarrow UO_2C_2O_4 \cdot 6H_2O\downarrow + 2HCl$ (2).

При этом примеси микроэлементов Fe(III), Pb, Cd, Bi, Cu, Al образуют полностью растворимые, а Mn, Ni, Zn и Fe(II) – хорошо растворимые в воде соединения (соли).

2) Перекисный метод осаждения очень устойчивой перекиси урана (VIII):

$UO_2Cl_2 + H_2O_2 + 4H_2O \rightarrow UO_4 \cdot 4H_2O$

(осадок лимонно-желтого цвета) $+2HCl$ (3).

Эта реакция используется в аналитической химии как калориметрический реагент для количественного и качественного определения урана. Процесс осаждения проводят при температурах 45-60^{0}C и расходе 20-30%-ной перекиси 150-200% от стехиометрии реакции процесса. При этом с ураном соосаждаются нерастворимые перекиси Ti, Th, Hf, Zr, Ce(IV),Cu, Nb, Mo(VI). Этим методом достигается очистка осадка урана от Au, Ag, Li, Al, B, Mg, Mn, Na, Ni, Sb, Sn, Sr, Co, Be, Cd, Fe, P, V.

3) Метод высаливания: угле-аммонийная очистка обработкой раствора (воды, рассола) сухой солью карбоната аммония при

температурах 40-50 °С с последующим охлаждением до нормальной температуры, вызывающей обильное выделение кристаллического осадка:

$UO_2Cl_2 + 2(NH_4)_2CO_3 \rightarrow (NH_4)_4[UO_2(CO_3)_2\downarrow + 2Cl$ (4).

4) Электродиализ в технологии урана с применением полупроницаемых пленок из ионообменных смол с электрохимическими свойствами в виде мембран: различают мембраны катионитовые (пропускают катионы; марка МК-40 – натриевая форма на базе смолы КУ-2) и анионитовые (соответственно, пропускает анионы; марка МА-40 на базе смолы ЭДЭ-10П). Процесс осуществляют в двух- и более камерных электродиализаторах, корпус которых изготавливают из 100%-ного Pb или сплава (94% Pb+6% Sb), где роль катода («К») выполняет ртуть, а анода («А») – сама стенка устройства. Ионообменные мембраны (ИМ) в гидрометаллургии урана применяют для нейтрализации кислых и содовых растворов и для реализации восстановительного процесса: $U^{+6} \rightarrow U^{+4}$. Метод осуществляется следующим образом: исследуемый раствор (вода, рассол) с уранилом UO_2Cl_2 и стехиометрическим количеством HF, NH_4F помещают в катодную камеру электродиализатора, где благодаря ИМ создаются восстановительные и окислительные условия. Эти условия препятствуют выделению хлора и фтора на «А», а на «К» катодной камеры происходит осаждение урана:

$(UO_2)^{2-} + 4H^+ + 2e \rightarrow U^{+4} + 2H_2O$ (5),

$U^{+4} + 4F^- \rightarrow UF_4\downarrow$ (6).

В зависимости от температуры проведения процесса образуются различные гидратные формы осадка: при 60^0С $UF_4 \cdot H_2O$; при 90-100 °С – $UF_4 \cdot 3/4H_2O$. Выход урана при токе 2 А/дм^2 составляет 90-95% от исходной загрузки.

5) Метод нейтрализации растворов до pH = 5,8:

$2UO_2Cl_2 + 2NH_4OH + H_2O \rightarrow (NH_4)_2U_2O_7\downarrow + 4HCl$ (7).

При указанном pH метод позволяет практически полностью осаждать из водных сред Fe, Ti, P, Th и U. При этом редкоземельные элементы и хлор-ион остаются в маточном растворе.

6) Метод экстракции урана 5%-м раствором трибутилфосфата (ТБФ) в ксилоле (разбавителе) $C_6H_4(CH_3)_2$ в присутствии высаливателя карбоната аммония или 33% ТБФ в уайт-спирте при соотношении О:В =2,5-5,0:1; десорбция обработкой органической фазы (ОФ) деминерализованной, слегка подкисленной (0,2н HNO_3), водой.

7) Метод адсорбции урана с использованием полиэтиленовых волокон, получаемых из обычного пластика и покрытых амидоксимом [2]. Метод применяют для адсорбции диоксида урана (UO_2) из различного гидроминерального сырья. Методика заключается в следующем: волокна погружают в воду, где содержание урана около 3,0 мг/м^3, примерно на месяц, затем для отделения урана обрабатывают их кислотой, после чего волокна могут использоваться повторно. Хотя этот метод разрабатывается уже не первое десятилетие, пока его коммерческое применение не кажется

рентабельным из-за низкой стоимости урана, а также больших запасов его в обычных рудниках. За последние пять лет стоимость добычи урана из морской воды снизилась в четыре раза и составила 440 долл. США за килограмм. Однако, чтобы этот метод начал применяться в промышленном масштабе, цена должна опуститься существенно ниже.

8) Из методов сорбции урана из водных ресурсов практическое значение имеет способ поглощения уранил-сульфатных комплексов на стирол-дивинил-бензольных анионитах триметил-аммониевого типа [5,6]. Для десорбции урана используют при этом растворы 10-15%-ной серной кислоты. Емкость анионитов указанного типа по U_3O_8 в реальных условиях может достигать 8-15 мг/мл сорбента. Она зависит от концентрации урана, которая в подземных водах и рассолах может изменяться в широких пределах, и количества балластных, депрессирующих и стимулирующих примесей. Показано, что при равновесной концентрации урана в рассоле 1 г/дм^3 максимальное поглощение урана наблюдается в области pH=2-3,5.

Показано также, что кинетика сорбции крупных по размеру ионов уранил-сульфатных комплексов из растворов с содержанием 1 г/л U_3O_8 и 5% $MgSO_4$ на примере анионита Амберлит ИРА-400 в хлороформе имеет специфическую особенность – насыщение ионита из-за пространственных затруднений растягивается до 7 суток. Очевидно, такие ионы необходимо сорбировать на анионитах пористой структуры.

9) В урановой гидрометаллургии получили распространение способы десорбции, которые обеспечивают регенерацию сорбента и удаление ценного компонента из ионита с восстановлением его свойств. Известны случаи, когда оба эти процесса протекают и завершаются одновременно. При этом после десорбции получают ионит в солевой форме, пригодный для использования в процессе сорбции.

Примерами эффективной десорбции комплексных уранил-сульфатных ионов являются использование серной кислоты, нитратов, хлоридов и водно-органических элюентов:

- при пропускании элюента состава 0,9М NaCl+0,1М HCI через слой насыщенного ураном анионита со скоростью 8,4 см/мин в регенератах вначале появляются сульфат-ионы, а затем уран;
- минимальный выход регенерата достигается при использовании хлорида аммония;
- выход регенерата увеличивается в 1,5 и 2 раза при использовании в качестве элюентов хлоридов натрия и магния;
- аналогичным образом протекает процесс нитратной конверсии уранилового комплекса, отличительной чертой которого является отсутствие урана в растворах после обработки анионита конвертирующим раствором б-8 М азотной кислоты или ее солей;
- водно-органические элюенты – смеси ацетона, соляной кислоты и воды – обеспечивают раздельную десорбцию урана и тория с катионита КУ-2; наиболее полное разделение урана и тория осуществляют при

содержании в элюенте 90% ацетона, 5% соляной кислоты и 5% воды; при фильтровании такого элюента через слой катионита КУ-2 в смешанной уранил-ториевой форме вначале десорбируется уран, а затем со значительным разрывом на выходе из колонны появляется торий.

Традиционные схемы утилизации бедных по содержанию урана растворов не отличаются высокой надежностью и эффективностью для полноты его извлечения. Это в полной мере относится к урану в подземных водах БКАБ Узбекистана. В этой связи возникла необходимость нововведений в эту отрасль промышленности: разработки технологий и аппаратов нового поколения, обладающих возможностями решения проблем эффективной очистки подземных и сточных вод для возобновления водных ресурсов не только для населения, но и нужд промышленности, а также выделения ценных компонентов.

В связи с этим большие перспективы в области очистки и обеззараживания сточных промышленных вод открывает применение **кавитационно-электромагнитного воздействия** (процесс КЭМВ) [**7**], на базе которого построена следующая технология (рис. 1).

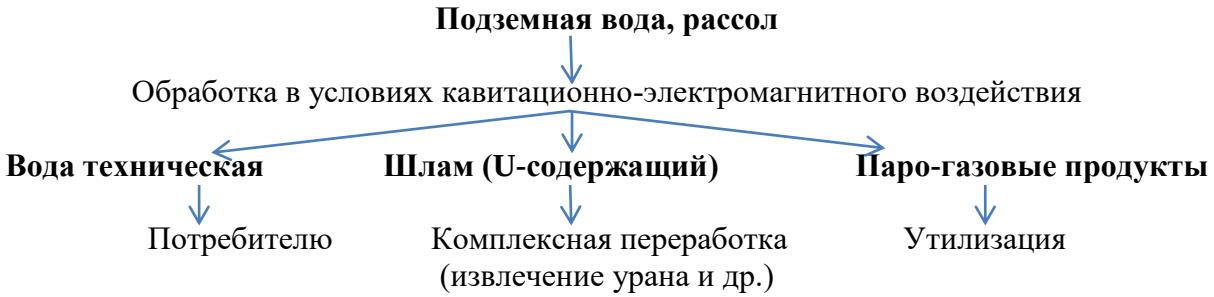


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема осуществления процесса КЭМВ

Известны конструкции для очистки и обеззараживания воды, которые основаны на различных ультразвуковых колебаниях, действии электромагнитного поля, СВЧ-излучения, монохроматического излучения, турбулентном течении жидкости. Всем им присущи общие недостатки: конструктивная сложность и металлоемкость в изготовлении, опасность при эксплуатации для человека, так как корпус и катушки в этих конструкциях выполняют роль токоподводящих элементов. Все они предназначены для очистки промышленных стоков, содержащих остатки нефтепродуктов, и не обеззараживают воду.

Предлагаемое устройство повышает эффективность очистки и обеззараживания воды конструктивно проще, является энергосберегающим и работает без применения каких-либо химических реагентов. Устройство содержит импульсный источник питания, корпус которого выполнен в виде горизонтально установленной трубы из диэлектрического материала, на входе которой установлена сужающая диафрагма, инициирующая кавитацию воды. На корпусе предусмотрены патрубки для ввода и отвода воды, а также отвода озонсодержащего газа.

Процесс очистки воды на установке осуществляется следующим образом: поток минерализованной (жесткой) воды, подаваемый в устройство насосами, перед диафрагмой сжимается и под большим давлением вызывает образование в воде, вокруг растворенных в ней микрочастиц воздуха, каверн – зародышей, которые после диафрагмы, в результате резкого расширения потока воды, растут в размерах. Достигнув критического размера, они разрываются (схлопываются), вызывая при этом мощные ударные и ультразвуковые волны. В результате происходит кавитация, вызывающая сильное колебательное возбуждение молекул воды, которое в свою очередь вызывает усиление экзотермических реакций в водной среде, в результате чего в воде накапливаются активные продукты распада молекул воды: водород-катион, гидроксил-анион, элементные водород, кислород, озон, пероксид водорода и др.

Для сохранения и усиления этого состояния воды воздействуют электромагнитными волнами. Для этого подают напряжение на обмотки ЭМ-катушек. Напряжение регулируют блоком управления в зависимости от pH и жесткости (минерализации) воды. ЭМ-волны придают воде продольно-вращательное движение. При этом происходит значительная колебательная накачка воды. Активные продукты этой накачки взаимодействуют с примесями, находящимися в воде, в результате чего происходят процессы окислительно-гидролитического характера: окисление железа с образованием Fe_2O_3, алюминия – Al_2O_3, кальция – $Ca(OH)_2$, редкоземельных элементов, урана и др. с образованием гидратно-солевых соединений. Продуктами этих процессов являются очищенная вода, шлам, который можно квалифицировать как концентрат ценных элементов, в том числе урана, который удаляется через специальные отводы и гидравлические затворы, а также паро-газовые продукты (продукты разложения нефтепродуктов, хлор и др.).

Шлам является сырьем для металлургической переработки с целью извлечения содержащихся в нем ценных компонентов.

Обеззараживание воды в этом процессе происходит благодаря образующемуся в процессе озону, который губительно действует на микробов, а образующаяся парогазовая смесь удаляется из устройства через газоотводящую камеру.

Перспективным технологическим решением для извлечения металлоносной части подземных вод является метод с использованием **энергии вращающихся электромагнитных полей высокой напряженности** с помощью аппаратов вихревого слоя (АВС) [8]. Установка АВС состоит из рабочей зоны, содержащей ферромагнитные частицы-иголки, и индуктора, с помощью которого наводится электромагнитное поле с высокой удельной мощностью. Рабочая зона аппарата представляет собой гладкую трубу, внутри которой индуктором наводится вращающееся электромагнитное поле, которое превращает иголки в магниты (диполи). Попадая в рабочее пространство, в котором возбуждено электромагнитное

поле, иголки начинают вращаться, соударяться друг с другом, со стенками рабочей зоны и частицами сырья, вызывая при этом в рабочей зоне аппарата акустические волны, а в случае присутствия жидкости – кавитацию (процесс образования и схлопывания пузырьков газов, которые выделяются из жидкости или вносятся извне) [9]. Кавитация вызывает мощные ударные и ультразвуковые волны, благодаря которым в рабочей зоне аппарата проходят такие процессы, как окисление и восстановление ряда соединений; осаждение металлов из раствора в виде гидроксидов; частичное разложение воды (ионизация); разложение (частичное) органических соединений, имеющих сложные, многоатомные молекулы; обеззараживание воды. Кроме этого, каждая иголка при своем движении непрерывно излучает сильные импульсы большой разрушающей силы, которые возникают при перемагничивании иголок, вызывающего явление магнитострикции [10], когда возникает силовой импульс, действующий на малом расстоянии от поверхности иголки. Указанные эффекты обеспечивают глубокие изменения в структуре вещества, в том числе и на уровне валентных оболочек атомов (переход электронов на иные уровни). Причем их ход осуществляется при нормальной температуре и давлении.

Совмещение в одном рабочем пространстве действий всех перечисленных факторов одновременно в сотни и тысячи раз ускоряет практически все физико-химические и механо-физические реакции в ходе технологического процесса, производительность которого увеличивается во столько же раз. В рабочей зоне АВС растворение многих материалов в воде идет значительно быстрее, чем в обычных реакторах с мешалкой и подогревом [8].

Достоинствами технологии с использованием АВС по сравнению с технологиями того же назначения являются: производительность процесса в несколько раз больше, потребление энергии в несколько раз меньше, материалоемкость и габариты также в несколько раз меньше. Аппарат может быть использован для очистки промстоков любого состава, для обезвреживания всех видов стоков металлургических производств, отвечает современным требованиям в области охраны окружающей среды и ресурсосбережения. Аппарат можно настроить для данного технологического процесса на эффективную адресную работу, управлять и контролировать, изменяя конструктивные, технические, технологические параметры, например, для селективного извлечения урана из гидроминерального сырья.

Предварительная оценка метода с использованием АВС позволяет сделать вывод о возможности получения из 1 м^3 воды БКАБ с минерализацией 55,0 кг концентрата урана в виде шлама сухой массы 3,3 кг, содержащего 35 мг урана с концентрацией урана 10,6 г/т в виде предположительно оксида $UO_4 \cdot (2\text{-}4)H_2O$ (гидратированного) (рис. 2).

Последующая переработка шлама с целью извлечения урана предполагается по технологической схеме (рис. 3), где растворение урана

осуществляют по азотнокислой, а селективное осаждение урана по оксалатной схемам:

$UO_4 + 2HNO_3 \rightarrow UO_2(NO_3)_2 + H_2O_2$ (8),

$UO_2(NO_3)_2 + H_2C_2O_4 + 6H_2O \rightarrow UO_2C_2O_4 \cdot 6H_2O\downarrow + 2HNO_3$ (9).

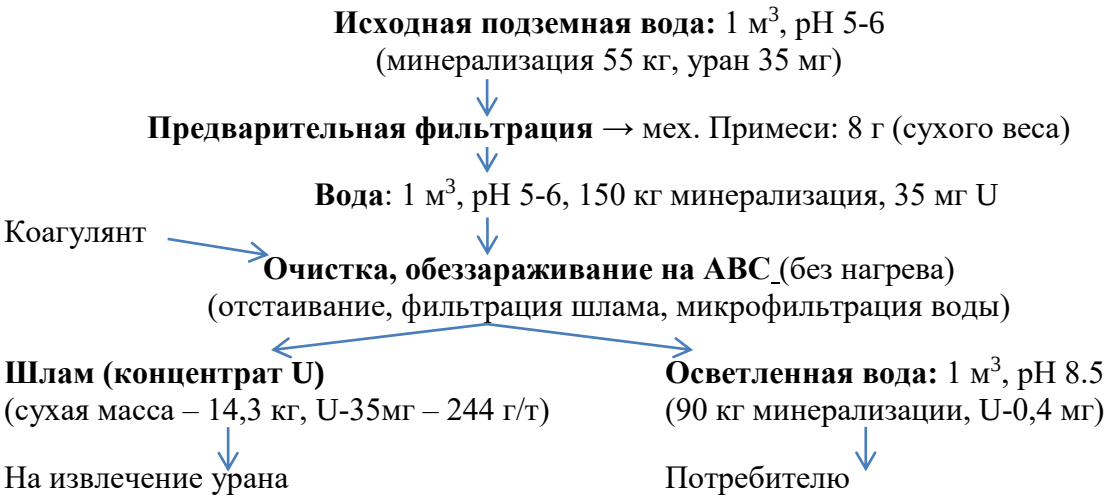


Рис. 2. Принципиальная технологическая схема получения концентрата урана из подземных вод БКАБ с использованием АВС

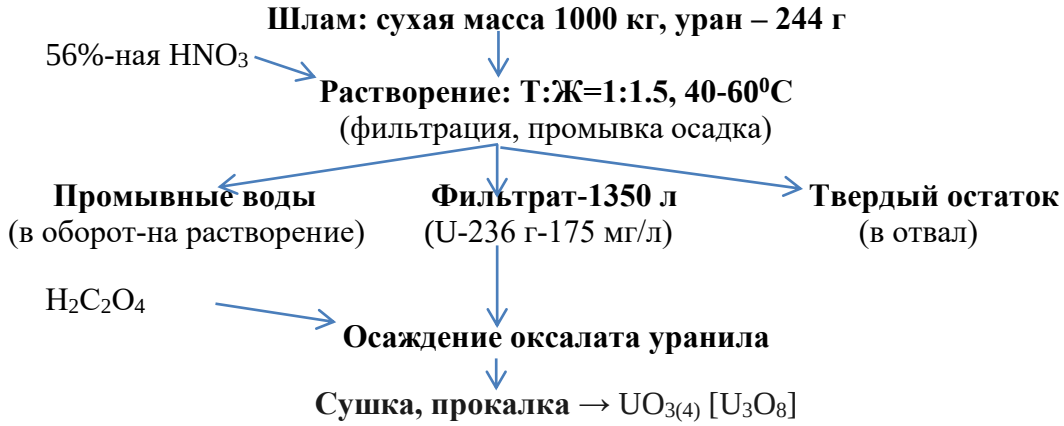


Рис. 3. Принципиальная технологическая схема извлечения урана из шлама

Оксалатный метод основан на том, что оксалаты основных цветных и редких примесных элементов хорошо растворимы, а урана, тория и церия нет. Метод осуществляется при избытке оксалата 115-130% от стехиометрии при 80-90 °С путем перемешивания смеси в течение 2-5 часов. Осаждению урана мешают анионы-лиганды (F^-, CO_3^{2-}, SO_4^{2-}, PO_4^{3-}, органические кислоты), а катионы Na^+, K^+ и NH_4^+ образуют с уранил-ионом двойные комплексные оксалаты. Для перечистки оксалата уранила осуществляют обработку:

$UO_2C_2O_4 + 2(NH_4)_2C_2O_4 \rightarrow (NH_4)_4[UO_2(C_2O_4)_3]$ (10),

$(NH_4)_4[UO_2(C_2O_4)_3] + 4HNO_3 \rightarrow$

$UO_2C_2O_4\downarrow + 2H_2C_2O_4 + 4NH_4NO_3$ (11),

$2UO_2C_2O_4 + 6NH_4OH \rightarrow (NH_4)_2U_2O_7 + 2(NH_4)_2C_2O_4 + 3H_2O$ (12).

Заключение

1. В создании устойчивых моделей производства урана не менее важным, чем эффективное и рациональное использование технологических решений, является наличие надежного источника урана. В мире и в Узбекистане в том числе, в этой связи возрос интерес к использованию гидроминерального металлоносного сырья (ГМС) потому, что, например, в морской воде содержится больше урана, чем во всех месторождениях на суше вместе взятых, однако его извлечение в настоящее время нерентабельно. Подземные воды Бухара-Каршинского региона Узбекистана содержат промышленно значимые содержания урана, существенно превышающие минимальное технологическое требование.

2. Рассматривается ряд специальных вопросов, связанных с миграцией урана в подземных водах и влиянием ионо-солевого состава минерализации, сопутствующего урану и оказывающего существенное влияние на показатели технологической схемы утилизации таких схем.

3. Одно из преимуществ ГМС как минерального ресурса урана заключается в том, что при использовании этого сырья отпадает необходимость строительства дорогостоящих рудников или карьеров, расходования многих материалов и пр.

4. Разработка ГМС традиционными гидрометаллургическими способами извлечения урана экономически невыгодна потому, что они не отличаются высокой надежностью и эффективностью для полноты его извлечения. Это в полной мере относится к урану в подземных водах БКАБ Узбекистана. В этой связи возникла необходимость нововведений в эту отрасль промышленности: разработки технологий и аппаратов нового поколения, обладающих возможностями решения проблем эффективной очистки подземных и сточных вод для возобновления водных ресурсов не только для населения, но и нужд промышленности, а также выделения ценных компонентов. В этом направлении перспективно развитие направления с применением кавитационно-электромагнитного воздействия, метода с использованием энергии вращающихся электромагнитных полей высокой напряженности с помощью аппаратов вихревого слоя и др., достоинство и преимущество которых, в сравнении с традиционными технологиями, в исключении использования каких-либо химических реагентов, простоте аппаратурного оформления, энергосбережении.

Литература

1. Ершов А.Д. Эволюция условий образования и вещественного состава руд гидротермальных месторождений урана в ходе развития земной коры // Ж-л «Советская Геология». – М.: 1976, С. 38-43.

2. БЮЛЛЕТЕНЬ МАГАТЭ, Июнь 2018/25 (интернет-ресурс).

3. Бакиев С.А., Мираходжаев Б.И. Перспективы изучения урана в попутных водах нефтяных месторождений // Журнал «Геология и минеральные ресурсы». – Ташкент: № 3/2009, С. 33-34.

4. Галицкая И.А. Курс лекций: Химия и технология урана / Технологический институт им. Ленсовета. V инженерный физико-химический факультет. – Ленинград: 1971 г.

5. Блинов А.В. и др. Способ извлечения микроконцентраций урана из водных растворов / Патент № 2 591 956 (РФ, 2014).

6. Зелинская Е.В., Воронина Е.Ю., Вершинина В.П. Свойства подземных вод и технология их утилизации // Фундаментальные исследования. 2006. № 10. С. 75-76. URL: http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=5499 (дата обращения: 15.06.2020).

7. Колесников И.К. Развитие теории и разработка энергосберегающих технологий на основе единого электромагнитного поля // Автореф. дисс. д.т.н. (05.05.01 – Энергетические системы и комплексы) – Ташкент-2020. 58 с.

8. И.В. Паньшин к.в.н, А.П. Демин (ГУ МЧС России по Нижегородской области), С.А. Марков (ПРО ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ)), Л.К. Прейс (ЗАО «Минибот»). Очистка бытовых и промышленных сточных вод с использованием переменного электромагнитного поля // Технологии гражданской безопасности. Научно-техн. разработки: Федеральный центр науки и высоких технологий «Всероссийский НИИ по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций». – М.: 2004, с.193-197.

9. Логвиненко Д.Д., Шеляков О.П. Интенсификация технологических процессов в аппарате вихревого слоя. – Киев: «Техника», 1976.

10. Преображенский А.А., Блишард Е.М. Магнитные материалы и элементы. – М.: «Наука», 1986. 186 с.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ДООЦЕНКИ ПРОДУКТИВНОСТИ УРАНОНОСНЫХ БЛОКОВ В УСЛОВИЯХ ОТРАБОТКИ МЕТОДОМ ПСВ НА ОБЪЕКТАХ ШУ-САРЫСУЙСКОЙ УРАНОВОРУДНОЙ ПРОВИНЦИИ

Е.Ш. Бейсекеев, Е.Г. Язиков
ТПУ, г. Томск

Введение

Преобладающим и наиболее передовым способом разработки гидрогенных урановорудных месторождений на современном этапе является подземное скважинное выщелачивание, позволяющие свести к минимуму экологические и экономические риски в процессе добычи. Особенно важно, что подземное скважинное выщелачивание позволяет осуществлять добычу в сложных морфолитологических и гидрологических условиях, а также повышает эффективность рудоизвлечения в условиях бедного и рядового оруденения.

В то же время подземное скважинное выщелачивание подразумевает искусственное повышение проницаемости пород в пределах зоны пластового окисления, которая на большинстве гидрогенных месторождений контролируется течением пластовых вод. В этой связи в толщах высокопроницаемых рудовмещающих пород создаются условия для массопереноса растворенного в технологических растворах урана, его миграции в пластовые воды, а также формирования регенерированных (вторичных) залежей. Формирование данных условий несет в себе как экологические риски, так и экономические, так как существенно осложняет процесс оценки запасов и процента выработки по отдельным блокам, создает предпосылки для неравномерного рудоизвлечения и увеличения себестоимости процесса добычи.

Соответственно существуют также и геофизические факторы, благоприятствующие формированию регенерированных рудоносных тел. Так, основополагающими факторами, обеспечивающими интенсивность массопереноса, являются как физико-механические, так и петро-физико-химические свойства рудовмещающих пород.

Результаты исследования

В совокупности своего влияния геофизические факторы наряду с гидродинамическим (как техногенным, так и естественным) фактором оказываются подчас существенным препятствием в достижении точности дооценки извлекаемых запасов по следующим причинам:

- осложняются технологические возможности получения достоверной и полной картины по данным различных геофизических методов, имеющих, как известно, определенные ограничения касательно гидродинамических, термобарических и физических условий;

- интенсифицируется процесс вторичного (техногенного) рудогенеза, что способствует появлению останцевых областей оруденения, недифференцированных мониторинговыми мероприятиями в зонах, не охваченных геофизическими исследованиями;

- осложняется оценка границ растекания продуктивных растворов, и как следствие -продуктивные мощности могут быть занижены, что особенно актуально в условиях слоистых сред [1,2].

В числе наиболее существенных физико-механических факторов, оказывающих влияние на результативность дооценки извлекаемых урановых запасов, следует особо выделить проницаемость и пористость, ее тип и структурно-текстурные качества.

Петро-физико-химические свойства во многом определяют вышеназванные физико-механические показатели, особенно в условиях интенсивного изменения в процессе отработки. При воздействии сложнокомпонентных высококонцентрированных растворов, под давлением и высокой температуре, происходит интенсивное изменение текстурных качеств и физико-химических свойств околорудных пород. При этом процесс рудоизвлечения способом ПСВ является непрерывным, и периодичность проведения доразведочных мероприятий посредством комплекса геофизических исследований подчас не может обеспечить достаточно детализированную картину происходящих в рудоносных и рудовмещающих слоях изменений [3].

Соответственно гидрологическая и геофизическая осложненность месторождения предполагает и сложность прогнозирования дальнейших возможных изменений на основе данных, полученных на этапе разведывательных мероприятий и ввода в эксплуатацию технологических блоков. С одной стороны, лабораторные данные по физико-химическим свойствам образцов по керну не в полной мере отражают деформационные возможности пород, пересеченных скважиной. С другой стороны, данные полученные методами геофизического исследования, во многих случаях (особенно в условиях морфологической осложненности) дают лишь частные и текущие представления о свойстве пород коллектора с поправкой на неточность, возникающую в результате гидродинамических и термобарических помех [4].

Особое значение приобретает учет гидродинамических и геофизических факторов на месторождениях, характеризующихся наличием разнопроницаемых пород и морфологических осложнений – в частности, присутствием углефицированной органики, глинистых линз, участков цементации.

Обозначенные осложняющие условия имеют место на месторождении Инкай Шу-Сарысуйской урановорудной провинции. В настоящее время доразведка и дооценка запасов на данном месторождении является важным условием поддержания промышленной рентабельности. Оруденение месторождения Инкай относится к богатому

по принятым в Республике Казахстан кондициям. Тем не менее, активное освоение месторождения в условиях многоаспектной осложненности требует взвешенного подхода к оценке имеющихся запасов, как в выщелачиваемых пластах на остаточность, так и в рудовмещающих породах (на выявления факта массопереноса и образования регенераций оруденения), что существенно отодвинет горизонт истощения и позволит повысить рентабельность эксплуатации технических блоков.

Это предопределило научно-прикладной интерес к изучению специфики гидродинамических и геофизических факторов дооценки на месторождении.

Месторождение Инкай находится на юге-западе Шу-Сарысуйской урановорудной провинции, оруденение приурочено к кайнозойско-мезозойской депрессионной структуре и сформировано в меловом инкудукском горизонте. В целом морфолитологическая и гидрологическая картины на месторождении Инкай типичны для месторождений пластово-инфильтрационного типа.

Гидрогеологическое строение рудоносного горизонта на участках месторождения определено расположением на территории Шу-Сарысу одноименного артезианского бассейна и характеризуется глеевым типом редукционного барьера, высоконапорным движением пластовых вод, слабовыраженными водоупорами, относительно высокой водообильностью и водопроводностью материалов рудовмещающего тела продуктивного горизонта.

Морфологические особенности месторождения в пределах рудоносного горизонта предопределены выклиниванием зон пластового окисления по направлению течения пластовых вод.

Морфология рудоносных тел характеризуется лентообразными, зачастую вертикально-складчатыми изгибами рудной породы, существенным разбросом промышленно продуктивной толщи. Литологическая картина месторождения характеризуется фациальной неоднородностью и цикличностью, с преобладанием гравийно-галечного материала верхнего яруса, затем прослоями разнозернистых песков и мелкозернистым песчаником с включением глинистых линз на нижнем ярусе.

Петрофизические свойства рудовмещающей породы определены литологической и морфологической осложненностью, проистекающей из поэтапного породообразования с влиянием гидрологической обстановки на осадконакопление и, как следствие – на рудогенез. Преимущественно сероцветные пески и глины изобилуют углефицированной органикой. Нерастворимые минералы преобладают в долевом соотношении 87-89% и представлены преимущественно кварцем и кремнистыми обломочными материалами, труднорастворимые – полевым шпатом и менее значимыми в весовом отношении каолинитом, монтмориллонитом и др. Растворимые минералы представлены лимонитом, карбонатами, сульфидами и

урановыми коффинитом и настураном. Урановые минералы дислоцированы в поровом пространстве [5,6].

Проницаемые и обводненные прослои чередуются с небольшими по мощности слабопроницаемыми и участками цементации в пределах рудного тела, что существенно осложняет получение достоверной картины по данным геофизических исследований и затрудняет прогнозирование техногенного преобразования структурно-текстурных свойств вмещающих пород (рис. 1).

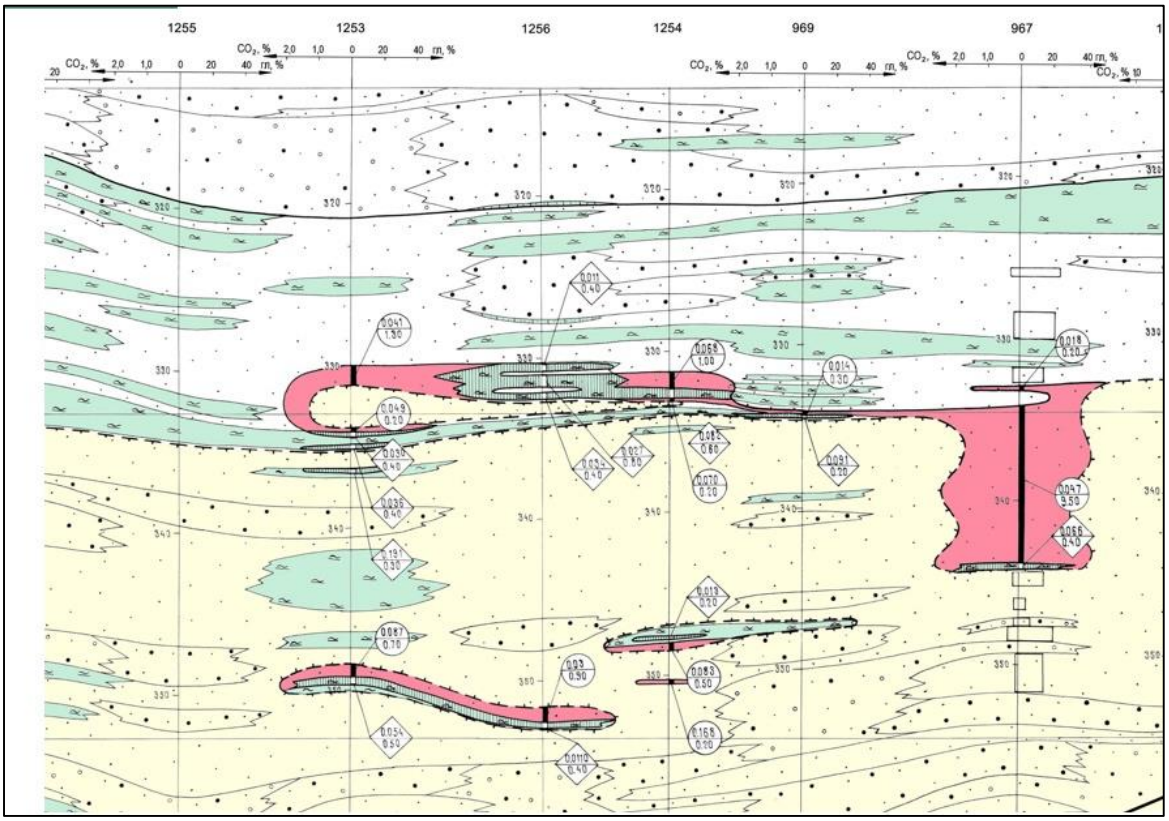


Рис. 1. Литолого-фациальная обстановка на одном из разрабатываемых участков месторождения Инкай

Рудное тело
~ Илистые глины
. Пески средне-мелкозернистые
. . . Пески разнозернистые
| Забой скважины

**Примечание:* по данным комплекса геофизического обследования месторождения Инкай

Приведенная выше литолого-фациальная картина в целом иллюстрирует характерные особенности по месторождению Инкай. Обращает на себя внимание наличие оруденения в окаймлении глинистых линз, что указывает на возможный вторичный генезис вследствие массопереноса.

В 2018-2019 годах были проведены геофизические изыскания для получения информации о строении рудовмещающих и рудоносных толщ, а также наличия неохваченных эксплуатацией областей оруденения [7].

Задача дооценки на основании полученных данных оказалась осложнена следующими факторами:

1. Наличием гидродинамического фактора, т.е. продолжающегося влияния напорных пластовых вод на процесс рудообразования, а также интенсификации данного фактора в условиях гидродинамического режима технологического процесса выщелачивания. Это осложняет дифференцировку картины оруденения и отслеживание динамики массопереноса ввиду слабовыраженного окислительно-восстановительного барьера;
2. Необходимостью корреляции нескольких методов геофизического исследования скважинного пространства ввиду ограничивающих информативность термобарических, гидродинамических и геофизических факторов;
3. Недостаточностью данных по временным рядам, что не позволяет отследить динамику рудопреобразования ввиду технологической сложности и высоких затрат на проведение регулярного геофизического исследования в условиях негативного тренда цены на уран.

Ниже проиллюстрирован пример влияния осложняющих факторов на информативность комплекса геофизических методов исследования, выраженный в недостаточности и нерелевантности данных на некоторых интервалах ввиду гидродинамических и геофизических ограничений (рис. 2).

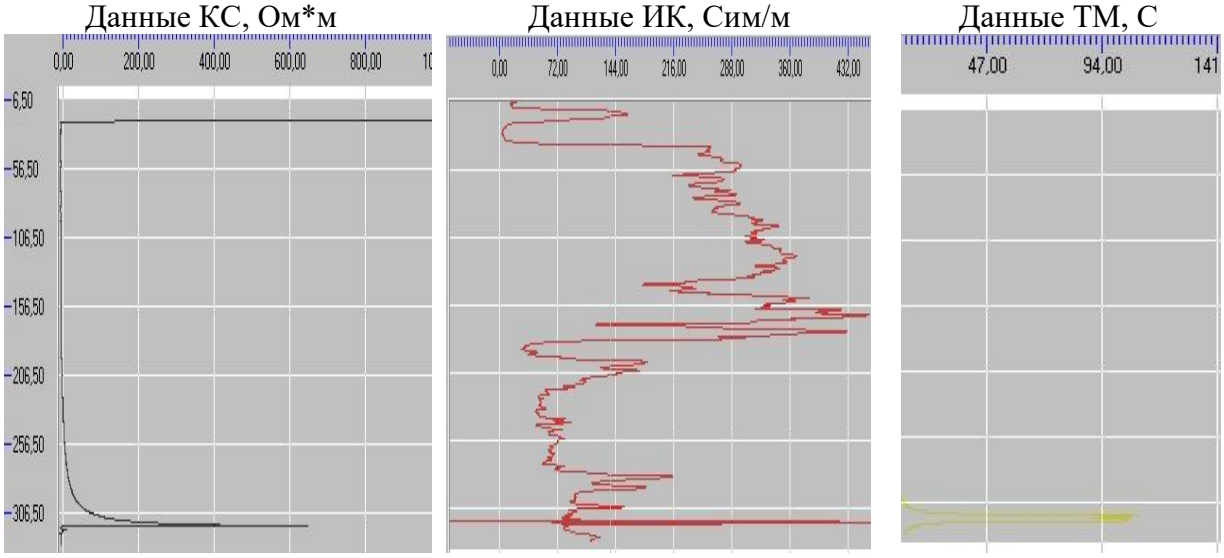


Рис. 2. Сводные данные по результатам произведенного геофизического обследования по одной из скважин месторождения Инкай

**Примечание:* по данным комплекса геофизического обследования месторождения Инкай

По результатам произведенного исследования были выявлены некоторые гидродинамические и геофизические особенности, снижающие степень адекватности дооценочных расчетов (табл. 1).

Таблица 1

Выявленные закономерные гидродинамические и геофизические параметры (средние по технологическим блокам месторождения Инкай)

Показатели	Значение
Диапазон УЭП, Сим/м	От 2 до 600
Диапазон УЭС Ом*м	От 2 до 3200
Температурный режим, °С	От 17 до 53
Диаметр скважины, См	От 60 до 228
Открытость отстойника	50% при норме 70% согласно технической спецификации АО НАК КазАтомпром [8]
Скорость фильтрации, м/сут	Средняя – 0,22 Наибольшая – 0,23 Наименьшая – 0,17

**Примечание:* по данным комплекса геофизического обследования месторождения Инкай

Вышеназванные усредненные параметры указывают на существенный разброс по показателям, обусловленным гидродинамическими и геофизическими факторами.

Тем не менее, результаты произведенного масштабного и комплексного геофизического исследования выявили следующие закономерности влияния гидродинамических и геофизических факторов на точность дооценки:

1. Ступенчатообразное увеличение кажущейся удельной электропроводности свидетельствует о глинистых слабообводненных прослоях в нижней границе водоупора, что предполагает увеличение гидродинамического давления на данных участках. В свою очередь, данное обстоятельство формирует очаги останцевых зон оруденения, а также «слепых» зон, неохваченных процессом выщелачивания;

2. Обозначенное влияние гидродинамического режима в силу высокой проницаемости рудоносных песков способствует интенсификации массопереноса в порово-трещиноватой структуре рудовмещающих толщ, как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении. Этот фактор указывает на высокую вероятность возникновения регенеративных зон оруденения как в законтурных интервалах технологических блоков, так и в области фильтров скважинных комплексов;

3. Наличие выявленных колец цементации с одновременным, пусть и незначительным, снижением фильтрационных свойств свидетельствует о процессе кольматации. Этот аспект, во-первых, предполагает риск снижения коэффициента рудоизвлечения и соответственно, формирования потенциально невыработанных и сложно извлекаемых участков. Во-

вторых, снижение фильтрационных свойств коллектора увеличивает гидравлическое сопротивление, снижая смачиваемость рудовмещающей породы и соответственно – снижает эффективность процесса добычи.

4. Увеличение гидравлического сопротивления технологического раствора снижает эффективность проведения электромагнитных методов геофизического исследования скважин, что в целом негативно влияет на осведомленность о картине и динамике процессов рудоизвлечения и рудообразования, которые, очевидно, в условиях гидрогенных месторождений пластово-инфильтрационного типа находятся в постоянной и непрерывной взаимосвязи и оказывают непосредственное влияние на промышленный дебит по скважинному комплексу;

5. В процессе выщелачивания выравнивается значение сопротивления пород с различной проницаемостью под воздействием окислительно-восстановительных процессов, что в усилиях высокодифференцированной петрофизической картины, в особенности замещения высокопроницаемых пород слабо- и непроницаемыми (см. рис. 1) затрудняет дальнейшую оценку фактических мощностей отрабатываемого блока и характера растекания растворов. Соответственно затрудняется подсчет фактических кондиционных запасов.

Обозначенные выше особенности влияния гидродинамического и геофизического аспектов существенно затрудняют дооценку залежей и увеличивают эксплуатационные расходы.

С учетом особенностей геофизических и гидродинамических условий отработки технологических блоков на месторождении Инкай следует предположить, что области растекания технологических растворов являются потенциальными областями вторичного техногенного рудогенеза, что требует соответствующих мероприятий по оперативному текущему мониторингу гидродинамического режима скважинного фонда с учетом литологических, морфологических и геофизических особенностей.

Заключение

Таким образом, в условиях отработки урановорудных запасов на гидрогенных месторождениях методом ПСВ геофизические и гидродинамические факторы оказывают непосредственное влияние на достоверность дооценочных подсчетов.

Преобладающее влияние литологической и морфологической осложненности на месторождениях пластово-инфильтрационного типа, интенсивность влияния пластовых напорных вод и гидродинамического режима эксплуатации скважинной системы предполагает учет данных аспектов при проведении доразведовательных и дооценочных работ.

Такие факторы, как влияние технологического раствора на изменение проницаемости пород, кольматационные процессы снижают не только точность дифференцировки высокослоистых литологически осложненных сред, но как показывает опыт на месторождении Инкай,

способствуют формированию неохваченных процессом выщелачивания объемов рудного материала, причем кондиционного качества.

Оказывая ограничивающее воздействие на достоверность данных стандартных методов геофизического исследования, петрофизическая и морфологическая осложненность создают предпосылки для формирования «слепых зон», применительно к которым достоверное выявление границ растекания технологических растворов маловероятно.

Опыт дооценки запасов на месторождении Инкай, отличающегося разнообразием геофизических и гидродинамических факторов осложненности процесса добычи, указывает на то, что потенциально перспективный фронт работ по дооценке с высокой вероятностью лежит в области выявления как останцовых, так и вторично регенерированных оруденений. При этом показанием к проведению дооценочных работ может служить наличие линзообразных глинистых прослоев по ходу течения пластовых вод, хорошо проницаемых и водонасыщенных слоев ниже интервала закисления по вектору движения технологических растворов, порово-трещинная структура рудовмещающей породы.

Литература

1. Носков М.Д., Истомин А.Д., Кеслер А.Г., Чеглоков А.А., Гуцул М.В., Сакирко Е.Г. Интеллектуальная технология управления разработкой месторождений урана методом подземного скважинного выщелачивания (ПСВ) // МНПК «Актуальные проблемы урановой промышленности». Астана. – 2017. – С.102-105.

2. Добыча урана методом полземеного выщелачивания / Кол.авторов под общ.ред. В.А. Мамилова. М.: Атомиздат. – 1980. – 248 с.

3. Язиков В.Г Особенности проведения геофизических исследований в скважинах при изучении и освоении инфильтрационных (гидрогенных) месторождений урана: учебное пособие В.Г. Язиков / А.В. Легавко. Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012.-95 с.

4. Ратников И.Б., Шульга Р.С., Романов Е.А., Бастриков С.Н. Анализ параметра пористости с привлечением элементов региональной петрофизики (электрофаций) и типа глинистости // Свойства горных пород. Геомеханика и геофизика. – Горные науки и технологии, № 2, 2016. – С. 50-62.

5. Отчет по глубинному геологическому картированию мезозойско-кайнозойского чехла Чу-Сарысуйской депрессии. – Алматы, 2012. – 160 с.

6. Отчет о результатах детальной разведки участка 4 месторождения Инкай. – Алматы, 2009.

7. Паспорта скважинного фонда месторождения Инкай // АО «НАК «Казатомпром». – 2018-2019.

8. Техническая спецификация на выполнение ремонтно-восстановительных работ технологических скважин на месторождении Инкай. АО «НАК «Казатомпром». – 2020. – 8 с.

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СТРЕЛЬЦОВСКОЙ КАЛЬДЕРЫ В УСЛОВИЯХ МОКРОЙ КОНСЕРВАЦИИ

С.А. Красных[1], Е.Г. Юренков[1], И.В. Калинин[2]
1 – АО «РУСБУРМАШ», г. Москва, 2 – ПАО «ППГХО», г. Краснокаменск

В Забайкальском крае в пределах Стрельцовского рудного поля осуществляется проект «Освоение Аргунского и Жерлового месторождений. Строительство Рудника № 6 ПАО «ППГХО». Названные месторождения находятся в условиях «мокрой консервации». В рамках осуществления проекта было необходимо провести изучение гидрогеологических условий затопленных месторождений, находящихся в пределах Стрельцовской кальдеры, для решения задач по проведению дренажа подземных вод, заполнивших рудник, обоснованию проекта осушения месторождений и разработки рациональных мероприятий, позволяющих вовлечь в отработку запасы урановых руд месторождений подземного рудника № 6. При подготовке настоящей работы были использованы опубликованные и фондовые материалы Сосновского ПГО Мингео СССР (АО «Урангеологоразведка»), Приаргунского производственного горно-химического объединения имени Е.П. Славского (ПАО «ППГХО»).

В современной практике добычи твердых полезных ископаемых (кроме углей) примеры по выводу подземных рудников из стадии «мокрой консервации» достаточно редки.

Площадка рудника № 6 охватывает месторождения Аргунское, Жерловое и Пятилетнее и находится в западной части Стрельцовского рудного поля. Общая площадь месторождений составляет 1 кв. км.

В период детальной разведки с 1978 по 1991 годы было пройдено 250 тыс. $м^3$ подземных горных выработок. До начала мокрой консервации горных выработок Рудника № 6 (1991 г.) пройдены шахтные стволы 19РЭШ, 13К, 13В, 20В, 16Р, 20Р.

Особенности геологического строения урановорудных месторождений Аргунское, Жерловое, Пятилетнее определяются их положением в западном литолого-структурном блоке Стрельцовской кальдеры. Кальдера имеет изометричную полигональную форму, ограничена бортовыми разломами северо-западного, широтного и северо-восточного простирания. Амплитуды вертикальных смещений по бортовым разломам составляют от 50 до 700 м.

В геологическом строении кальдеры выделяются два структурных этажа: верхний и нижний. Осадочно-вулканогенную толщу верхнего структурного этажа слагают андезито-базальты, туфолавы, фельзиты, дайковые тела сиенит-порфиров, известняки мраморизованные и другие породы мезозоя. Нижний этаж представлен гранитами и метаморфическими породами протерозойского и палеозойского возрастов.

Урановорудные месторождения Аргунское, Жерловое и Пятилетнее входят в состав Восточно-Забайкальской гидрогеологической области и расположены в западной Меридиональной части Стрельцовской кальдеры. Меридиональный разлом служит гидрогеологическим экраном, ограничивающим развитие депрессионной воронки, формирующейся под влиянием водоотлива из действующих эксплуатационных шахт Стрельцовского рудного поля.

Детальное изучение гидрогеологических условий месторождений проводилось с 1978 по 1991 г. Было установлено, что водоносная система месторождений Стрельцовской кальдеры представлена тремя основными комплексами:

- ✓ нижнемеловой липарит-фельзитовой толщи;
- ✓ верхнеюрских осадочно-вулканогенных пород;
- ✓ домезозойских кристаллических (интрузивных и метаморфических) пород.

По условиям циркуляции подземные воды района месторождений относятся к трещинным, трещинно-жильным и трещинно-карстовым типам. Водовмещающие породы представлены разновозрастными андезито-базальтами, сиенитами, гранитами, амфиболитами, доломитизированными известняками. Характеризуются высокой степенью и сложным характером фильтрационной неоднородности, обусловленной различным типом пород, сложной трещиноватостью, наличием карста и образуют единый гидравлически связанный поток. Водоносная система имеет напорно-безнапорный характер. Питание подземных вод осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков. Разгрузка происходит очень медленно через слабопроницаемые осадочно-вулканогенные породы и зоны тектонических нарушений меридионального простирания в рыхлые отложения приустьевой части пади Тулукуй. В начальный период геологоразведочных работ положение статического уровня подземных вод наблюдалось на абсолютных отметках 643-685 м. Водонасыщенность пород месторождений неравномерная: наряду со слабо обводненными зонами как выше горизонта 374 м, так и ниже, на бóльших глубинах можно ожидать вскрытие обводненных тектонических зон. Общие максимальные водопритоки, зафиксированные при проведении геологоразведочных работ, на горизонты составили: +374 м – 1050 м^3/час; +270 м – 265 м^3/час; +150 м – 210 м^3/час.

Перед затоплением горных выработок в связи с переводом их на «мокрую» консервацию суммарный водоприток составлял 450 м^3/час. Итого за период разведки горными выработками из комплекса шахт 16Р, 20Р было откачано 54 657 570 куб. м воды.

В начале 1981 года было составлено заключение о гидрогеологических условиях участка шахт 16Р-20Р, определены расчетные гидрогеологические параметры (водопроводимость 57,6 м^2/сут., коэффициент фильтрации 0,22 м/сут., уровнепроводность 5,4*10^3 м /сут., водоотдача 0,011) и выполнен

расчет прогнозного водопритока в систему разведочных выработок горизонта 374 м. Величина прогнозного водопритока была утверждена в объеме 1020 м^3/ч. В 1993 году ожидаемые притоки при полном развитии горных работ были пересчитаны и приняты в объемах:

- ✓ Q норм. – 1100 м^3/ч;
- ✓ Q макс. – 1500 м^3/ч.

Таким образом, перед началом работ по расконсервации подземного рудника предприятие имеет объект, характеризующийся сложными гидрогеологическими условиями, в том числе фильтрационной неоднородностью, обусловленной различным типом пород, тектонической нарушенностью и трещиноватостью. Наибольшая водообильность пород характерна для доломитизированных известняков и их контактов с гранитами, сланцами, а нередко и для собственно гранитов в зонах тектонических нарушений. Удельные дебиты скважин, вскрывших граниты, амфиболиты, базальты, сиениты, липариты выше горизонта 374 м, изменялись в широких пределах – от 0,015 до 3,75 л/с. Для сильно обводненных тектонических зон отмечены вариации удельных дебитов скважин в диапазоне 1,25-3,16 л/с.

Депрессионная воронка, образовавшаяся в результате шахтного водоотлива, была вытянута с севера на юг на 8,9 км, с запада на восток – на 5,0 км. Площадь развития депрессионной воронки составляла порядка 40 кв. км. Границей распространения ее на востоке являлся почти непроницаемый Меридиональный разлом. На западе границей развития депрессионной воронки служили кальдерные разломы. На севере роль экрана выполнял слабопроницаемый базальный горизонт конгломератов. Учитывая изложенное выше, схема водоносной системы была принята как «замкнутая».

Уровень подземных вод к завершению геологоразведочных работ в 1991 году установился на отметке +30 м. Абсолютная отметка уровня подземных вод на июнь 1992 года на месторождениях Аргунское, Пятилетнее колебалась в пределах 511,3–516,3 м.

Таким образом, по степени сложности и трудности промышленного освоения урановорудные месторождения Стрельцовской кальдеры относятся к IV группе и характеризуются притоками воды в горные выработки в диапазоне от 1000 до 2000 м^3/ч;

По степени сложности гидрогеологических условий месторождения следует отнести к типу III – весьма сложные, исходя из наличия крупных тектонических разломов и залегания урановорудных тел среди толщи водоносных закарстованных карбонатных пород.

В настоящее время гидрогеологические условия месторождений Стрельцовской кальдеры образуют техногенно измененную водоносную систему с наличием в составе гидравлически свободной воды в подземных горных выработках. В 2019 году были выполнены заверочные гидрогеологические исследования, подготовлена геофильтрационная модель урановорудных месторождений, составлены рекомендации по

расконсервации затопленных подземных выработок. По результатам работ определен современный уровень подземных вод техногенного водоносного комплекса. Абсолютная отметка уровня воды приблизилась к уровню доразведочного периода и составила +643 м. Амплитуда колебаний уровня в июне 2019 года варьировала в пределах 22- 41 см. В шахтном стволе 20Р отметка уровня воды на 14.10. 2018 года была зафиксирована на абсолютной отметке 643,36 м и превышала на 132,36 м отметку уровня воды в стволе шахты, выявленную в 1992 году на горизонте +511 м в момент начала затопления подземных горных выработок Рудника № 6. Ежегодное поднятие уровня подземных вод техногенной водоносной зоны с 1991 по 2019 годы составило 4,72 м.

Подземные воды характеризуются высоким содержанием радиоактивных элементов и не соответствуют требованиям СанПин 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». По результатам расширенного радиологического анализа в подземных водах выявлены концентрации урана и его дочерних продуктов Th-230, Pb-210, Po-210, Ra-226. Критический показатель активности радионуклидов к предельным концентрациям колеблется от 2,93 до 28,52.

В постразведочный период в условиях техногенной нагрузки в целиковой толще над выработанным пространством сформировалась мощная зона трещиноватых, кавернозных и дробленных пород скального массива. В верхних интервалах геологического разреза месторождений до 46-120 м вскрыты породы с интенсивной трещиноватостью от 5 до 30 м. Зоны тектонического дробления проявлены как в гранитах и монцодиоритах, так и в породах эффузивно-осадочной толщи – базальтах, андезито-базальтах, туфах андезито-базальтов, туфопесчаниках. Интервалы зон тектонического дробления представлены щебнем и дресвой из обломков материнских пород различных размеров. Средний размер отдельностей в массиве колеблется от нескольких сантиметров до 10-30 см.

Массив горных пород до горизонта +374 м характеризуется высокой степенью кавернозности и трещиноватости пород. Суммарная мощность слаботрещиноватых водонепроницаемых блоков горных пород до горизонта + 374 м составляет в среднем 35-50 метров и 50-150 метров для нижней части разреза. Размеры водоносных зон колеблются в диапазоне 1,5-30 м. Водообильность скальных образований неравномерная, но в целом достаточно высокая. Дебиты заверочных скважин изменялись от 0,11 до 5,13 л/с. Заверочными работами 2019 года было установлено, что удельные дебиты скважин, вскрывших породы выше горизонта +374 м, изменяются в широких пределах – от 0,01 до 0,83 л/с*м. Удельные дебиты скважин, вскрывших граниты ниже горизонта +374 м, колеблются от 0,00025 до 0,2 л/с*м. Степень водообильности пород в разрезе зависит в большей степени от тектонической нарушенности пород. Наиболее обводненные участки приурочены к раздробленным породам зон

тектонических нарушений. Вертикальная фильтрационная изменчивость массива пород характеризуется широким диапазоном коэффициента водопроводимости от 0,71 до 520,0 м^2/сут. В среднем водопроводимость принята 24 м^2/сут. Значения водопроводимости массива пород ниже отметки +350 м резко падают, мощность водопроницаемых зон уменьшается. Вариации коэффициента фильтрации трещинно-жильного водоносного комплекса находятся в диапазоне 0,00003-3,06 м/сут. Высокие значения коэффициента фильтрации 3,06 м/сут. определены для щебенистых грунтов зон дробления, характеризующихся малой мощностью от 0,2 до 5,0 м.

Максимальный водоприток к шахтному стволу 20Р следует ожидать из лейкократовых гранитов в зонах тектонических нарушений на горизонтах 496,5-346,5 м. В 2019 году на 18-19 апреля расчетный водоприток на боковую крепь шахтного ствола 20Р составил 1801,44 м^3/сут (75,06 м^3/час). По результатам заверочных гидрогеологических работ 2019 года методом кустовой откачки были получены следующие плановые гидрогеологические параметры: максимальная водопроводимость 660,0 м^2/сут., нормальная водопроводимость 24,0 м^2/сут., коэффициент фильтрации 1,29 м/сут., уровнепроводность 2,35*105 м^2/сут., водоотдача 0,0025.

Исходя из особенностей геологического строения Стрельцовской кальдеры, прогнозные водопритоки в подземные горные выработки на горизонтах +374 м, +270 м и +150 м будут зависеть, в основном, от фильтрационных свойств водоносных зон скального массива и интенсивности формирования депрессионной воронки по вертикали. Максимальный прогнозный водоприток в подземные горные выработки рудника № 6 до горизонта +374 м составит 209411,25 м^3/сут., (8725,5 м^3/час). Нормальный прогнозный водоприток в подземные горные выработки рудника № 6 до горизонта +374 м составит 11534,53 м^3/сут., (480,6 м^3/час). Максимальный прогнозный водоприток в подземные горные выработки рудника №6 до горизонта +270 м составит 7244,36 м^3/сут. (301,85 м^3/час). Нормальный прогнозный водоприток в подземные горные выработки рудника № 6 до горизонта +270 м составит 3548,134 м^3/сут. (147,84 м^3/час). Нормальный и максимальный прогнозные водопритоки в подземные горные выработки рудника № 6 до горизонта +150 м составят 251,19 м^3/сут. (10,47 м^3/час).

С момента начала консервации рудника произошло перераспределение составляющих водопритока в объемном пространстве подземных горных выработок. В процессе освоения месторождений практически весь шахтный водоприток обеспечивался подземной системой осушения комплекса шахт 16Р, 20Р. Большая его часть приходилась на горизонт +374 м с водопритоком 1050 м^3/час из трещинно-жильного водоносного комплекса кристаллических пород.

В настоящее время высокая степень водообильности горизонта +374 м сохраняется. Уровень столба воды в шахтных стволах резко возрос. По нашему мнению, высокая степень проницаемости горных пород западной части Стрельцовской позднемезозойской вулканогенно-тектонической структуры увеличилась за счет активизации современных геодинамических процессов, вызванных интенсивной отработкой месторождений Стрельцовского рудного поля. Влияние более глубоких горизонтов +270 м и +150 м, обусловленное относительно небольшим объемом выработок и низкой проницаемостью вмещающих пород (водопроводимость колеблется в пределах 0,71-16,2 $м^2$/сут.), проявлено в меньшей степени. К настоящему времени суммарный вклад нижних горизонтов, по данным заверочных работ, не превышает 4% от общего водопритока.

Оценка производительности водоотливного комплекса зависит от оценки статических и динамических запасов подземных вод. Расчетные суммарные статические запасы техногенной системы с учетом объема гидравлически «свободной» воды в затопленных горных выработках определены в объеме 50 250 000 $м^3$. После сработки естественных запасов приток подземных вод в горные выработки будет обусловлен динамическими запасами. Подсчет восполняемых запасов проведен на основании построения геофильтрационной модели.

Воспроизведение на модели опыта эксплуатации водоотливного комплекса и естественных условий показало, что значимым источником пополнения запасов воды на площади месторождений является привлечение ресурсов с сопредельных территорий. В естественных условиях законсервированного рудника источником формирования динамических запасов является весьма низкая инфильтрация. В условиях интенсификации водоотливной системы привлечение ресурсов из породного комплекса области питания существенно возрастает.

Прогнозное моделирование показало, что при дебите водоотливного комплекса 36 000 $м^3$/сут. формируется депрессионная воронка с наибольшими понижениями и максимальной скоростью развития депрессии в центральной и южной частях горных выработок горизонта +374 м. На этих участках прогнозируется осушение горизонта +374 м через 1,5-2 года работы водоотливного комплекса. На северо-западных флангах горных выработок скорость развития и величина депрессии меньше, и стабилизация уровней происходит через 4-5 лет. Наибольшая часть выработок горизонта +374 м осушается через 3 года на фоне стабилизации динамических уровней. На первоначальном этапе основным (на 90 %) источником являются ёмкостные (статические) запасы. За трехлетний период работы при производительности очистного комплекса в 36 тыс. $м^3$/сут. объём откачанной воды составит 39,6 млн $м^3$, из которого 67 % (26,2 млн $м^3$) приходится на «сработку» ёмкостных запасов, и 33 % (13,4 млн $м^3$) на привлечение ресурсов с сопредельных территорий.

Таким образом, водоносная система урановорудных месторождений Аргунское, Жерловое, Пятилетнее в современных условиях, кроме подтвержденных фактов высокой водообильности и радиоактивности вод, характеризуется наличием дополнительных источников динамических запасов. Водоносная система, отвечающая схеме «замкнутый пласт», результатами моделирования подверглась сомнению. Наиболее высокие концентрации изотопов уранового ряда в водных пробах выявлены на глубине 567 м за пределами контура развития рудных тел.

По результатам выполненных гидрогеологических исследований в рамках Проекта «Освоение Аргунского и Жерлового месторождений. Строительство Рудника № 6 ПАО «ППГХО»» реализованы следующие мероприятия:

1. Выполнен Расчет прогнозных водопритоков по интервалам проходки для ствола шахты 20В.

2. Разработана и утверждена Программа «Технических мероприятий по расконсервации объектов Рудника № 6 ПАО «ППГХО»», которая позволяет выполнить осушение существующих горно-капитальных выработок (вертикальные стволы 20В, 13К, 19РЭШ) Рудника № 6 и шахтного поля в целом.

Основной объем работ по осушению рудного поля выполняется временным водоотливом ствола 20Р. Дополнительный объем работ по осушению рудного поля выполняется временным водоотливом стволов 13К-19РЭШ.

Осушение рудного поля с использованием погружных насосов позволяет откачать основной объем воды с шахтного поля и после снижения водопритока в стволах 13К-19РЭШ до приемлемого уровня начать работы по строительству временного водоотлива с использованием горных выработок с целью осушения стволов 13К и 19РЭШ.

Сброс воды, откачанной с помощью временных водоотливов, производится на построенные очистные сооружения шахтных вод (ОСШВ) Рудника № 6. Производительность очистных сооружений 1500 м³/ч. Осушение затопленных геологоразведочных выработок Рудника № 6 разработано на основе раздела проектной документации. Сброс всего объема откачанной воды производится также в ОСШВ Рудника № 6.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ФИЛЬТРАЦИОННО-РЕПУЛЬПАЦИОННОЙ СХЕМЫ ПРОМЫВКИ ОСАДКОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПОСЛЕ АВТОКЛАВНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ КАРБОНАТНЫХ РУД РУДНИКА № 6 ПАО «ППГХО»

Д.В. Майников, В.А. Толкачев
АО «ВНИПИпромтехнологии», г. Москва

В настоящее время принято решение о переработке уранмолибденовых карбонатных руд Рудника № 6 ПАО «ППГХО» (Аргунское и Жерловое месторождения) по технологии, включающей автоклавное выщелачивание с последующей сорбцией урана и молибдена из раствора. Для решения такой задачи необходимо проведение операции фильтрования пульп и промывки образующихся осадков.

Ранее было проведено значительное количество исследований процесса переработки карбонатных руд Аргунского и Жерлового месторождений. Однако во всех этих работах без исключения после процесса выщелачивания урана и молибдена рекомендовался процесс сорбции из пульп [1-3]. Это объясняется тем, что такая технология была разработана в АО «ВНИИХТ» под руководством академика Ласкорина Б.Н. и применялась практически [4] на всех промышленных урандобывающих предприятиях СССР и стран Восточной Европы (всего 18 заводов). Поэтому изучению процесса разделения пульп и промывки осадка с получением растворов, направляемых на сорбционную переработку, в нашей стране уделялось недостаточно внимания.

В настоящее время вопрос о фильтровании пульп, полученных после автоклавного выщелачивания, является актуальным еще и в связи с тем, что принято решение об исключении использования хвостохранилищ для сбора отвальной пульпы и направлении промытого твердого материала для изготовления пасты [5-7] с последующей закладкой ее в отработанные выработки и заполнения карьера. С этой целью также необходимо проведение процесса фильтрования для получения влажного осадка, подаваемого на производство материалов пастовой закладки.

Для решения поставленной задачи, в первую очередь, должен быть рассмотрен вопрос об использовании фильтрационно-репульпационной отмывки урана и молибдена. В 50-70-х годах XX века такая схема разделения пульп и промывки осадков, полученных после выщелачивания карбонатных руд, широко использовалась в США и Канаде [8, 9]. В качестве основного разделительного оборудования применялись барабанные вакуум-фильтры, производительность которых при добавке флокулянтов составляла 0,36-0,88 т/[м^2×сутки].

Для фильтрационно-репульпационной промывки осадков, полученных при переработке руд Рудника № 6, предлагается технологическая схема, представленная на рис. 1.

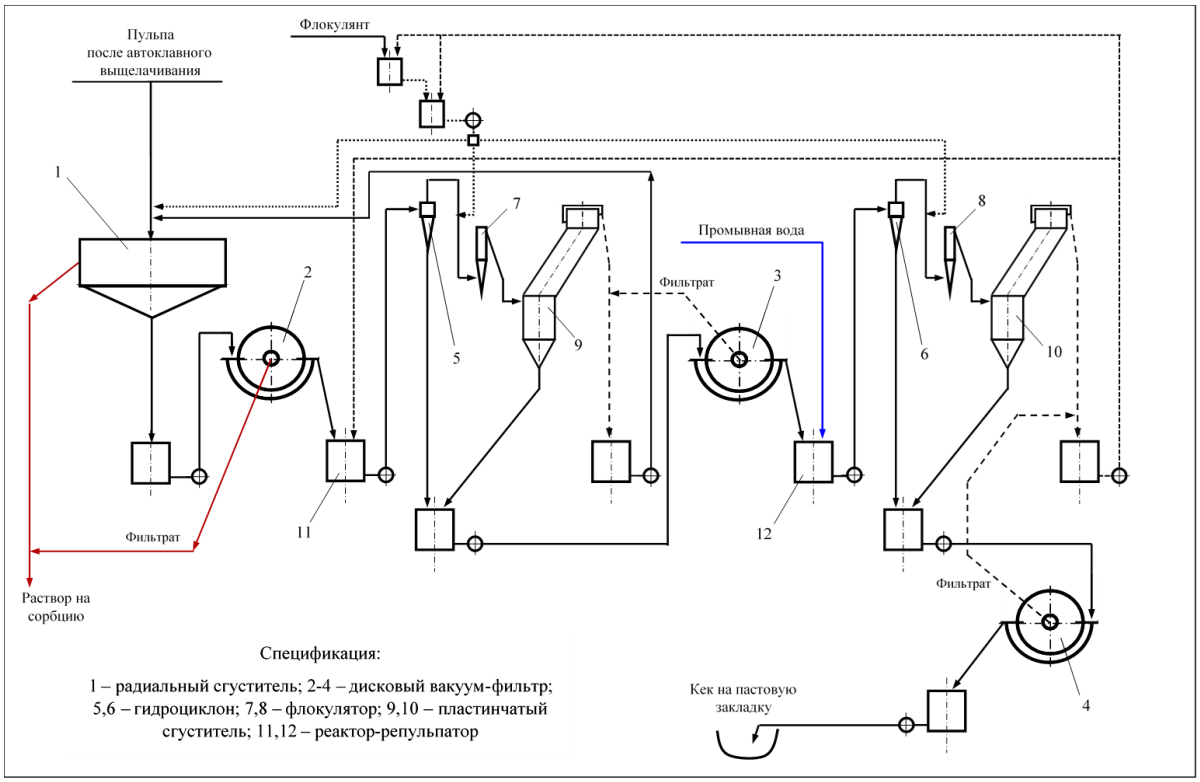


Рис. 1. Аппаратурно-технологическая схема
фильтрационно-репульпационной отмывки урана и молибдена от осадка

В схеме пульпа предварительно сгущается с добавками флокулянта. Сгущенный продукт фильтруется на дисковых вакуум-фильтрах. Кек направляется на репульпацию и далее на последующую ступень сгущения/фильтрования, а получаемые фильтрат и декантат подаются на предыдущую стадию репульпации.

На всех стадиях операцию сгущения (уплотнения) пульпы предлагается проводить с использованием гидроциклонов и пластинчатых сгустителей [10]. Пульпа после репульпации подается на гидроциклон. Верхний слив гидроциклона смешивается с флокулирующими реагентами и поступает в пластинчатый отстойник. Сгущенный продукт отстойника объединяется с нижним сливом гидроциклона и направляется на фильтрование.

Предлагаемая технологическая схема должна отвечать нескольким важным требованиям. Во-первых, содержание урана во влаге промытого кека не должно превышать 0,03 г/л. Во-вторых, концентрация соды в продуктивных растворах, поступающих на сорбцию, должна составлять менее 15-20 г/л. Это обусловлено особенностями сорбционной переработки карбонатных растворов, эффективность которой существенно снижается при увеличении содержания иона CO_3^{2-}, а приемлемое извлечение молибдена возможно только при сорбции из растворов с еще более низким содержанием соды [11].

Важными параметрами фильтрационно-репульпационной схемы являются количество свежей воды, поступающей на промывку, и число ступеней промывки. Эти показатели находятся в обратной зависимости и, вместе с тем, оказывают определяющее влияние на значение концентраций урана, молибдена и соды в продуктивном растворе и во влаге промытого осадка.

Необходимое число ступеней определяется по методике, представленной в [12].

На основании предварительных расчетных данных содержание урана в жидкой фазе пульпы после выщелачивания ($X_н$) составляет 2,65 г/л, содержание соды – 25 г/л. Количество жидкой фазы на 1 т исходного твердого ($W_н$) – 1,31 м^3. Концентрацию урана во влаге отмытого кека ($X_к$) принимаем на уровне 0,03 г/л. Влажность кека – 25 %, что соответствует объему жидкого ($W_к$) 0,33 м^3 на 1 т твердого осадка. Принимаем количество промывной воды (V) 2 м^3/т твердого.

Получаем начальное ($S_н$) и конечное ($S_к$) содержание урана:

$$S_н = W_н \times X_н = 131 \times 2{,}65 \times 10^{-3} = 0{,}347\ \%;$$

$$S_к = W_к \times X_к = 33 \times 0{,}03 \times 10^{-3} = 0{,}00099\ \%.$$

Концентрация урана в продуктивном растворе, поступающем на сорбцию ($Y_к$):

$$Y_к = \frac{S_н - S_к}{V + W_н - W_к} = \frac{0{,}347 - 0{,}00099}{200 + 131 - 33} = 0{,}00116\ {}^г/_{мл} = 1{,}16\ {}^г/_л.$$

Расходный коэффициент (d):

$$d = \frac{V}{W_к} = \frac{200}{33} \approx 6.$$

Необходимое число промывок (n) рассчитываем по формуле:

$$n = \frac{\lg[\frac{Y_к}{X_к}(d-1)+1]}{lgd} = \frac{\lg[\frac{0{,}00116}{0{,}00003}(6-1)+1]}{lg6} = 2{,}93 \approx 3.$$

Суммарное разбавление составит:

$$\lambda = \frac{X_н}{Y_к} = \frac{2{,}65}{1{,}16} = 2{,}28.$$

Следовательно, содержание соды в продуктивном растворе составит:

$$Y_{сод} = \frac{25}{2{,}28} = 10{,}96 \approx 11\ {}^г/_л.$$

Из расчета видно, что уменьшение числа ступеней потребует увеличения объема промывной воды, а это, в свою очередь, приведет к разбавлению по урану продуктивных растворов, поступающих на сорбцию, и, как следствие, к увеличению размеров и количества аппаратов (колонн сорбции, насосов и т.п.).

Сокращение числа ступеней с трех до двух возможно только при увеличении расхода промывной воды с 2,0 до 5,0 м^3/т твердого.

При этом концентрация урана в растворах, поступающих на сорбцию, снизится до 0,57-0,58 г/л.

Кроме того, следует отметить, что это будет способствовать существенному увеличению объема маточного раствора, который из-за повышенного содержания соды нельзя направлять в оборот, а следует регенерировать, что потребует еще больших затрат.

Напротив, увеличение числа ступеней позволит снизить расход промывной воды и увеличить концентрацию урана в продуктивных растворах. Однако одновременно с этим возрастет содержание соды, что будет оказывать негативный эффект на сорбцию, а также для организации новых ступеней промывки потребуется дополнительное оборудование.

Увеличение числа ступеней до 4 позволит снизить количество промывной воды до 1,25 $м^3$/т, повысить содержание урана в продуктивном растворе до 1,66 г/л, а соды до 14,7 г/л.

Предварительная оценка фильтрационно-репульпационной схемы, а также определенный практический опыт, накопленный за долгие годы подобных исследований, позволяют говорить о принципиальной возможности достижения поставленной цели получения продуктивного раствора и промытого отвального кека. Тем не менее, до недавнего времени в России не планировали после процесса выщелачивания карбонатных руд проводить процесс сорбции из растворов, и фильтрование таких пульп нигде не проводилось и не изучалось. В связи с этим необходимо начать проведение лабораторных исследований процессов выщелачивания урана и молибдена из тонкоизмельчённых руд различной крупности в автоклаве с разделением и отмывкой растворимых веществ от осадка с использованием фильтрования и репульпаций.

Следует отметить, что показатели процесса фильтрования – влажность осадков и удельная производительность – оказывают решающее влияние на эффективность отмывки урана, молибдена и соды в пределах 99,5÷99,8 %, а также на число фильтров, необходимое для достижения таких параметров. Для оценки возможности использования дисковых вакуум-фильтров для фильтрования карбонатных пульп необходимо, в первую очередь, определить влияние гранулометрического состава твёрдой фазы на процесс фильтрования и добавок правильно подобранных флокулирующих реагентов, их расход, условия приготовления, дозировки и смешивания с пульпой.

В конечном итоге от результатов фильтрования пульп в режиме дискового вакуум-фильтра будет зависеть выбор технологической схемы переработки карбонатных руд Аргунского и Жерлового месторождений.

Литература

1. Головко В.В. Технология переработки карбонатных руд Аргунского месторождения / В.В. Головко, В.Г. Литвиненко, Е.Ю. Мешков // Горный журнал. – 2021. – № 3. – С. 86-91.

2. Молчанова Т.В. Унификация переработки рудных урановых пульп методом сорбционного выщелачивания / Т.В. Молчанова, К.М. Смирнов, О.К. Крылова // Атомная энергия. – 2019. – Т. 129. – № 4. – С. 205-211.

3. Смирнов К.М. Технология переработки комплексного силикатного и карбонатного уран-молибденового рудного сырья / К.М. Смирнов, Т.В. Молчанова, О.К. Крылова // Горный журнал. – 2018. – № 7. – С. 59-63.

4. Громов Б.В. Введение в химическую технологию урана: учебное пособие для вузов / Б.В. Громов. – М.: Атомиздат, 1978. – 336 с.

5. Смагин А.П. Проектирование и строительство Приаргунского горно-химического комбината в Забайкальском крае / А.П. Смагин, П.Н. Пасхин // Горный журнал. – 2021. – № 3. – С. 57-62.

6. Бодров А.С. Исследования возможности применения сгущенных отходов гидрометаллургической переработки урановых руд для закладки выработанного пространства рудников / А.С. Бодров // Горный журнал. – 2018. – № 7. – С. 40-43.

Кузьмин Е.В. Сгущение отходов переработки урановых руд с получением пасты для подземного размещения / Горный журнал. – 2018. – № 7. – С. 73-77.

8. Зефиров А.П. Заводы по переработке урановых руд в капиталистических странах / А.П. Зефиров, Б.В. Невский, Г.Ф. Иванов. – М.: ГОСАТОМИЗДАТ, 1962. – 372 с.

9. Гидрометаллургическая переработка уранорудного сырья / Ю.В. Смирнов, З.И. Ефимова, Д.И. Скороваров, Г.Ф. Иванов; под ред. Д.И. Скороварова. – М.: Атомиздат, 1979. – 280 с.

10. Толкачев В.А. Использование гидроциклонов и пластинчатых отстойников для уплотнения пульп перед процессом выщелачивания / В.А. Толкачев, Н.П. Пасхин, Д.В. Майников // Горный журнал. – 2018. – № 7. – С. 78-81.

11. Рациональная технология совмещенной переработки силикатных и карбонатных урановых руд / К.М. Смирнов, Т.В. Молчанова, И.Д. Акимова, О.К. Крылова // Атомная энергия. – 2018. – Т. 124. – № 2. – С. 90-94.

12. Брук О.Л. Процессы промывки осадков / О.Л. Брук. – М.: «Недра», 1973. – 216 с.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСА ГЕОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ПОИСКАХ СКРЫТЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА

Т.М. Овсянникова, А.И. Несмеянова, Н.А. Гребенкин, Д.А. Прохоров, А.В. Стародубов, Д.М. Машнин, И.С. Тубольцев
ФГБУ «ВИМС», г. Москва

Необходимость выявления слепого оруденения, в том числе уранового, обусловливает дальнейшее развитие геохимических методов и технологий, широко используемых при поисках по вторичным ореолам и потокам рассеяния рудных элементов и их спутников в рыхлых отложениях. В поверхностных природных объектах (к ним также относятся почвы, воды, растительность, подпочвенный воздух – «геогаз») вероятность обнаружения вторичных концентраций урана достаточно высока, но также часто наблюдается их пространственное разобщение с коренной урановой минерализацией и большое число «ложных» аномалий, вызванных механическим рассеянием обогащенных ураном пород, концентрированием металлов на геохимических барьерах и другими причинами, что мешает эффективному применению поисковой геохимии. Для решения этих проблем, помимо комплексирования методов, предлагается увеличивать объем получаемой геохимической информации при опробовании (например, определять изотопный состав элементов и др.), использовать специальную обработку и нестандартные подходы к интерпретации результатов [3, 4]. Эффективность применяемых методов в значительной степени зависит от наличия систематизированных данных о закономерностях распределения и поведения химических элементов и их изотопов в природных условиях в целом, на искомых объектах, в конкретных районах проведения работ, от правильности выбора оптимального комплекса геохимических критериев и признаков оруденения, используемых технологий опробования и аналитических методов. Отсюда вытекают практические задачи опытно-методических работ (ОМР), реализованных на урановых месторождениях различных геолого-промышленных типов (Юго-Западное, Южно-Широндукуйское, Тетрахское, Столбовое).

Работы выполнялись специалистами ФГБУ «ВИМС» при содействии руководства и персонала АО «Урангео», АО «Хиагда» и ПАО «ППГХО», за что авторы выражают свою искреннюю благодарность.

Объекты и методы

Месторождения Юго-Западное и Южно-Широндукуйское располагаются в пределах Стрельцовской кальдеры, в геологическом строении которой принимают участие породы 2-х структурных этажей: преимущественно палеозойского гранит-метаморфического фундамента и гетерогенного вулканогенно-осадочного чехла юрско-мелового возраста.

Юго-Западное месторождение находится в юго-западной части кальдеры и почти целиком локализовано в эффузивных породах кислого состава. Месторождение представлено несколькими рудными зонами, которые суммарно прослеживаются на 2 км, имея ширину 150–300 м. Рудные тела представлены многочисленными крутопадающими жилами. Их глубина залегания колеблется от 40 до 550 м от земной поверхности; мощность варьирует в пределах 0,30-13,0 м, содержание урана – в диапазоне 0,050-0,234%.

Южно-Широндукуйское месторождение располагается в северо-восточной части кальдеры. Оно локализовано в гранитах, трахидацитах и андезито-базальтах. Урановое оруденение залегает на глубинах от 90 до 350 м. На месторождении проявлены два морфологических типа рудных залежей: жилообразные и штокверкоподобные. В гранитах, базальтах и андезитах развиты только жилообразные залежи, приуроченные к крутопадающим разломам субмеридионального и северо-восточного простирания и отличающиеся простым строением, небольшой протяженностью (100–150 м) и размахом оруденения по вертикали 50–70 м. Рудные тела, локализованные в трахидацитах, имеют штокверкоподобную форму с раздувами и апофизами (высота раздувов 30–50 м, протяженность 200–300 м). Всего на месторождении выделено 48 жилообразных и 17 штокверкоподобных рудных тел. Балансовые руды в целом рядовые с вариациями содержаний урана от 0,050 до 2,6%.

Месторождение Столбовое (Восточное Присаянье) входит в ряд малых урановых месторождений типа структурно-стратиграфического несогласия (ССН), территориально приуроченных к юго-западной границе Сибирской платформы с Алтае-Саянской складчатой областью. В геологическом строении объекта выделяются 2 структурных этажа: нижнепротерозойский гранито-гнейсовый фундамент, выветрелый в верхней части (мощность коры 1–20 м), и субплатформенные осадочные образования средне-верхнерифейского чехла, с резким угловым и стратиграфическим несогласием залегающие на коре выветривания цоколя. На объекте широко проявлены гидротермально-метасоматические образования, в том числе с урановой минерализацией. Вскрытое эрозией урановое оруденение локализовано в сближенных зонах субмеридионального простирания среди гранитоидов и метаморфитов фундамента. Протяженность отдельных ураноносных зон составляет первые сотни метров и достигает 2 км; мощность варьирует от первых метров до 250 м. В пределах рудных зон установлено около 40 жилообразных и линзовидных рудных тел протяженностью по простиранию и падению от нескольких десятков метров до 200 м, с раздувами и пережимами, со средней мощностью от 0,4 до 2,5 м. При среднем оцениваемом содержании урана 0,132%, в отдельных маломощных линзах в поверхностных выработках содержания достигают первых процентов, в скважинах – первых n·0,1%. В 2015 г. в юго-

восточной части месторождения в гранитоидах фундамента выявлены «слепые» настуран-кварцевые жилы мощностью от первых сантиметров до десятков сантиметров и с содержаниями урана от 0,1 до 1,48%. По сравнению с другими участками ОМР район месторождения Столбовое характеризуется менее благоприятными для проведения работ природными условиями: пересеченным рельефом со значительными перепадами высот, крутыми склонами и развитием курумов.

Тетрахское месторождение расположено на южном склоне Байсыханского хребта в пределах Витимского урановорудного района (УРР). Оруденение локализовано в палеодолине, врезанной в кристаллический фундамент, в проницаемых вулканогенно-осадочных отложениях неогена (N_1), перекрытых платобазальтами. Линейно-ориентированная основная рудная залежь, линзовидная субгоризонтальная в разрезе и лентообразная в плане, находится в средней и верхней части палеодолины, а также в ее правом притоке на глубинах до ~200 м. Длина залежи в основной палеодолине 4 км, в палеопритоке – 2,5 км, ширина от первых сотен метров до 0,8-1,2 км; мощность изменяется от десятков сантиметров до 20 и более метров. Содержание урана варьирует в пределах 0,016–0,252% с максимумом в центральной части и постепенным уменьшением к верховьям и низовью палеодолины. Ландшафтно-геоморфологические условия на участке благоприятны для проведения геохимического опробования: развиты почвы и растительность, антропогенное воздействие на территорию минимально.

На объектах были запланированы и проведены геохимические исследования тем или иным комплексом методов (табл. 1).

Таблица 1

Геохимические методы, использованные при ОМР

Метод / месторождение	Юго-Западное	Южно-Широндукуйское	Тетрахское	Столбовое
ИПМ (МП)	+	+	+	+
$^{234}U/^{238}U$ (содовые вытяжки)	–	–	+	–
КСО	–	–	+	–
Общая активность (растительность)	+	+	+	+
Элементы, МП (растительность)	–	–	–	+
Атмогеохимия («нанофракции»)	+	+	+	–
Атмогеохимия (изотопы Pb)	+	+	–	–

Изотопно-почвенный метод (ИПМ) относится к обширной группе геохимических методов с частичным извлечением элементов, основной этап развития которых пришелся на 60–70 гг. XX века. Основные принципы, преимущества и недостатки современных вариантов этих методов изложены в работах [10, 12, 15, 20, 21] и др. Особенностью ИПМ

является радиохимическое выделение и измерение активностей относительно короткоживущих изотопов ^{210}Po и ^{210}Pb (членов ряда распада ^{238}U), отношения которых служат поисковым признаком погребенной урановой минерализации. Оруденение локализуют по аномальным почвенным ореолам мультипликативного показателя (МП=^{210}Po×^{210}Pb) и параметра ^{210}Po/^{210}Pb, определяемых в солянокислых вытяжках. Глубинность метода в благоприятных условиях достигает 600 м [1, 2]. В некоторых случаях для оценки аномалий ИПМ привлекается *анализ изотопных отношений урана ($^{234}U/^{238}U$)*, экстрагируемого из тех же почвенных проб разбавленным содовым раствором.

Картирование сорбционно-солевых ореолов (КСО) основано на извлечении подвижных форм химических элементов из почвенных проб при помощи горячего раствора гидроксиламина гидрохлорида в 0,1M HCl с последующим мультиэлементным анализом ICP-MS. Отбор проб осуществляется из верхней части горизонта «В», для анализа выделяют воздушно-сухую фракцию почвы размером <1 мм. По результатам обработки данных с помощью факторного и кластерного анализа строят графики мультипликативных показателей. Среди преимуществ метода высокая контрастность получаемых аномалий, классическая простая схема отбора проб и пробоподготовки и высокая чувствительность. Подтвержденная глубинность метода – 150 м.

Определение общих альфа- и бета-активностей в озоленных пробах растительности – одно из перспективных (в т.ч. в связи с простотой применения и минимальными затратами) направлений биогеохимических исследований, в целом характеризующихся повышенной глубинностью, контрастностью аномалий и другими преимуществами [8]. К настоящему моменту имеется положительный опыт опробования растительности (с мультиэлементным анализом и изотопией свинца) на скрытых месторождениях урана типа «несогласия» [14].

Также при проведении ОМР протестирована специально разработанная технология, относящаяся к относительно новой группе *атмогеохимических (газовых) методов по «нанофракциям»*, основанных на определении элементного состава механических агрегатов частиц сверхмалых размеров (10–200 нм), транспортируемых постоянным потоком геогаза в направлении земной поверхности и селективно извлекаемых с помощью специальных коллекторов [9, 10, 17–19, 22]. Схема опробования включала длительную экспозицию угольных коллекторов в почвенных шпурах, извлечение (экстракцию) «нанофракций» в раствор и последующий мультиэлементный анализ ICP-MS, в т.ч. с определением *изотопных отношений свинца ($^{206}Pb/^{204}Pb$, $^{207}Pb/^{206}Pb$)*, которые могут служить прямым признаком длительно существующего уранового оруденения [11, 16, 20].

При отборе проб осуществлялась стандартная *наземная радиометрическая съемка* с СРП-68 (без свинцового экрана) с целью фиксации поверхностных радиометрических аномалий.

На месторождениях *Юго-Западное и Южно-Широндукуйское* отбор проб осуществлялся по двум профилям на каждом из объектов (соответственно 64, 120, 159, 164); шаг между пикетами составлял 25–50 м со сгущением в центральной части профиля над известными рудными телами. В 2021 г. на Южно-Широндукуйском месторождении проведены площадные работы. По данным наземной радиометрии месторождение Южно-Широндукуйское было отнесено к скрытым объектам (нет радиометрических аномалий); на месторождении Юго-Западное над рудной зоной было зафиксировано повышение активности (до 2 раз над уровнем фона), поэтому оруденение отнесено к слабопроявленному типу. Установка и экспозиция газовых коллекторов выполнялась в шпурках глубиной около 0,5–1 м, которые помечались сигнальным флажком и в GPS-навигаторе; спустя 15 суток детекторы были извлечены, герметично закрыты и упакованы для транспортировки; в лаборатории получены азотнокислые вытяжки из углей и выполнен анализ ICP-MS (61 элемент + изотопы Pb). В качестве биоиндикаторов отбирали верхние части корневой системы мятлика лугового (*Poa praténsis*) и лука-слизуна (*Allium nutans*). После доставки проб в лабораторию их промывали, высушивали, предварительно измельчали с помощью секатора, затем навески массой 10 г помещали в фарфоровые чашки и озоляли в муфельной печи при постепенном повышении температуры в диапазоне 100–550 ºС. Золу дотирали до однородного состояния, переводили в кюветы и измеряли активность на радиометре.

На месторождении *Столбовое* работы выполнялись на одном «эталонном» профиле. При опробовании ИПМ пробы почво-грунта, при его наличии на точках отбора (на участке почвы развиты не повсеместно, мощность почвенного слоя не выдержана, присутствуют курумы), брали из закопушек глубиной 10-25 см. Отбор проб растительности (внешняя кора и ветви березы, ветви сосны и ели, мхи) осуществляли вблизи точек ИПМ; в озоленных пробах определяли общие альфа-и бета-активности, а также, после разложения царской водкой, произведение активностей $^{210}Po \times ^{210}Pb$ и элементный состав. Также для оценки поверхностных геохимических аномалий было исследовано 50 проб керна скважин с разных глубин (для них установлен элементный состав и изотопные отношения свинца).

ОМР на Тетрахском месторождении проходили в течение двух полевых сезонов. Изотопно-почвенная съемка выполнялась по профилям 36, 39, 42, 46, 50, 70. Пробы отбирали с шагом в 25-50 м; на каждой точке проводили зачистку от верхнего почвенного слоя, рытье закопушки глубиной 10-25 см, радиометрические измерения, отбор почвы и предварительное просеивание. На профиле 42, пройденном над средней частью палеодолины, и профиле 70, расположенном в «безрудном»

верховье палеодолины, проведен отбор проб растительности (коры березы и лиственницы) и «нанофракций», сорбированных угольными коллекторами.

До начала ОМР экспериментально были подобраны оптимальные процедуры опробования, обеспечивающие требуемый уровень достоверности и воспроизводимости результатов. Аналитические исследования выполнялись в лаборатории изотопных методов анализа с использованием инструкций [5, 7] и аппаратуры: «Ortec Octete/Ocpl-U0600-PPS230» (США), «Berthold LB-770» (Германия), «УМФ-2000М» (Россия). Получение, обработка и анализ данных КСО проведены Анной Несмеяновой. Масс-спектральный анализ выполнен сотрудниками ФГБУ «ВИМС» Б.Г. Кареповым и Д.В. Григорьевым (методика НСАМ 499-АЭС/МС, «Elan-6100», США).

Результаты и их обсуждение

Месторождение Юго-Западное (слабо проявленное). Рудные тела фиксируются контрастными аномалиями общей альфа-активности проб растительности, а также менее интенсивными коррелирующими между собой атмогеохимическими аномалиями рудных компонентов (U, Mo) или элементов-спутников (As, Bi). На профиле 120 также отмечено слабое повышение содержания радиогенного ^{206}Pb в «нанофракциях» (при фоновых значениях $^{207}Pb/^{206}Pb$) непосредственно над рудной зоной, а также по ее периферии (рис. 1). Выявленные интенсивные аномалии МП ($^{210}Po\times^{210}Pb$) отражают пространственное положение оруденения, но в большей мере тяготеют к его периферии, что, возможно, связано с активным притоком радона по ослабленным (разуплотненным) зонам.

Месторождение Южно-Широндукуйское (скрытое). На профиле 164 рудные зоны фиксируются комплексными атмогеохимическими аномалиями элементов-индикаторов (U, Mo, As, Bi) разной интенсивности, пространственно коррелирующими с областями повышенной альфа-активности в пробах растительности и МП ($^{210}Po\times^{210}Pb$), см. рис. 2. Контрастные ореолы «аномального» радиогенного свинца (^{206}Pb, $^{207}Pb/^{206}Pb$) установлены непосредственно над основной рудной зоной (пикеты 60–90), а также справа от нее (122–120), где они частично «перекрываются» аномалиями Mo и МП ($^{210}Po\times^{210}Pb$). На «безрудном» профиле 159 распределение био- и атмогеохимических индикаторов (кроме Mo) не имеет четко выраженных коррелирующих максимумов; в левой краевой части профиля выявлена протяженная аномалия Mo в «нанофракциях».

При площадных ОМР 2021 г. установлено, что одна из аномалий МП=$^{210}Po\times^{210}Pb$ приходится на восточный край проекции залежи, другие аномалии пространственно коррелируют с выходами коренных пород (андезитов). «Породные» аномалии МП разбракованы путем нормирования на показания наземной гамма-спектрометрической съемки по U(Ra). Отмечены аномалии Mo в «нанофракциях», большей частью приходящиеся на проекцию оруденения.

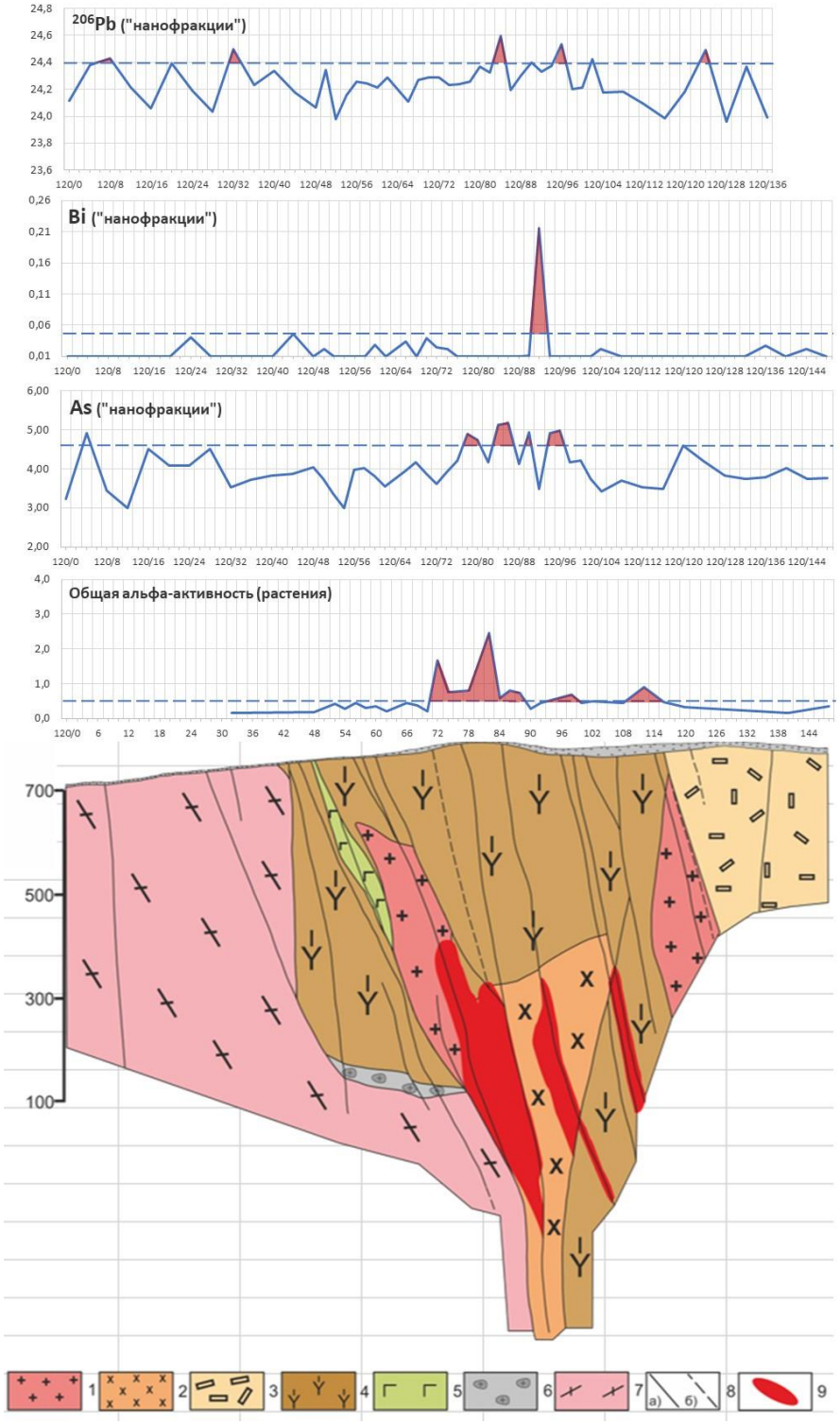


Рис. 1. Месторождение Юго-Западное:
пр. 120, сверху вниз: ^{206}Pb (%), Bi и As (мг/л) в «нанофракциях»; общая альфа-активность (Бк) в растительности; геологический разрез: 1 – липариты мелкопорфировые; 2 – сиенит-порфиры, граносиенит-порфиры, сиениты, сиенито-диорит-порфиры; 3 – липариты мелко- и крупновкрапленниковые; 4 – липариты флюидальные стекловатые; 5 – андезито-базальты и базальты с горизонтами конгломератов; 6 – базальные валунные конгломераты и конглобрекчии, гравелиты, песчаники с обуглившимися растительными остатками; 7 – граниты средне- и крупнозернистые порфировидные лейкократовые и биотитовые; 8 – тектонические нарушения (а – установленные, б – предполагаемые); 9 – установленные рудные тела

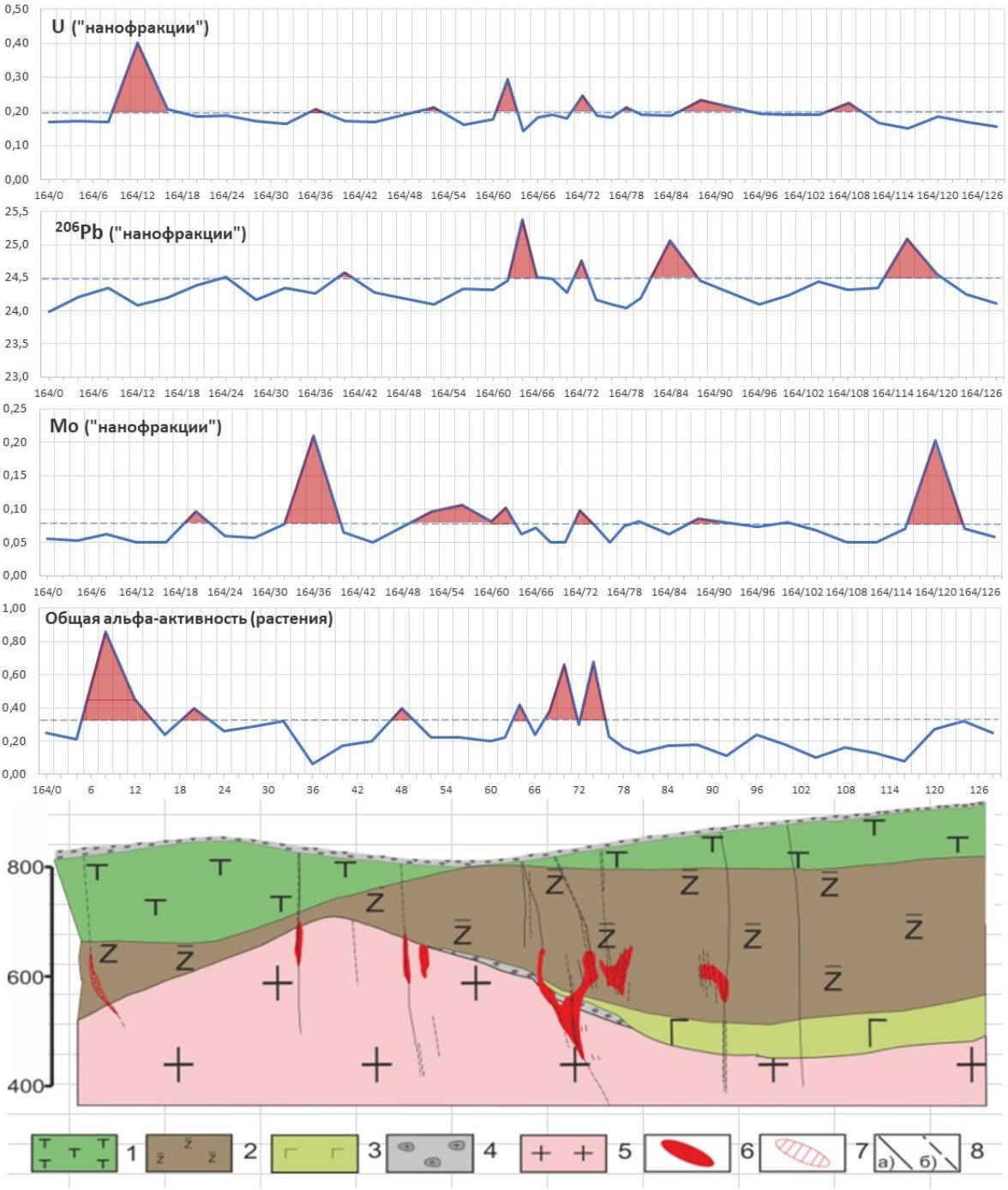


Рис. 2. Месторождение Южно-Широндукуйское:
пр. 164, сверху вниз: U (мг/л), ^{206}Pb (%), Mo (мг/л) в «нанофракциях»; общая альфа-активность (Бк) в растительности; геологический разрез: 1 – андезиты массивные и миндалекаменные, их лавовые брекчии с горизонтами мелкогалечных конгломератов; 2 – трахидациты полосчато-флюидальные; 3 – андезито-базальты и базальты с горизонтами конгломератов; 4 – базальные валунные конгломераты и конглобрекчии, гравелиты, песчаники с обуглившимися растительными остатками; 5 – граниты средне- и крупнозернистые порфировидные лейкократовые и биотитовые; 6 – установленные рудные тела; 7 – предполагаемые рудные тела; 8 – тектонические нарушения (а – установленные, б – предполагаемые)

Месторождение Столбовое (скрытое, в пределах участка). По результатам почвенного опробования выявлено слабое повышение показателя МП (^{210}Po×^{210}Pb) над рудной зоной – вблизи скважин С18-С25 (анализ и интерпретация были затруднены в связи с неполнотой данных ИПМ), см. рис. 3. Над оруденением (скважины С18-25, С1) фиксируются совпадающие биогеохимические аномалии при наиболее высокой контрастности ореолов альфа-активности и ^{210}Po×^{210}Pb в ветках ели и березы. Для всех исследованных видов и частей растений четко проявлен рост общей альфа-активности в трехнедельном временном интервале, что указывает на присутствие в них ^{226}Ra и накопление его дочерних продуктов распада. Масс-спектральным анализом выявлены низкоинтенсивные надрудные биогеохимические аномалии урана и других элементов (рис. 3).

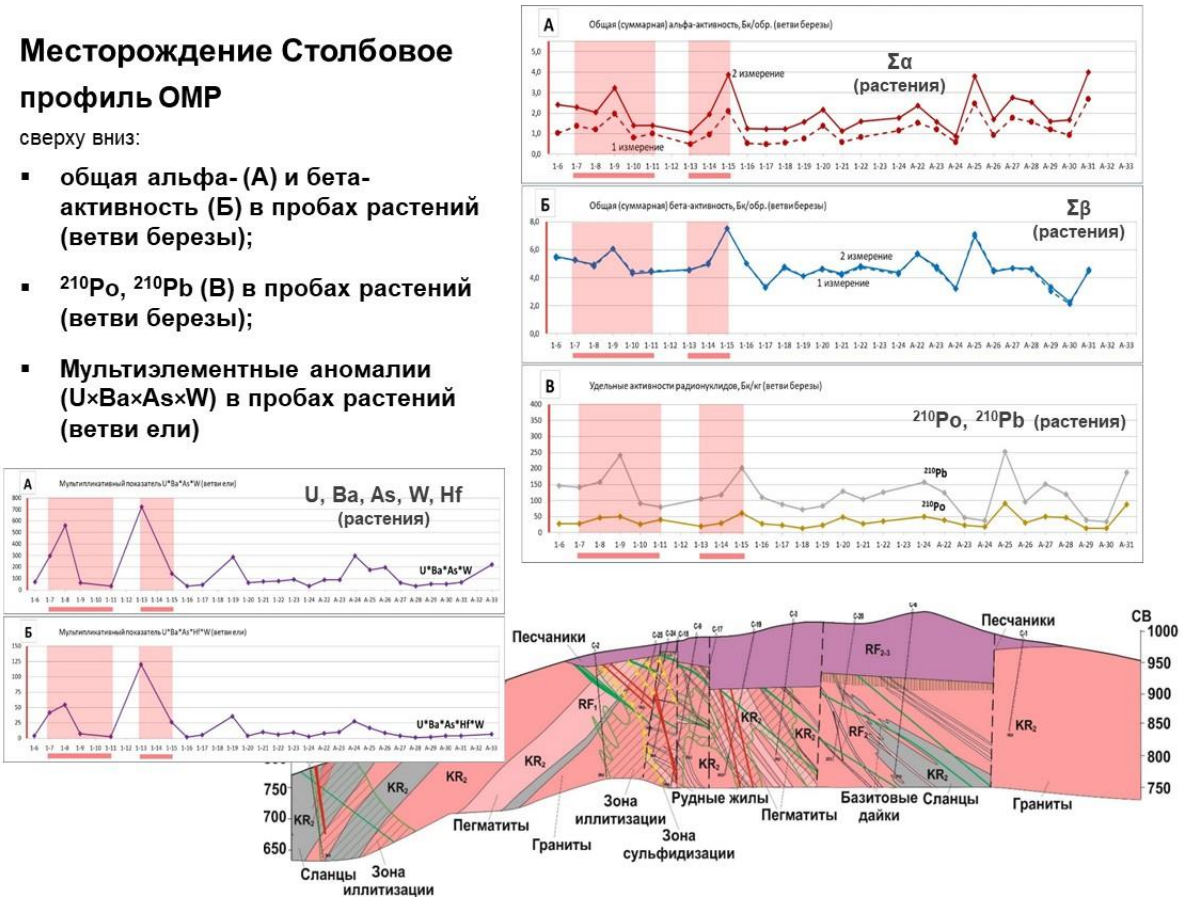


Рис. 3. Месторождение Столбовое: геологический разрез по профилю ОМР и результаты биогеохимических исследований с определением общих альфа- и бета-активностей, удельных активностей ^{210}Po, ^{210}Pb и концентраций микроэлементов

Месторождение Тетрахское (скрытое). В пределах участка ОМР установлены аномалии МП (^{210}Po×^{210}Pb), приуроченные преимущественно к периферии проекции рудной залежи (рис. 4). На профиле 42 над основной рудной залежью или вблизи нее наблюдаются слабые аномалии ^{234}U, ^{238}U и (^{234}U×^{234}U)/^{238}U, повышенные содержания U в «нанофракциях», сорбированных газовыми коллекторами, и контрастные аномалии общей

альфа-активности в пробах коры лиственницы (рис. 5). По периферии проекции оруденения установлены повышенные концентрации Pb и значения отношения U/Th в «нанофракциях». На других профилях, относящихся к рудной зоне, фиксируются протяженные интенсивные аномалии U (U/Th) и Pb в «нанофракциях», пространственно коррелирующие с ореолами повышенных значений МП (^{210}Po×^{210}Pb). Отмечается существенное понижение контрастности биогеохимических аномалий с уменьшением продуктивности залежей.

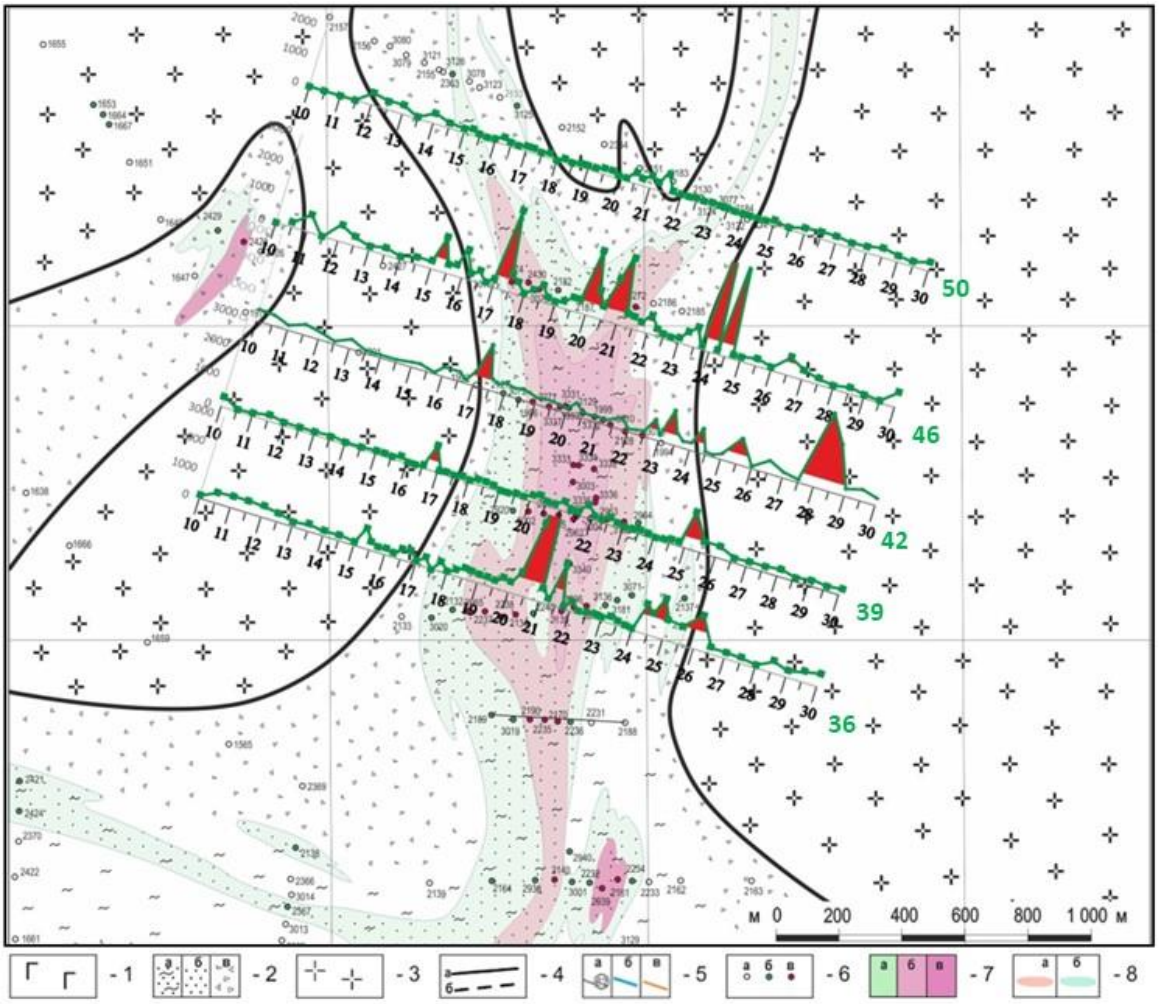


Рис. 4. Месторождение Тетрахское: МП (^{210}Po×^{210}Pb) на геологической основе со снятым чехлом базальтов (по данным Сосновского ПГО).

1 – вулканогенные породы; 2 – осадочные образования: а – руслово-пойменные (алевриты, пески, глины); б – русловые (пески, галечники); в – пролювиально-делювиальные (дресвяники, хлидолиты, пески); 3 – гранитоиды витимканского интрузивного комплекса; 4 – тектонические нарушения: а – установленные; б – предполагаемые; 5 – линии профилей: а – разведочные; б – ОМР 2018 г.; в – ОМР 2019 г.; 6 – скважины колонкового бурения: а – безрудные; б – забалансовые; в – балансовые; 7 – продуктивность урановорудных залежей: а – менее 1,5 кг/м; б – 1,5 кг/м; в – более 10 кг/ м; 8 (на геологических разрезах на рис. 5, 6) – рудные тела с содержаниями урана: а – >0,01%, б – <0,01%

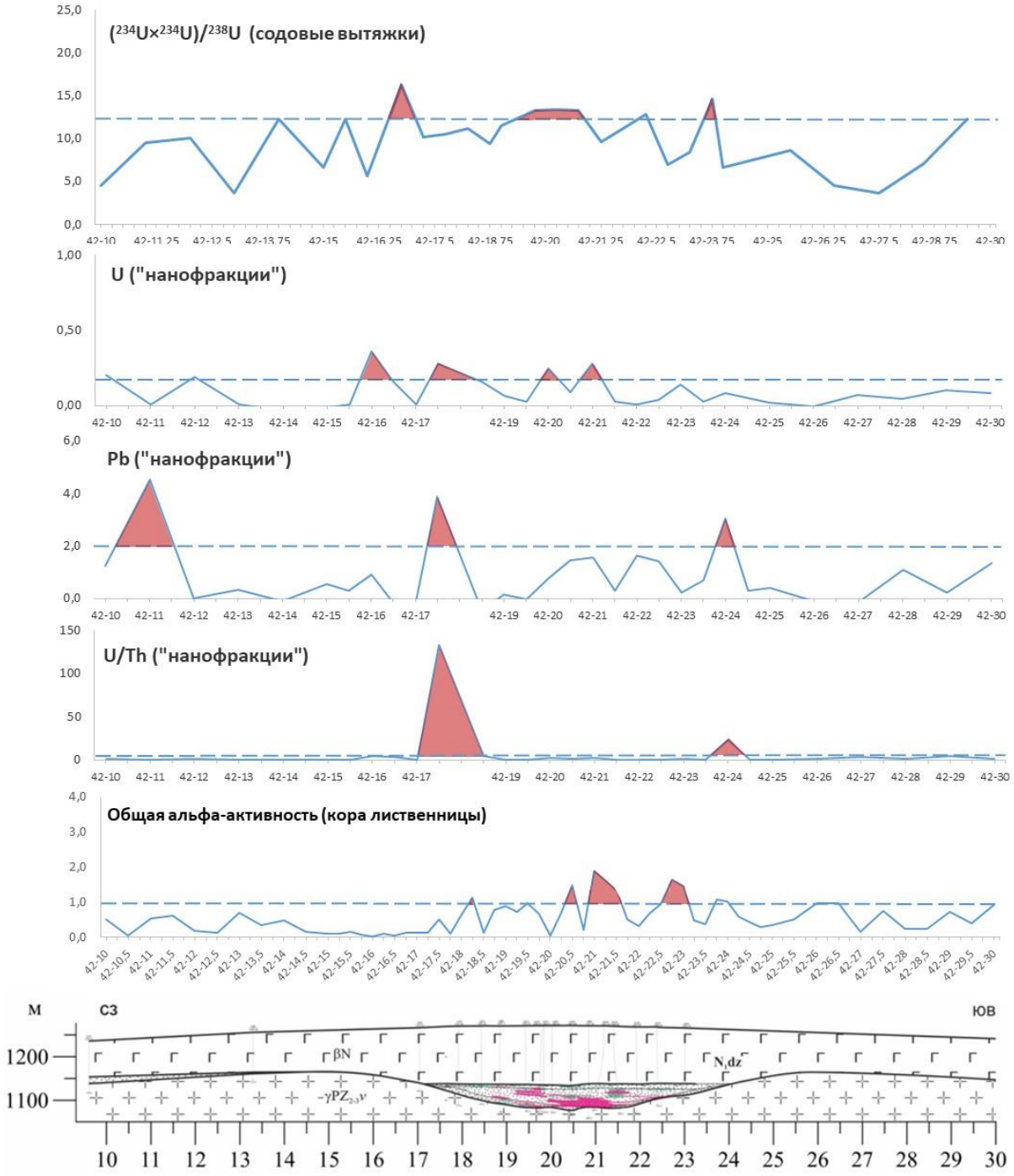


Рис. 5. Месторождение Тетрахское: профиль 42, сверху вниз: ($^{234}U\times^{234}U)/^{238}U$ в содовых вытяжках, U, Pb, U/Th (мг/л) в «нанофракциях»; общая альфа-активность в пробах коры лиственницы; геологический разрез: обозначения см. рис. 4

На «безрудном» профиле 70, расположенном выше профиля 50, распределение ^{234}U, ^{238}U и показателя ($^{234}U\times^{234}U)/^{238}U$ в содовых вытяжках практически повторяет вариации в целом повышенного радиометрического фона (по-видимому, это объясняется поверхностным рассеянием мелкообломочной фракции гранитоидов), аномалии «нанофракций», сорбированных угольными коллекторами, не выявлены.

Над рудной частью палеодолины U, а также Co, Cs и Tl образуют контрастные положительные аномалии (метод КСО), четко фиксирующие с поверхности положение погребенного рудного тела (рис. 6). Над безрудной частью палеодолины содержания U постепенно уменьшаются с запада на восток и не образуют повышенных концентраций над палеодолиной. Аномальные содержания Co, Cs и Tl приурочены к областям выклинивания палеодолины и связаны здесь, вероятно, со структурным рисунком площади (с разрывными нарушениями, по которым в неогеновое время закладывалась речная сеть).

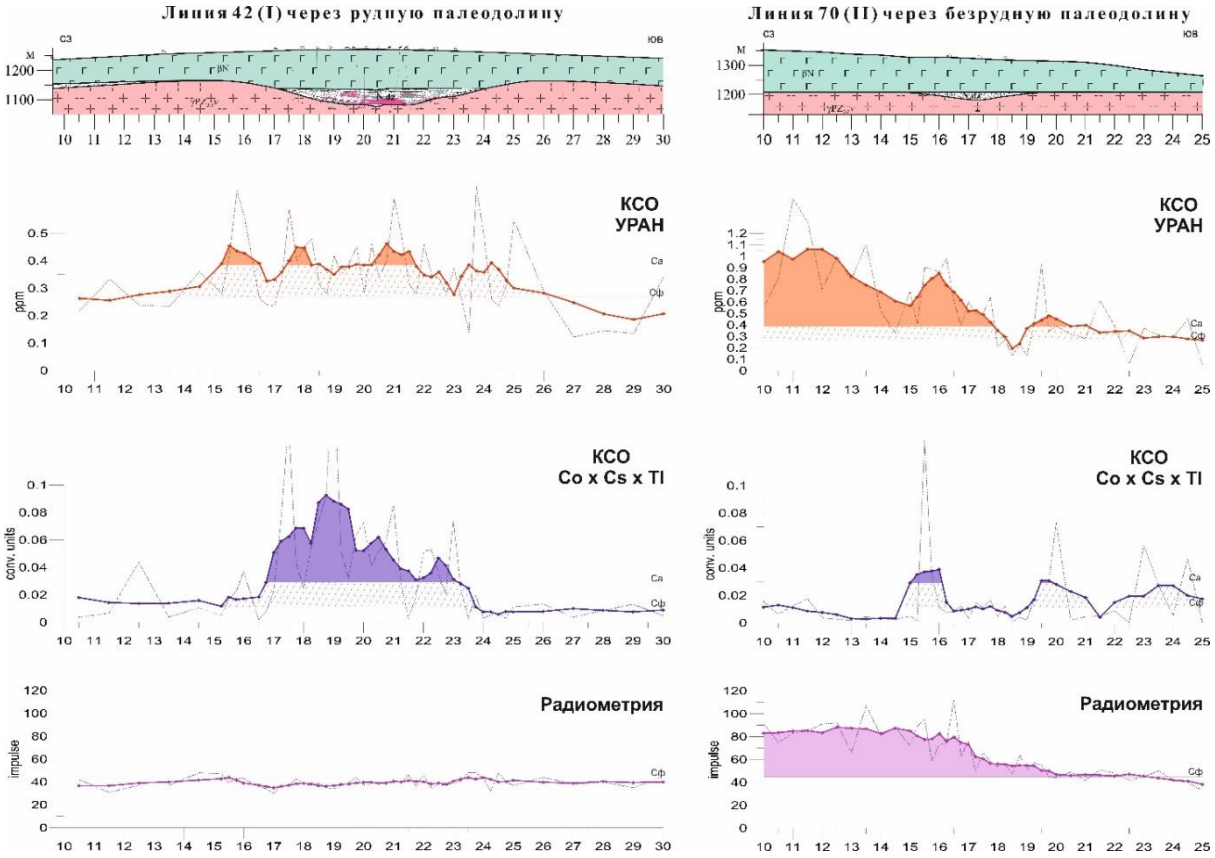


Рис. 6. Результаты метода КСО и наземной радиометрической съемки на месторождении Тетрахское (осреднение «скользящим окном» по 5 точкам); геологический разрез: обозначения см. рис. 4

При обработке данных метода КСО предпринята попытка учета доли фонового металла через совместное рассмотрение содержаний U и интенсивности поверхностного гамма-излучения. Вычисление нормализованной разности этих двух величин позволило сохранить «полезный сигнал» от погребенного месторождения на рудном профиле и нивелировать вариации содержаний урана на безрудном профиле. Полученные результаты хорошо согласуются и с полевыми наблюдениями – в районе безрудного профиля в элювиально-делювиальных отложениях помимо базальтов, также присутствуют перемещенные обломки высокорадиоактивных гранитоидов

витимканского комплекса, традиционно рассматривающихся как источник урана для месторождений Витимского УРР.

Выводы

Результаты ОМР в целом укладываются в сложившиеся представления о механизмах формирования над скрытыми и слабопроявленными рудными телами поверхностных наложенных ореолов рассеяния, выявляемых методами с частичным извлечением элементов. Среди особенностей этих ореолов [5, 8]: соответствие элементного состава ореолов вещественному составу руд, приуроченность к проекции концевых частей рудных тел на дневную поверхность, «отклик» на сопряженные структурно-тектонические элементы земной коры.

Наиболее эффективным индикатором скрытого оруденения уран-молибденового типа и типа «несогласия» является общая альфа-активность биогеохимических проб. Интенсивные контрастные аномалии проявлены почти над всеми рудными телами, количество ложных сигналов минимально, метод прост в реализации, не требует использования дорогостоящего оборудования, может применяться практически в любых природных обстановках. Может быть полезно комплексирование со стандартным опробованием ИПМ и определением элементов-спутников урана в «нанофракциях», сорбированных угольными коллекторами. Для оценки рудных концентраций (т.е. выделения наиболее перспективных участков) может быть привлечен анализ отношений радиогенного свинца в «нанофракциях». На месторождениях палеодолинного типа биогеохимическое опробование следует комплексировать с ИПМ с определением изотопных отношений подвижного урана и/или урана в «нанофракциях». Также эффективно картирование сорбционно-солевых ореолов (КСО) с определением подвижного урана и индикаторных элементов (Co, Cs, Tl). Наземная радиометрическая съемка необходима для отбраковки поверхностных аномалий, не связанных с оруденением (тот же результат дает определение ^{222}Rn в угольных коллекторах). Следующий шаг в совершенствовании технологий опробования может быть сделан в направлении повышения стабильности, сопоставимости и воспроизводимости аналитических результатов, снижения пределов определения используемых методов. Краевые аномалии необходимо интерпретировать на основе поисковых моделей в комплексе с другими геохимическими и геофизическими признаками.

Литература

1. Бахур А.Е., Коноплев А.Д., Зуев Д.М. и др. Изотопно-почвенный метод и его современные модификации при поисках слепого уранового оруденения // Разведка и охрана недр. – 2011. – № 1. – С. 52–59.

2. Бахур А.Е., Овсянникова Т.М., Мануилова Л.И. и др. Радиоизотопные методы при поисках и оценке инфильтрационных месторождений урана в Южном Казахстане // Информационный сборник: Материалы по геологии, поискам и разведке

месторождений урана, редких и редкоземельных металлов. – М.: РИС ВИМС. – 2015 – Выпуск 159 – С. 363–377.

3. Гольдберг И.С., Абрамсон Г.Я. Реплики глубокозалегающих рудосодержащих геохимических полярных систем в закрытых районах. Новое в поисковой геохимии // Материалы международной научно-практической конференции «Бекжановские чтения», 16–17 марта, 2017 г., Алматы, Республика Казахстан, с. 144–152.

4. Гольдберг И.С., Алексеев С.Г. Источники урана месторождений Стрельцовской группы (Забайкалье) // Геология и охрана недр, 2018, № 1 (66), с. 14–21.

5. Духанин А.С., Алексеев С.Г., Сенчина Н.П. Структура струйных ореолов рассеяния глубокозалегающих месторождений Рудного Алтая // Региональная геология и металлогения, 2019, № 80, с. 75–94.

6. Инструкция по применению изотопно-геохимических методов с частичной экстракцией при поисках скрытых и слабопроявленных месторождений урана / (редакция 2). – ФГБУ «ВИМС». – 2018.

7. Инструкция по применению биогеохимических методов при поисках скрытых и слабопроявленных месторождений урана (редакция 2). – ФГБУ «ВИМС». – 2018.

8. Cameron E.M., Hamilton S.M., Leybourne M.I. et al. Finding deeply buried deposits using geochemistry. URL: https://www.researchgate.net (дата обращения: 06.10.2021).

9. Cao J.J., Hu X.Y., Jiang Z.T., Li H.W., Zou X.Z. Simulation of adsorption of gold nanoparticles carried by gas ascending from the Earth's interior in alluvial cover of the middle–lower reaches of the Yangtze River. 2010. URL: https://onlinelibrary.wiley.com (дата обращения: 08.04.2021).

10. Cao J.J., Li Y.K., Jiang T., Hu G. Sulfur-containing particles emitted by concealed sulfide ore deposits: an unknown source of sulfur-containing particles in the atmosphere. 2015. URL: https://www.researchgate.net (дата обращения: 08.04.2021).

11. Carlson W.R. Heavy Minerals in Soils from the Athabasca Basin and the Implications for Exploration Geochemistry of Uranium Deposits at Depth. 2016. URL: https://qspace.library.queensu.ca (дата обращения 08.04.2020).

12. Cohen D.R., Kelley D.L., Anand R., Coker W.B. Major Advances in Exploration Geochemistry, 1998–2007 // Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration, 2007, p. 3–18.

13. Dunn, C.E. Biogeochemistry in mineral exploration / C.E. Dunn // Handbook of exploration and environmental geochemistry 9 / Series editor M. Hale / ELSEVIER, 2007.

14. Geosphere-Biosphere Orientation Study over the Cigar West Unconformity Uranium Deposit in the Athabasca Basin of Northern Saskatchewan. Final Report / G. Drever et al. / Uravan Minerals Inc., Athabasca Basin, Saskatchewan, July, 2010.

15. Hamilton S.M. Major Advances in Soil Geochemical Exploration Methods for Areas of Thick Glacial Drift Cover URL: https://www.dmec.ca (дата обращения: 06.10.2021).

16. Holk G.J., Kyser T.K., Chipley D. et al. Mobile Pb-isotopes in Proterozoic sedimentary basins as guides for exploration of uranium deposits. 2003. URL: https://www.researchgate.net (дата обращения 08.04.2020).

17. Hu G., Cao J.J., Hopke P.K., Holub R.F. Study of carbon-bearing particles in ascending geogas flows in the Dongshengmiao polymetallic pyrite deposit, Inner Mongolia, China. 2015. URL: https://www.researchgate.net (дата обращения 08.04.2020).

18. Hu G., Cao J.J., Lai P.X. Characteristics and geological significance of particles on fractures from the Dongshengmiao polymetallic pyrite deposit, Inner Mongolia, China. 2015. URL: https://www.researchgate.net (дата обращения 08.04.2020).

19. Jiang T., Cao J., Wu Z. et al. A TEM study of particles carried by ascending gas flows from the Bairendaba lead–zinc deposit, Inner Mongolia, China. 2018. URL: https://www.researchgate.net (дата обращения: 08.04.2021).

20. Kyser K., Lahusen L., Drever, G. et al. Using Pb Isotopes in Surface Media to Distinguish Anthropogenic Sources from Undercover Uranium Sources. 2015. URL: https://www.sciencedirect.com (дата обращения: 08.04.2021).

21. Mann A.W. Ligand Based Soil Extraction Geochemistry. URL: https://www.sgs.com (дата обращения: 06.10.2021).

22. Zhang B., Han Z., Wang X. et al. Metal-Bearing Nanoparticles Observed in Soils and Fault Gouges over the Shenjiayao Gold Deposit and Their Significance. 2019. URL: https://www.mdpi.com (дата обращения 08.04.2020).

РОЛЬ ВИЗУАЛЬНОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ПРИ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТАХ НА ПРИМЕРЕ ГОР БУКАНТАУ

В.А. Салихов, С.С. Собиров
Госкомгеологии РУз, г. Ташкент, Республика Узбекистан

Дешифровочные признаки – свойства объектов, которые прямо или косвенно находят отображение на снимках и обеспечивают распознавание объектов.

Дешифровочные признаки делятся на прямые и косвенные. Использование дешифровочных признаков составляет основу визуального дешифрирования снимков, которое, наряду с измерениями, представляет собой основной метод извлечения информации со снимков (рис. 1).

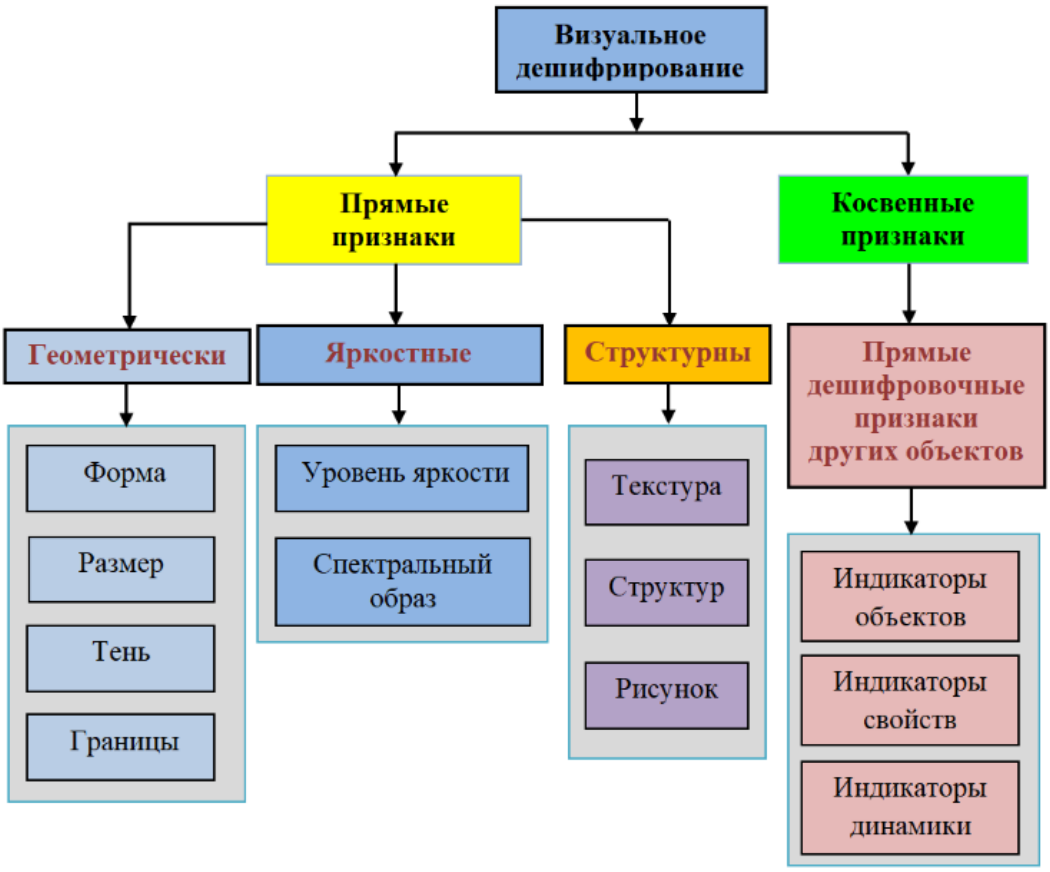


Рис. 1. Схема визуального дешифрирования по 2 видам признаков (по Э.К.Баррет, Л.Ф. Куртис)

Прямые дешифровочные признаки позволяют распознать объекты, изобразившиеся на снимке, однако по ним не всегда удается определить их свойства, то есть интерпретировать их, а также картографировать объекты, не изобразившиеся на снимках, изучать процессы и явления. Для этого используются косвенные дешифровочные признаки, методологической

основой применения которых служит наличие взаимосвязей и взаимообусловленности всех природных и антропогенных свойств территории. В качестве косвенных признаков обычно выступают прямые дешифровочные признаки других объектов–индикаторов. Среди них выделяют: индикаторы объектов, не изобразившихся на снимках; индикаторы свойств объектов; индикаторы движения или изменений.

Индикационное дешифрирование, предусматривающее определение одних компонентов ландшафта по другим, легко опознаваемым на снимке, т.е. индикаторам – распространенный прием визуального географического дешифрирования.

Морфометрическое дешифрирование выполняется, используя измерения формы объектов, определение количественных статистических показателей распределения объектов массового распространения, особенности рисунка изображения. Количественные характеристики ландшафтных рисунков изучаются для разработки на их основе компьютерных алгоритмов морфометрического ландшафтного дешифрования.

Дешифровочные признаки были сформулированы применительно к дешифрированию аэрофотоснимков, но большинство их них сохраняет значение при работе с космическими снимками, в том числе при получившем широкое распространение визуальном дешифрировании цифровых снимков на экране компьютера [1].

На территории исследования выявлены многочисленные эталонные участки для визуального дешифрирования.

Одной из главных особенностей геологического строения домезозойских образований гор Букантау является наличие на их территории большого количества разломов, различающихся по пространственной ориентировке, размерам, глубине проникновения, времени заложения и активизации [2, 3].

В качестве косвенных признаков обычно выступают прямые дешифровочные признаки других объектов, называемых индикаторами. Интерпретировать изобразившийся на снимке объект можно по его географической приуроченности, местоположению.

Ниже приведены результаты визуального дешифрирования линейных и кольцевых структур на основе видимого диапазона космических снимков сверхвысокого (QuickBird) и мультиспектрального диапазона среднего (Aster) разрешения (рис. 2).

Следует отметить, что в данной работе визуальное дешифрирование космических снимков при геологоразведочных работах гор Букантау позволило составить карту дистанционной основы масштаба 1:50 000.

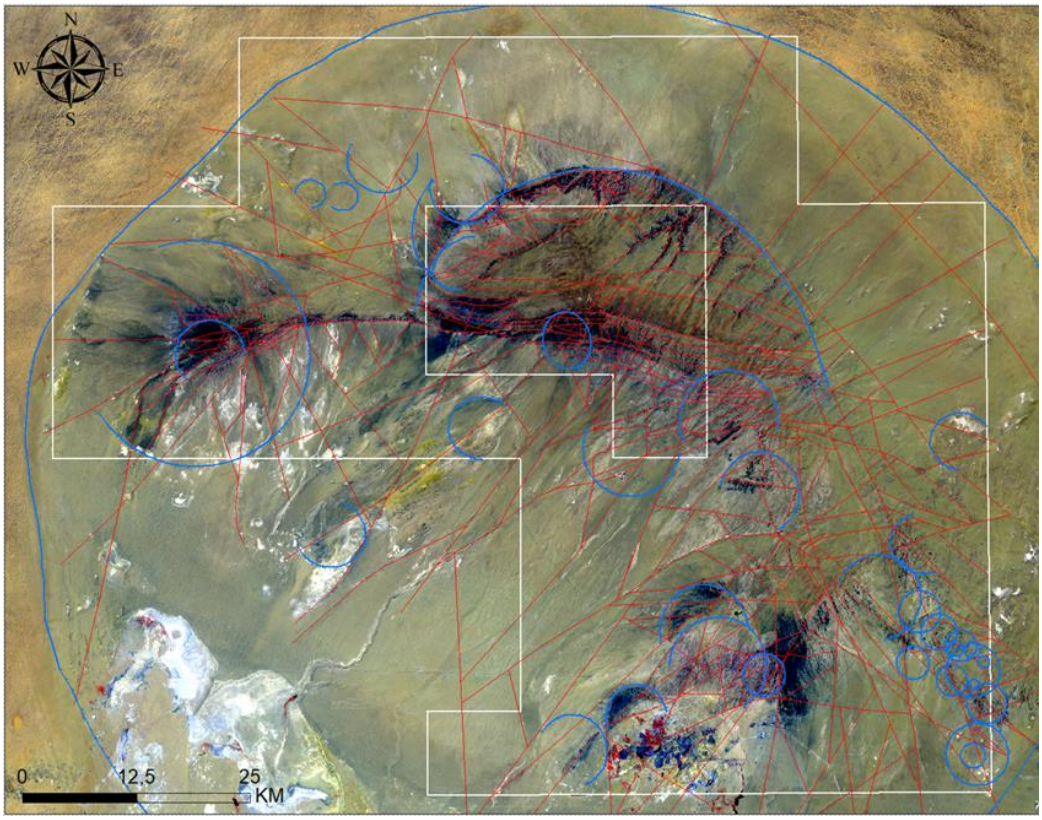


Рис. 2. Линейные и кольцевые структуры по визуальному дешифрированию космических снимков Aster

Литература

1. Сударников В.Н. Геологическое дешифрирование аэрофотоснимков: Методические указания / В.Н, Сударников, О.Н. Калинина – Оренбург: ИПК ГОУб. 2008. – 22 с.

2. Борисов О.М., Глух А.К. Кольцевые структуры и линеаменты Средней Азии. – Ташкент, ФАН. 1982. С. 122-123.

3. Ахмедов Н.А., Воронцов В.И. Закономерности размещения золота и задачи локального прогноза в Южном Букантау / Там же. – С. 182-185.

ТЕХНОЛОГИИ ОСВОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

ОПТИМИЗАЦИЯ СЕТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ОТРАБОТКИ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СКВАЖИННЫМ ПОДЗЕМНЫМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕМ

А.Е. Васюта[1], А.А. Руденко[1], В.В. Данилейко[1], А.В. Гладышев[2]
1 – АО «РУСБУРМАШ», г. Москва,
2 – АО «ВНИПИпромтехнологии», г. Москва

Месторождения урана палеодолинного типа характеризуются неоднородностью распределения рудного материала в породах в пределах выделенных эксплуатационных блоков. При осуществлении добычи урана из таких месторождений способом скважинного подземного выщелачивания (СПВ) эксплуатационные скважины (откачные и закачные) размещаются в контурах блоков по равномерной сети по одной из выбранных схем в зависимости от размеров и морфологии рудных тел. Наиболее популярными являются рядная схема (при ширине рудных тел <100 м) и гексагональная (при ширине рудных тел >100 м).

Неоднородность распределения руды в контурах блоков при равномерной сети эксплуатационных скважин приводит к тому, что различные части блоков отрабатываются с разной интенсивностью. Участки с низкой продуктивностью отрабатываются быстрее, чем с высокой. Таким образом, низкопродуктивные участки блоков раньше выводятся из эксплуатации, что приводит к нерациональным затратам как на этапе бурения эксплуатационных скважин, так и в процессе добычи. Однако проектировщики блоков, предназначенных для отработки СПВ, не учитывают неоднородность рудных залежей по продуктивности пласта, что в дальнейшем приводит к негативным последствиям в экономическом плане.

На месторождении Количиканское регулярная рядная схема его вскрытия предусматривает многорядное расположение технологических скважин с расстоянием между рядами разноименных скважин 40 м, расстоянием между откачными скважинами в ряду 25 м, расстоянием между закачными скважинами в ряду 20 м. Примеры размещения технологических скважин приведены для двух блоков, выделенных на месторождении: блок Кл1-1-С1 (рис. 1) и блок Кл1-7-С1 (рис. 2).

Месторождение Количанское, как и другие месторождения палеодолинного типа, характеризуются неоднородностью распределения полезных компонентов по выделенным эксплуатационным блокам. Так средняя продуктивность изменяется по геологическим блокам месторождения от 3,55 до 9,32 кг/м^2, составляя в среднем по месторождению 4,98 кг/м^2 (рис. 3). Распределение средней продуктивности по разведочным скважинам и рудные пересечения показаны на рис. 4.

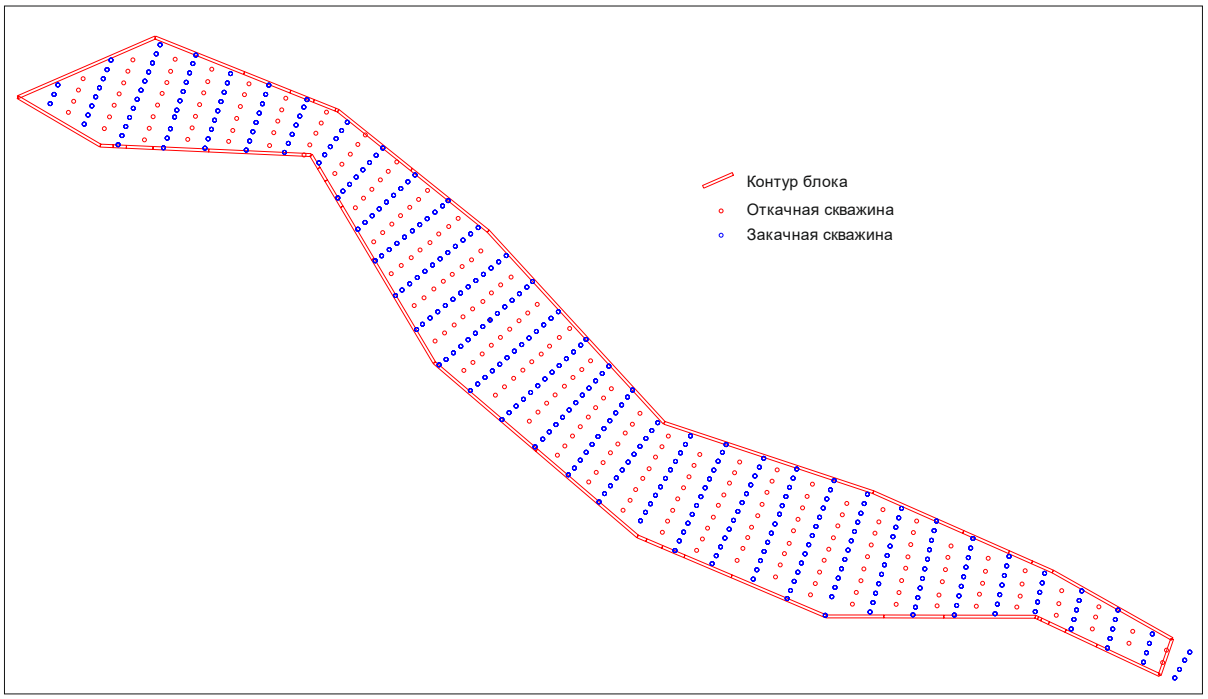


Рис. 1. Проектная схема вскрытия месторождения Количиканское, блок Кл1-1-С1

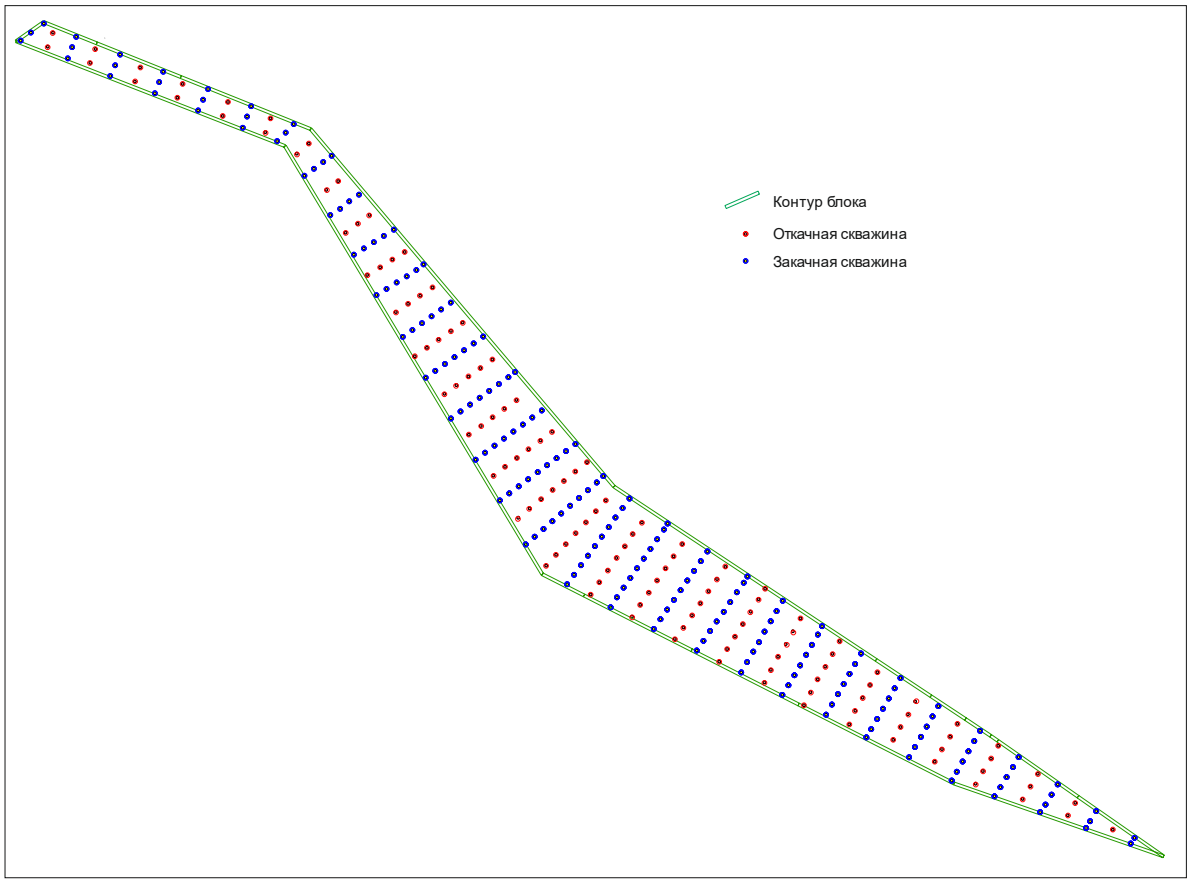


Рис. 2. Проектная схема вскрытия месторождения Количиканское, блок Кл1-7-С1

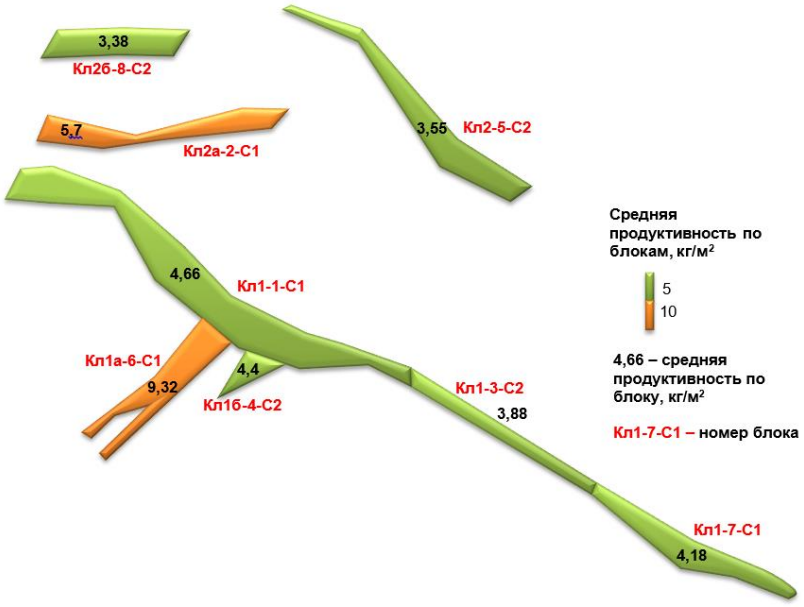


Рис. 3. Распределение средней продуктивности по геологическим блокам

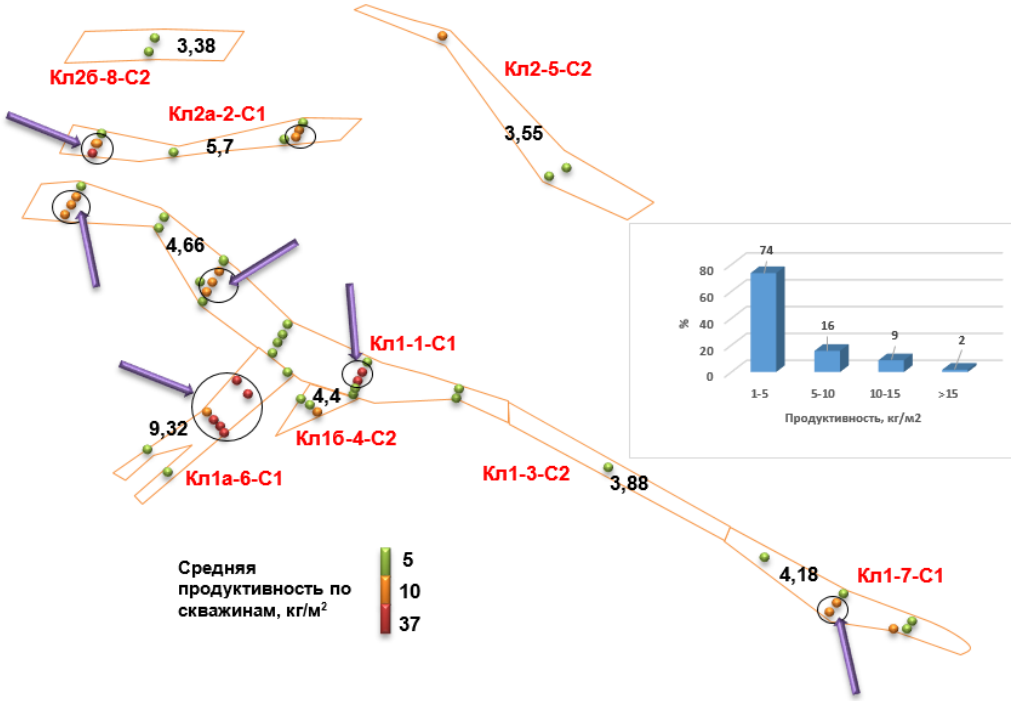


Рис. 4. Распределение средней продуктивности по разведочным скважинам

Для разработки и построения оптимизированной сети эксплуатационных скважин с учетом различной продуктивности отдельных участков блоков в целях обеспечения равномерной добычи по всему блоку и сокращения нерациональных затрат на бурение и добычу были выбраны два блока месторождения урана Количиканское – Кл1-1-С1 и Кл1-7-С1. Ширина блока Кл1-1-С1 на всем его протяжении превышает 100 м, поэтому он выбран для построения гексагональной схемы расположения эксплуатационных скважин. Ширина блока Кл1-7-С1

составляет порядка 100 м, поэтому в его контурах использовалась рядная схема расположения.

Для расчета оптимальных параметров эксплуатационных сетей на основании геофильтрационного и геотехнологического моделирования процесса добычи на Хиагдинском месторождении урана была определена зависимость процента извлечения урана от продуктивности и времени [1]; зависимость времени извлечения урана от продуктивности пласта и межскважинных расстояний определялась для условий месторождений Хиагдинского рудного поля по геотехнологической палетке [2]. Полученные результаты иллюстрируют рис. 5 и 6.

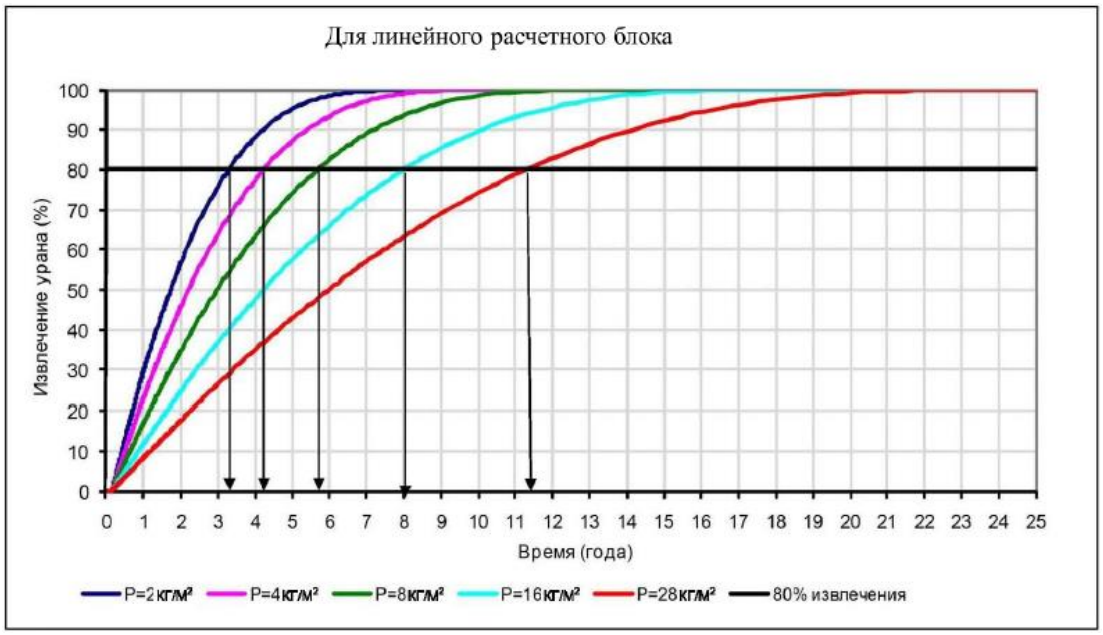


Рис. 5. Зависимость процента извлечения урана от продуктивности и времени

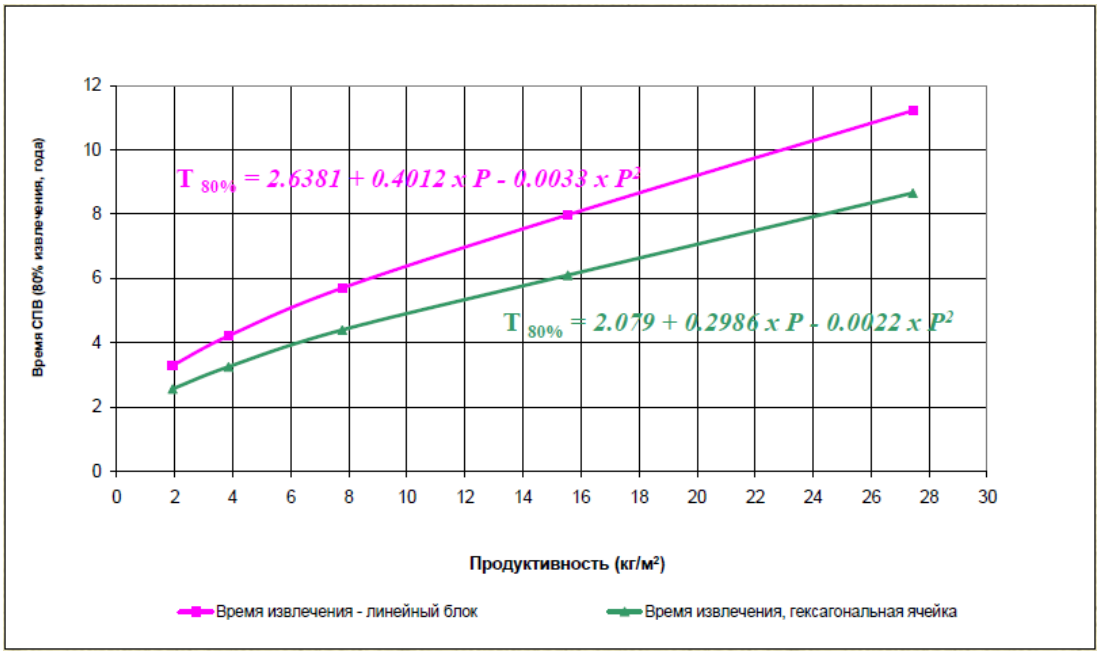


Рис. 6. Зависимость времени 80% извлечения урана от продуктивности залежи

Данные зависимости были использованы для расчета параметров сетей, выполненных для блоков Кл1-1-С1 и Кл-1-7-С1.

Блок Кл1-1-С1

Блок Кл1-1-С1 оконтурен по 26 рудным пересечениям с использованием рекомендованного (ТЭО 2012 г.) радиуса гексагональной ячейки 30 м (см. рис. 4).

В соответствии с установленными зависимостями [1] было рассчитано время отработки для гексагональной ячейки (в зависимости от продуктивности), различные радиусы гексагональной ячейки при условии пропорционального увеличения/уменьшения времени отработки при увеличении/уменьшении радиуса гексагональной ячейки и заданного времени отработки (рис. 7).

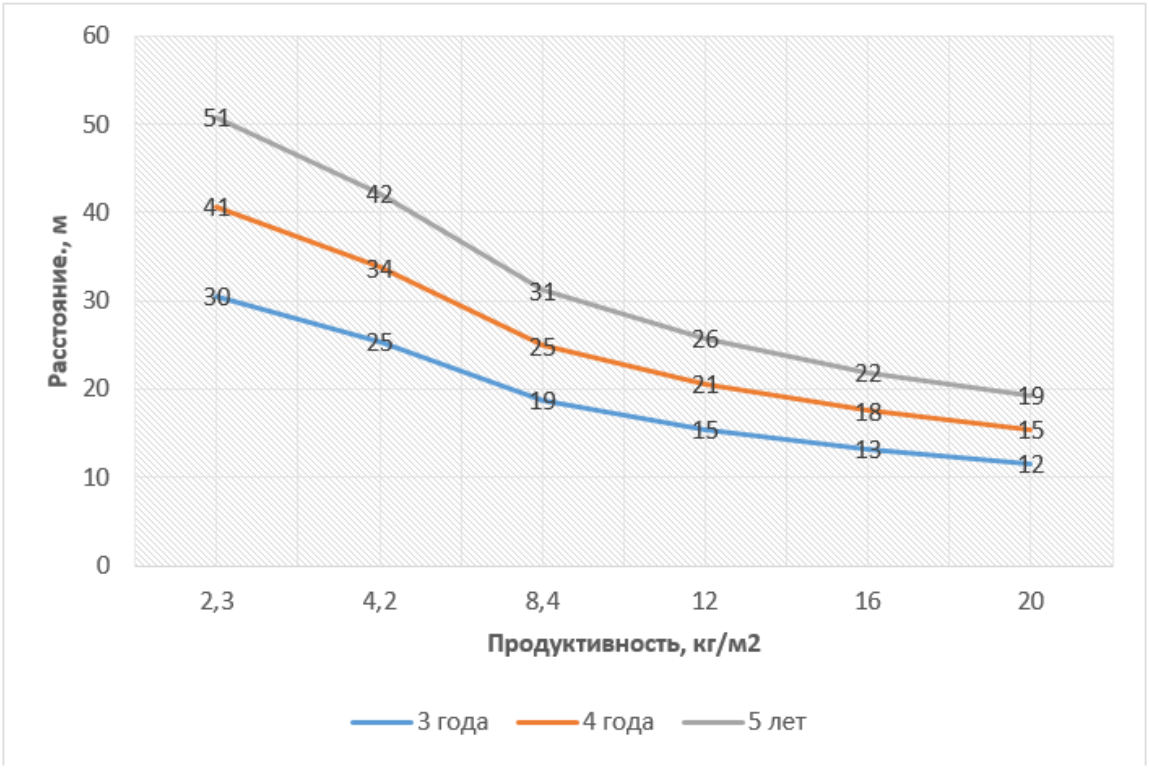


Рис. 7. Радиусы ячеек скважин для гексагональных схем
при различной продуктивности пласта и заданного времени отработки блока

В результате для блока Кл1-1-С1 были построены две сети эксплуатационных скважин:

- регулярная, с одинаковыми гексагональными ячейками радиусом 30 м (рис. 8);
- нерегулярная, с гексагональными ячейками радиусом 26, 35 и 42 м в зависимости от средней удельной продуктивности участка блока (рис. 9).

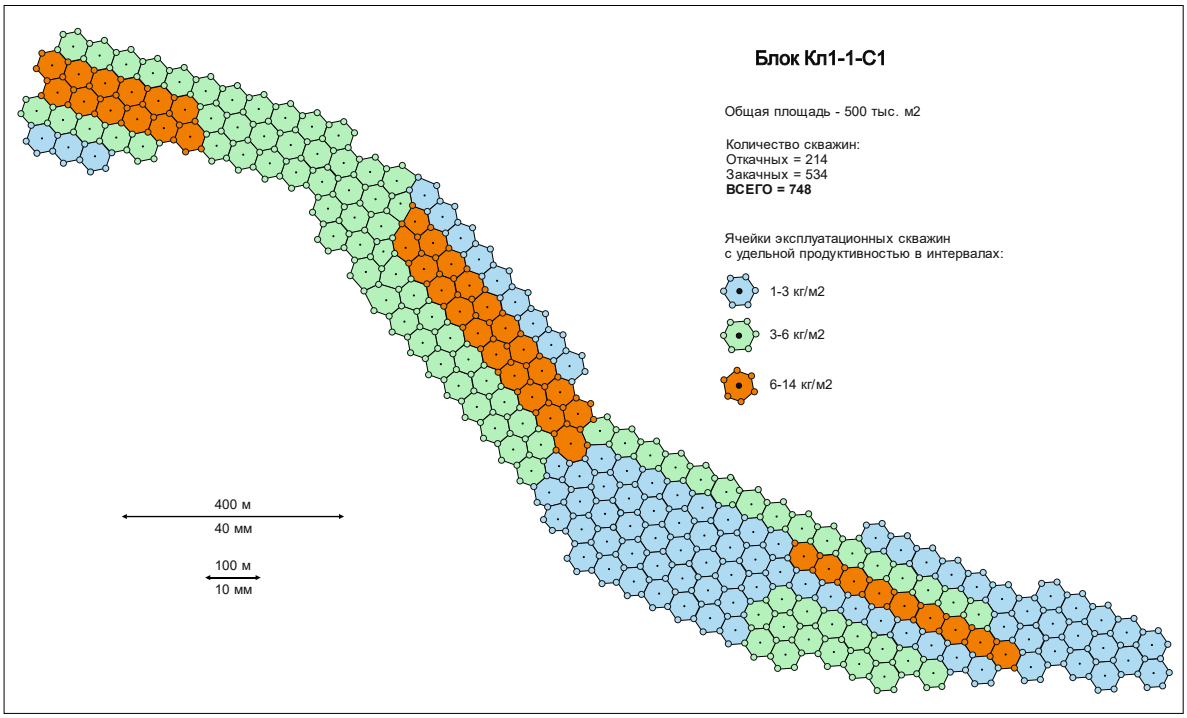


Рис. 8. Блок Кл1-1-С1. Регулярная сеть с гексагональными ячейками

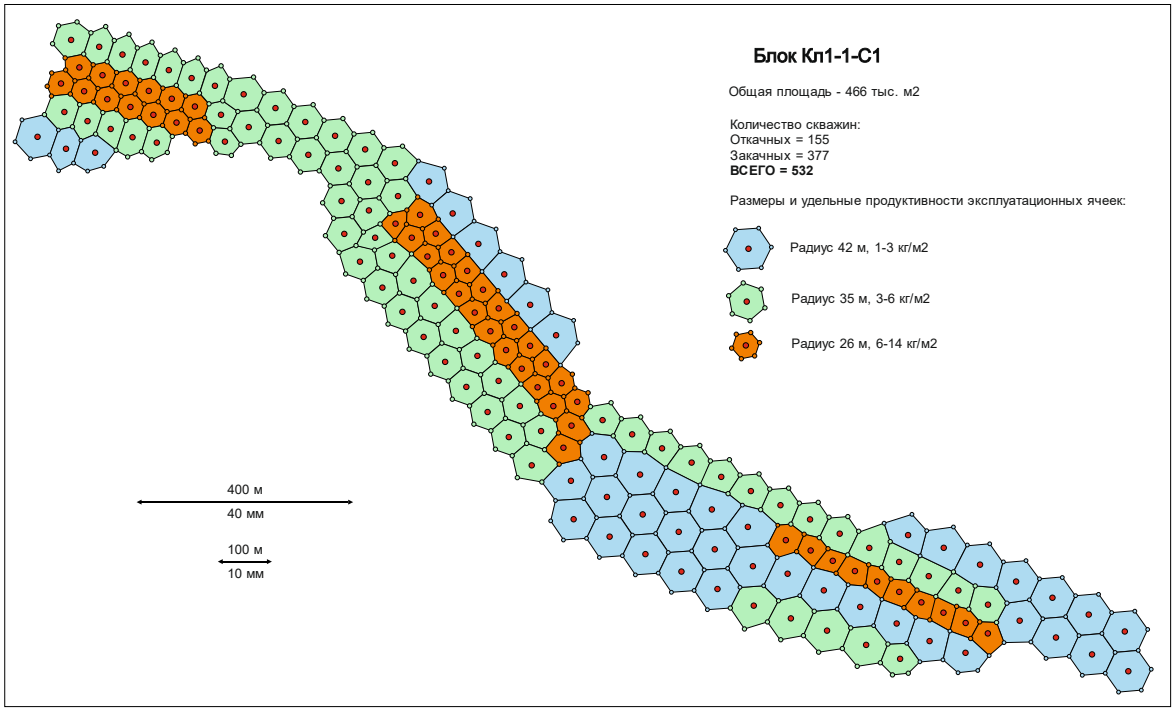


Рис. 9. Блок Кл1-1-С1. Нерегулярная сеть с гексагональными ячейками

Расчетные параметры сетей приведены в табл. 1.

Нерегулярная сеть с учетом продуктивности позволяет сократить общее количество скважин в блоке на 216 штук при использовании гексагональной схемы расположения, что составляет 29% (при снижении площади покрытия на 7%).

Таблица 1

Расчетные параметры регулярной и нерегулярной сетей для гексагональной и рядной схем технологических скважин

Параметры сети	Блок Кл1-1-С1 Гексагональная сеть		Блок Кл1-7-С1 Рядная сеть	
	Регулярная	Нерегулярная	Регулярная	Нерегулярная
Площадь, тыс. м^2	500	466	155	155
Общее кол-во скважин, шт., в т.ч.:	748	532	191	174
- откачных	214	155	57	53
- закачных	534	377	134	121

Блок Кл1-7-С1

Блок Кл1-7-С1 оконтурен по 8 рудным пересечениям (см. рис. 4.)

Для блока Кл1-7-С1 по рекомендованным параметрам рядной схемы расположения эксплуатационных скважин:

- расстояние между рядами, м – 35;
- расстояние между откачными, м – 30;
- расстояние между закачными, м – 15.

Проведены аналогичные расчеты для регулярной и нерегулярной сетей скважин.

Для блока Кл1-7-С1 были построены две сети эксплуатационных скважин:

- регулярная, с одинаковым расстоянием между рядами скважин равным 35 м;
- нерегулярная, с расстояниями между рядами скважин равными 50, 40 и 30 м в зависимости от средней удельной продуктивности участка блока.

Параметры рядной сети приведены в табл. 1. Регулярная сеть показана на рис. 10, нерегулярная сеть – на рис. 11.

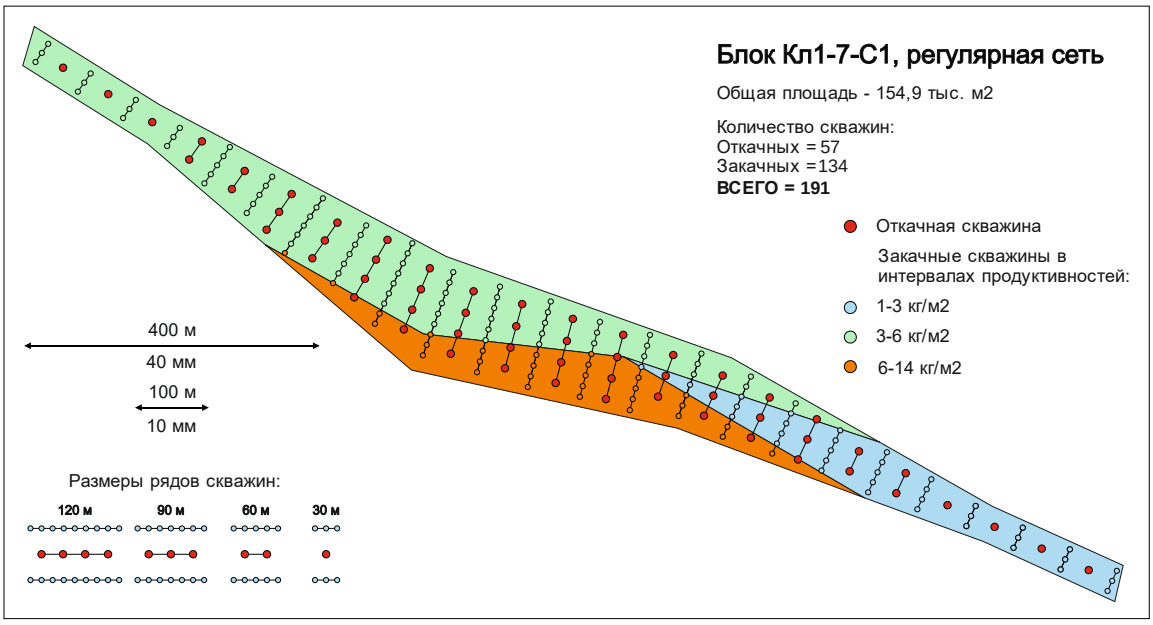


Рис. 10. Блок Кл1-7-С1. Регулярная рядная сеть

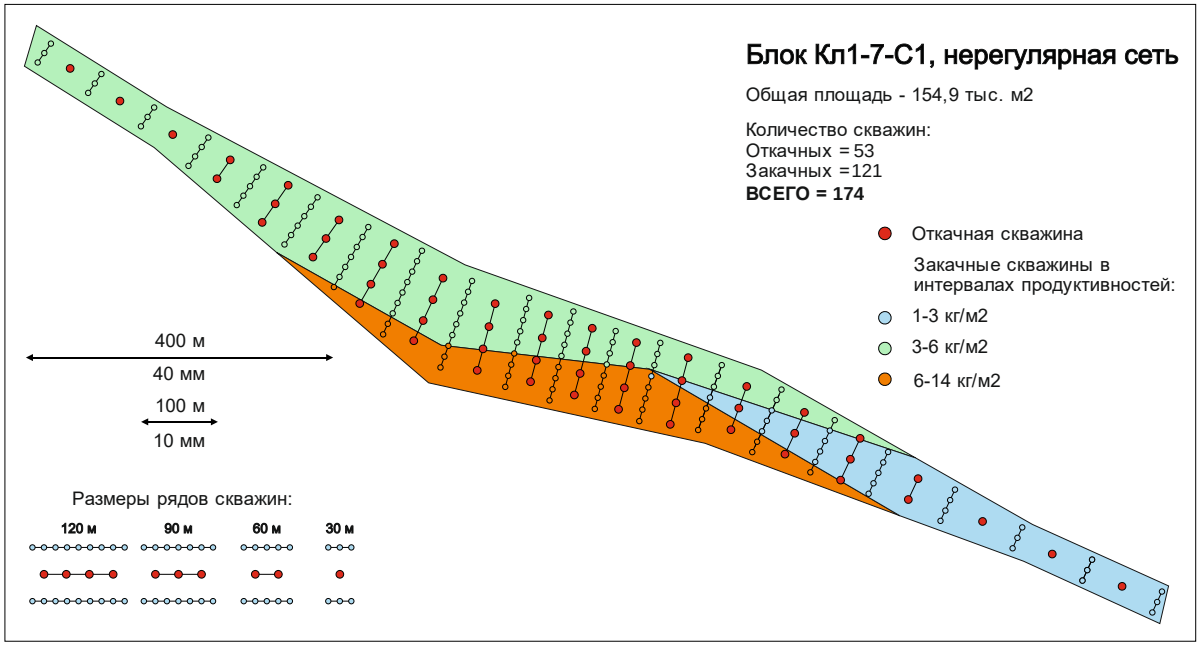


Рис. 11. Блок Кл1-7-С1. Нерегулярная рядная сеть

Применение нерегулярной сети с учетом продуктивности позволяет сократить общее количество скважин в блоке при использовании рядной схемы расположения на 17 шт., что составляет 9% от количества скважин регулярной сети.

Различные расстояния между рядами скважин при условии пропорционального увеличения/уменьшения времени отработки при увеличении/уменьшении расстояния между рядами закачных и откачных скважин и заданного времени отработки приведены на графике (рис. 12).

Учитывая вышеизложенное, предлагается начинать сооружение эксплуатационных блоков не по фиксированной сети, а применять принцип сгущения и разрежения сети с учетом продуктивности по приведенному ниже алгоритму. При этом принимается, что откачные и закачные скважины сооружаются по единой универсальной конструкции. Для целей оптимизации принимаются следующие интервалы значений удельной продуктивности: низкая – <3 кг/м^2, средняя – 3-6 кг/м^2, высокая – >6 кг/м^2.

Предлагается следующий алгоритм бурения эксплуатационных скважин с учетом фактической удельной продуктивности для рядной схемы расположения скважин. Цифры над фрагментами соответствуют номерам по описанию алгоритма (рис. 13).

1. Бурение начинается с центральных участков проектных эксплуатационных блоков, где по данным геологической разведки высокая продуктивность и простое геологическое строение, по сети 160х20 м. Предполагается, что эти ряды (1 и 2) будут **закачными**.

2. Если в процессе бурения очередная скважина вскрывает руду с продуктивностью >6 кг/м^2, то интервал между скважинами сгущается, и следующая скважина бурится через 15 м.

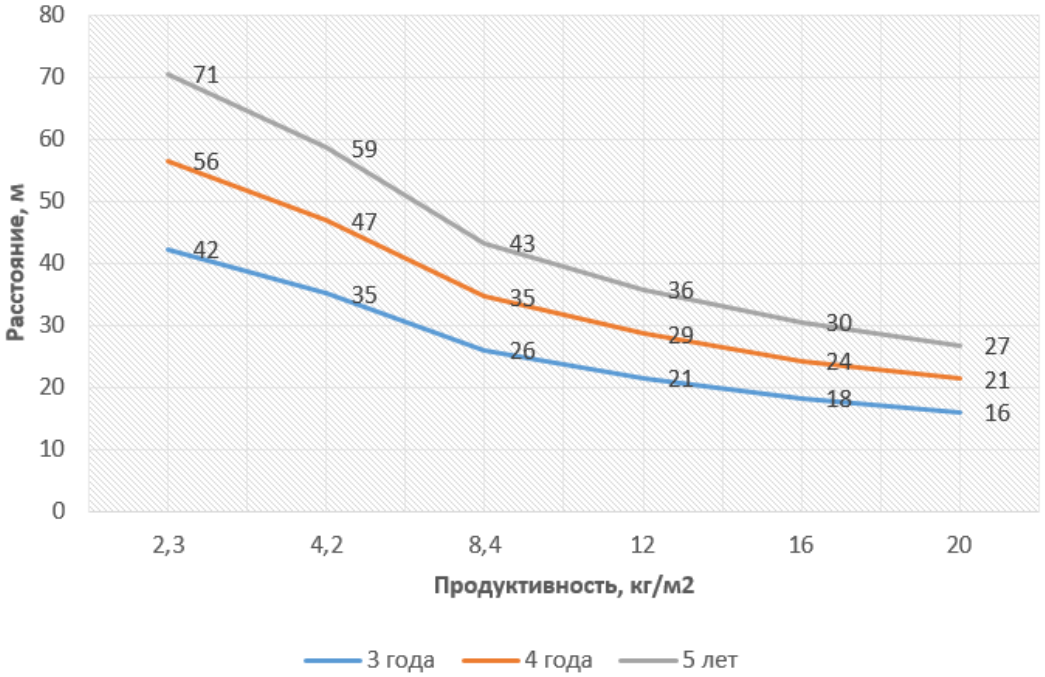


Рис. 12. Расстояния между скважинами для рядной схемы при различной продуктивности пласта и заданного времени отработки блока

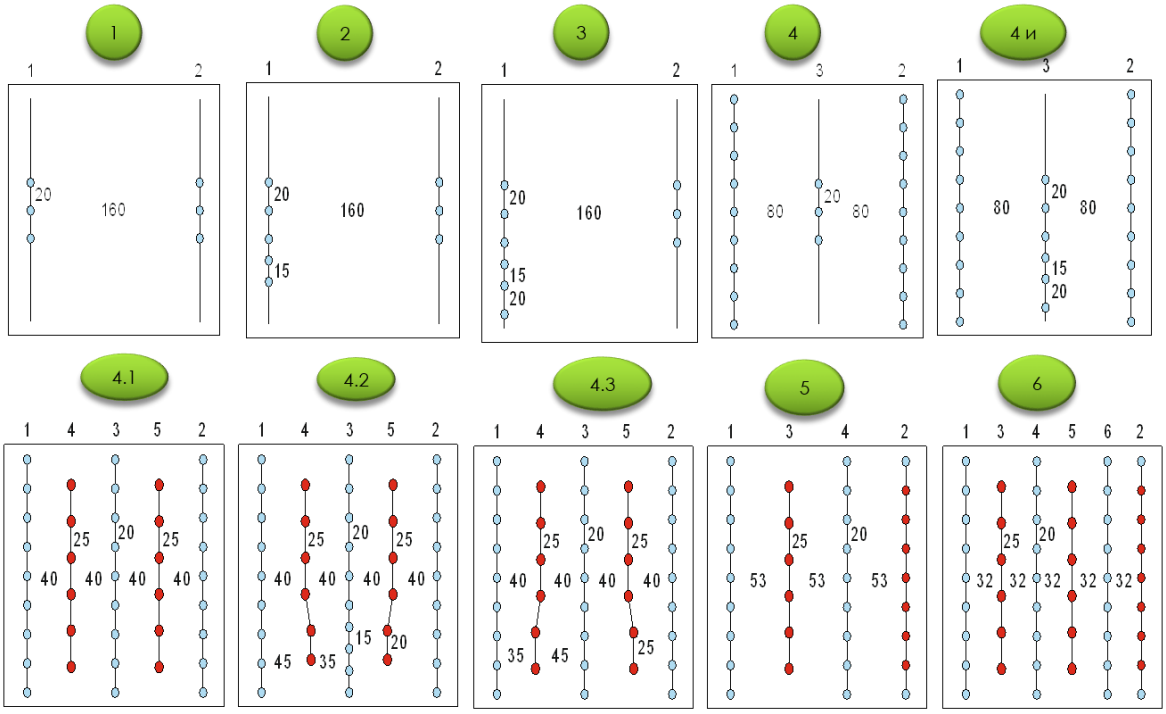


Рис. 13. Алгоритм сооружения технологических скважин

3. Бурение через 15 м продолжается, пока очередная скважина не покажет продуктивность менее 6 кг/м^2. Далее интервал увеличивается до 20 м. Бурение ряда прекращается, когда очередная скважина оказывается безрудной.

По итогам бурения рядов 1 и 2 через 160 м принимается решение о бурении ряда(ов) между ними.

Если продуктивность по обоим пробуренным рядам **3-6 кг/м^2**, то см. пункт 4. Если продуктивность по обоим пробуренным рядам **<3 кг/м^2**, то см. пункт 5. Если продуктивность по обоим пробуренным рядам **>6 кг/м^2**, то см. пункт 6.

4. Бурится ряд закачных скважин (3) на расстоянии 80 м от каждого из двух пробуренных рядов (1 и 2). Бурение начинается с центральной части блока.

Процесс бурения аналогичен пунктам 2 и 3.

4.1. Если продуктивность по пробуренному ряду 3 *средняя*, то бурятся два ряда **откачных** скважин (4 и 5) на расстоянии 40 м от каждого из трех пробуренных рядов **закачных** скважин. Интервал между **откачными** скважинами 25 м.

4.2. Если продуктивность по пробуренному ряду 3 >6 кг/м^2, то в той части, где она высокая расстояние от рядов 4 и 5 до ряда 3 сокращается до 35 м. Интервал между **откачными** скважинами в этой части 20 м.

4.3. Если продуктивность по пробуренному ряду 3 <3 кг/м^2, то в той части, где она низкая расстояние от рядов 4 и 5 до ряда 3 увеличивается до 45 м. Интервал между **откачными** скважинами в этой части 25 м.

5. Бурятся один ряд **откачных** скважин 3 на расстоянии 53 м от пробуренного ряда 1 и один ряд **закачных** скважин 4 на расстоянии 53 м от пробуренного ряда 2. Бурение начинается с центральной части блока. Ряд 2 далее оборудуется как откачной.

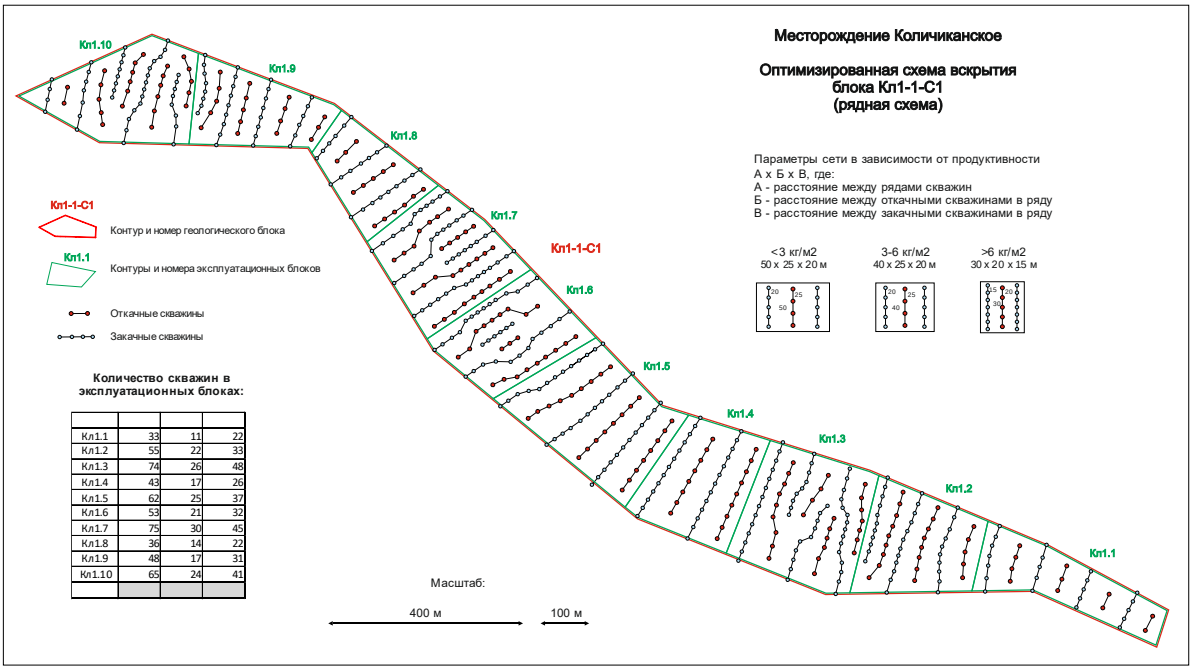
6. Бурятся два ряда **откачных** скважин 3 и 4 и два ряда **закачных** скважин 5 и 6 между рядами 1 и 2 на расстоянии 32 м от них и друг от друга. Бурение начинается с центральной части блока. Ряд 2 далее оборудуется как откачной.

В результате применения вышеизложенного алгоритма бурения эксплуатационных скважин с учетом удельной продуктивности финальный вариант расположения скважин для рядной схемы может выглядеть следующим образом (рис. 14).

Предварительная экономическая эффективность:

- себестоимость буровых работ, рассчитанная исходя из общего объема бурения и стоимости бурения 1 пог. м скважины, включена в расчет эксплуатационных затрат на добычу продуктивных растворов и составляет **9830,1** руб./пог. м;
- средняя глубина эксплуатационных скважин – 200 м;
- себестоимость бурения 1 скважины таким образом достигает:

9830,1 х 200 = 1 966 020 руб.



Кл1.1	33	11	22
Кл1.2	55	22	33
Кл1.3	74	26	48
Кл1.4	43	17	26
Кл1.5	62	25	37
Кл1.6	53	21	32
Кл1.7	75	30	45
Кл1.8	36	14	22
Кл1.9	48	17	31
Кл1.10	65	24	41

Рис. 14. Пример оптимизированной схемы вскрытия блока Кл1-С-1 при использовании рядной схемы с учетом фактической удельной продуктивности

Использование нерегулярных сетей эксплуатационных скважин, оптимизированных с учетом продуктивности в пределах двух рудных блоков, позволяет сэкономить только на бурении скважин порядка **466 млн руб.** ((216 + 17) х 2 млн руб.).

Таким образом, сравнительный анализ проектных решений по сооружению сети технологических скважин (регулярная сеть) и оптимизированной нерегулярной сети показал убедительную эффективность нерегулярной сети в отличие от регулярной.

Литература

1. Угорец В., Петерсон К., Хартманн М. Обоснование добычи урана методом СПВ на основе геотехнологического моделирования. М. Форум «Атомэкспо». 2011.

2. Руденко А.А., Гладышев А.В., Новгородцев А.А. Способы повышения эффективности добычи урана скважинным подземным выщелачиванием. Труды третьего международного симпозиума по геологии урана, ФГУП ВИМС. М. 2013., С. 252-257.

СОРБЦИЯ УРАНА ИЗ СЕРНОКИСЛЫХ РАСТВОРОВ ГЕЛЕВЫМ АНИОНИТОМ С ПИРИДИНОВЫМИ ГРУППАМИ

Ф.Я. Вацура[1], В.В. Головко[2], И.Д. Трошкина[1], Д.А. Буланова[1], С.И. Барбашина[1, 2]

1 – РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва,
2 – АО «ВНИПИпромтехнологии», г. Москва

Методом скважинного подземного выщелачивания (ПВ) перерабатывается половина урановых руд России [1, 2]. Достоинства этого способа обусловлены минимизацией отходов производства и его безопасностью, рентабельностью выделения урана из убогих по его содержанию руд. Для осуществления важнейшей стадии переработки продуктивных растворов выщелачивания – сорбции – необходимы материалы, отличающиеся высокими селективностью, равновесной емкостью, кинетическими параметрами. Несмотря на имеющуюся обширную базу ионитов с различными характеристиками отечественного и зарубежного производства, поиск сорбентов для состава конкретного объекта и условий выщелачивания урана из него продолжается.

В производственной практике сорбцию урана из сернокислых растворов ПВ, в которых уран находится в виде комплексных анионов состава $[UO_2(SO_4)_2]^{2-}$ и $[UO_2(SO_4)_3]^{4-}$ [2], осуществляют с использованием сильноосновных стирольных анионитов с триметиламмониевыми, диэтаноламинными или пиридиниевыми ионогенными группами [3–6]. В работе [3] на основании полученных данных по равновесным и кинетическим характеристикам сорбции урана сильноосновными анионитами гелевой и пористой структуры из сернокислых растворов, имитирующих по составу продуктивные растворы подземного выщелачивания урана, выявлен анионит с более высокими емкостными показателями – АМП с бензилпиридиниевыми функциональными группами.

Высокими емкостными свойствами при сорбции урана из сернокислых растворов ПВ с повышенным содержанием хлорид-ионов обладает макропористый винилпиридиновый анионит Axionit VPA 2, время установления равновесия сорбции урана с его использованием превышает 450 мин. Сорбцию лимитирует диффузия урана внутри зерна ионита, коэффициент диффузии составил $1{,}50 \cdot 10^{-10}$ см^2/с [7].

Реальные технологические растворы, образующиеся при переработке природного минерального сырья, содержат большие по размерам ионы гуминовых и фульфокислот, сорбция которых макропористыми ионитами снижает их емкостные характеристики по основным извлекаемым элементам.

Цель работы – получение сорбционных характеристик при извлечении урана гелевым анионитом из растворов подземного выщелачивания месторождения «Вершинное» (АО «Хиагда»).

В работе использовали опытный образец сильноосновного гелевого анионита Axionit VPA G2.4, синтезированного компанией АО «Аксион – Редкие и Драгоценные Металлы». Характеристики этого анионита представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики анионита Axionit VPA G2.4

Наименование показателей	Требования
Внешний вид	Зерна сферической формы
Гранулометрический состав (в набухшем состоянии): – дисперсность рабочей фракции, мм – объемная доля рабочей фракции, %, не менее	 0,8-2,0 85
Массовая доля влаги, %	35–65
Удельный объем набухшего анионита в дистиллированной воде, $см^3/г$, не более	3,3
Полная обменная емкость (ПОЕ) по хлорид-иону, мг-экв/г, не менее	4,0
Емкость по сильноосновным группам, мг-экв/г, не менее	3,0
Механическая прочность, %, не менее	95
Ионная форма	Сульфатная

Функциональные группы Анионит Axionit VPA G2.4 представляют собой смесь метилпиридина и пара-замещенного пиридина.

Средний радиус зерна смолы Axionit VPA G2.4 составил $4{,}4 \cdot 10^{-4}$ м.

Кинетику сорбции урана из растворов ПВ с температурой 8–10 °С изучали в статическом и динамическом вариантах. В статическом варианте сорбцию осуществляли в проточной ячейке. Раствор, содержащий ~100 мг/л урана, 4–5 г/л серной кислоты поступал в ячейку со скоростью 300 л/ч. В качестве сорбентов для сравнения использовали сильноосновные аниониты Puromet 6601 (Великобритания) и Bestion BD 200 (Китай) аналогичного типа.

Анализ растворов на содержание урана проводили фотоколориметрическим методом с использованием арсеназо III [8].

На рис. 1 представлены интегральные кинетические кривые сорбции урана из растворов ПВ, полученные при температуре 8–10 °С.

Данные рис. 1 свидетельствуют о более высокой равновесной емкости смолы Axionit VPA G2.4 по сравнению с равновесной емкостью анионитов Puromet 6601 и Bestion BD 200 (табл. 2).

По данным интегральных кинетических кривых сорбции урана определяли время полусорбции и эффективный коэффициент диффузии.

Расчет коэффициентов диффузии проводили по формуле [9]:

$D=0{,}03\ R^2/\tau_{0,5}$,

где D – эффективный коэффициент диффузии урана в сорбенте, $м^2/с$; R – радиус зерна смолы, м; $\tau_{0,5}$ – время полусорбции, с.

Наибольший коэффициент диффузии урана наблюдается для смолы Axionit VPA G2.4 (табл. 2). Порядок коэффициентов диффузии (10^{-14} м^2/с) свидетельствует о протекании сорбции урана в диффузионной области.

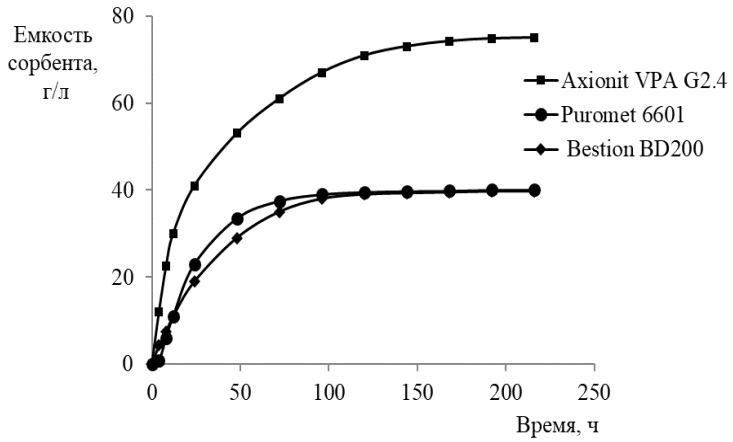


Рис. 1. Интегральные кинетические кривые сорбции урана сильноосновными анионитами из сернокислых растворов подземного выщелачивания

Таблица 2

Равновесные и кинетические характеристики сорбции анионитов

Марка сорбента	Равновесная емкость по урану, г/л	R, 10^{-4} м	$\tau_{0,5}$, 10^4 с	D, 10^{-14}, м^2/с
Axionit VPA G2.4	75,0	4,4	6,84	9,0
Puromet 6601	40,0	4,5	8,28	8,4
Bestion BD200	39,7	4,2	8,64	6,1

Для определения лимитирующей стадии сорбции урана из сернокислых растворов смолой Axionit VPA G2.4 и констант скоростей обработку кинетических данных также проводили с помощью кинетических моделей псевдо-первого и псевдо-второго порядка, модели Еловича и внутридиффузионной модели Вебера-Морриса [10].

Кинетические модели псевдо-первого и псевдо-второго порядка предназначены для описания процесса, учитывающего взаимодействие сорбтива с функциональными группами сорбента, по соответствующим кинетическим уравнениям.

Модель Вебера-Морриса, описывающая внутридиффузионные процессы, позволяет определять лимитирующую стадию сорбции и осуществлять поиск путей управления процессом.

Эмпирическая модель Еловича учитывает вклад в кинетику процессов адсорбции и десорбции, рост энергии активации с увеличением времени сорбции и неоднородность поверхности сорбента.

Для математического описания были использованы следующие уравнения:

1. Модель псевдо-первого порядка:

$$log(Q_e - Q_t) = lg\, Q_e - \frac{k_1}{2.303} t$$

2. Модель псевдо-второго порядка:

$$\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{k_2 {Q_e}^2} + \frac{1}{Q_e} t$$

3. Модель внутренней диффузии:

$$Q_t = k_{id}\, t^{0.5} + C$$

4. Модель Еловича:

$$Q_t = \frac{1}{\beta}\, ln\ (\alpha\beta) + \frac{1}{\beta}\, ln\, t$$

где Q_e – равновесная сорбционная емкость, мг/г;

Q_t – сорбционная емкость в момент времени t, мг/г;

k_i – константа скорости реакции i-того порядка, мин$^{-1}$ (г·мг$^{-1}$·мин$^{-1}$);

k_{id} – константа скорости внутренней диффузии, мг· г$^{-1}$·мин$^{-0,5}$;

α – начальная скорость сорбционного процесса, г·мг$^{-1}$·мин$^{-1}$;

β – константа скорости Еловича, г·мг$^{-1}$;

t – время сорбции, мин.

Линеаризацию данных кинетических кривых сорбции урана из сернокислых растворов (рис. 1) по уравнению псевдо-первого и псевдо-второго порядка, внутренней диффузии и Еловича отражают рис. 2-5, соответственно.

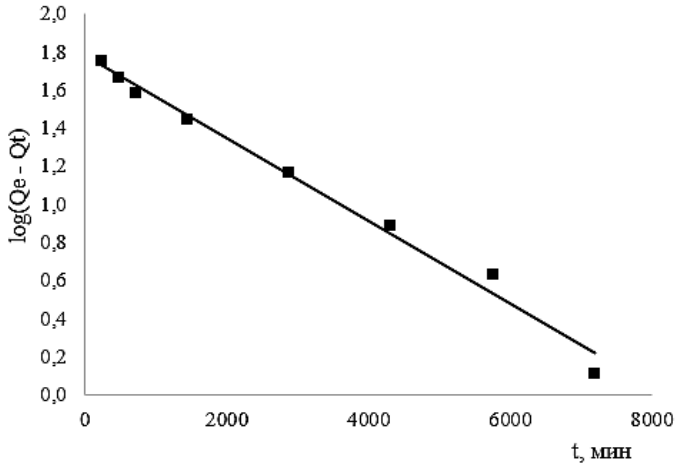


Рис. 2. Линеаризация кинетических данных по сорбции урана из сернокислых растворов подземного выщелачивания по уравнению псевдо-первого порядка

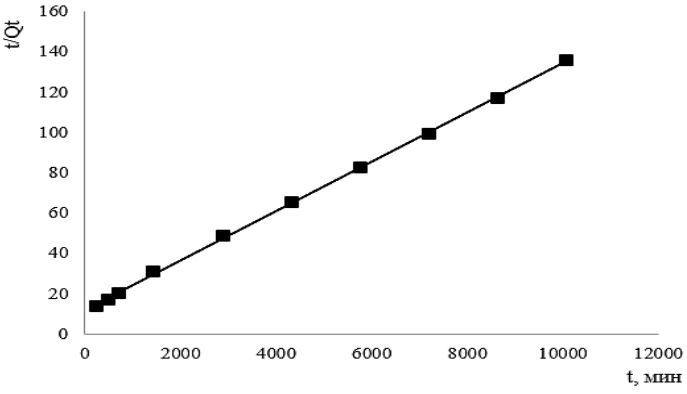


Рис. 3. Линеаризация кинетических данных по сорбции урана из сернокислых растворов подземного выщелачивания по уравнению псевдо-второго порядка

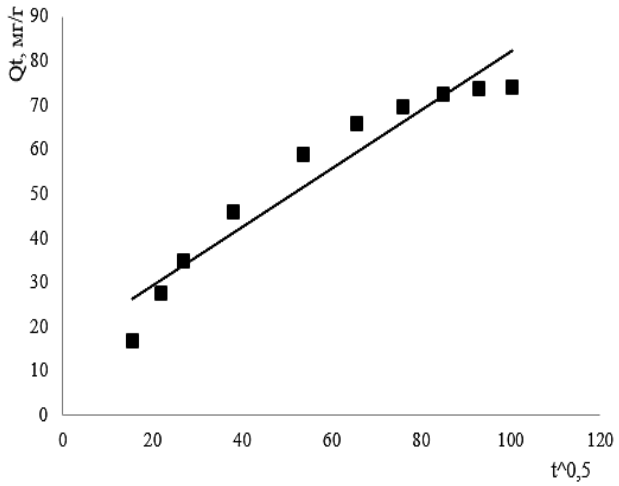


Рис. 4. Линеаризация кинетических данных по сорбции урана из сернокислых растворов подземного выщелачивания по уравнению внутренней диффузии

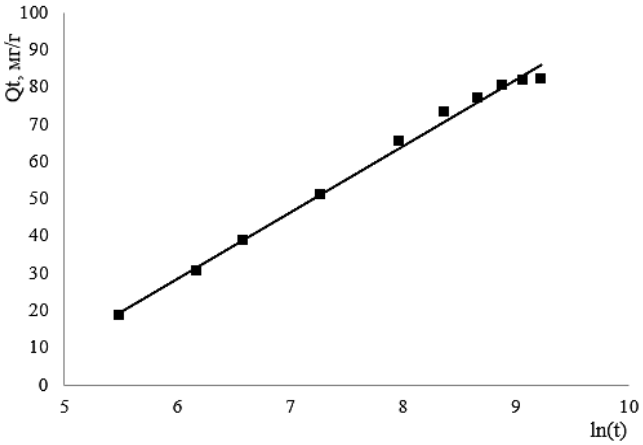


Рис. 5. Линеаризация кинетических данных по сорбции урана из сернокислых растворов по уравнению Еловича

Значения констант скоростей, рассчитанные по уравнениям выбранных кинетических моделей, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Кинетические характеристики сорбции урана анионитом Axionit VPA G2.4

Модель псевдо-первого порядка		Модель псевдо-второго порядка		Модель внутренней диффузии		Модель Еловича	
$k_1 \cdot 10^4$, мин$^{-1}$	R^2	$k_2 \cdot 10^3$, г·мг$^{-1}$·мин$^{-1}$	R^2	k_{id}, мг·г$^{-1}$·мин$^{-0,5}$	R^2	$\beta \cdot 10^2$, г·мг$^{-1}$	R^2
4,610	0,9885	7,024	0,9995	0,6574	0,9223	6,243	0,9943

Исходя из значений коэффициентов корреляции (табл. 3), можно констатировать, что уравнение псевдо-второго порядка более адекватно описывает процесс сорбции урана изучаемым анионитом.

Поскольку кинетическая модель псевдо-второго порядка носит формальный характер и не позволяет выявить лимитирующую стадию процесса [10], кинетические данные были проанализированы с помощью внутридиффузионной модели Вебера-Морриса (рис. 4). Константа С в уравнении, описывающем эту модель, пропорциональна толщине пограничного слоя (пленке). Если она равна нулю, то есть прямая

проходит через начало координат, то процесс сорбции лимитирует внутренняя диффузия [10].

В случае сорбции урана исследуемым анионитом (рис. 4), прямая не проходит через начало координат, что может свидетельствовать о протекании процесса во внешне- или смешаннодиффузионной области.

«Выходные» кривые сорбции для выбранных смол, полученные в термостатированной колонке с объемом смолы 60 см^3 и высотой слоя смолы 400 мм при температуре 8 ˚С, представлены на рис. 6, а динамические характеристики, рассчитанные с использованием уравнений, приведенных в [11] – в табл. 4.

По характеру выходных кривых сорбции и значению защитного времени видно, что смола Axionit VPA G2.4 обладает наибольшим временем защитного действия и емкостью «до проскока».

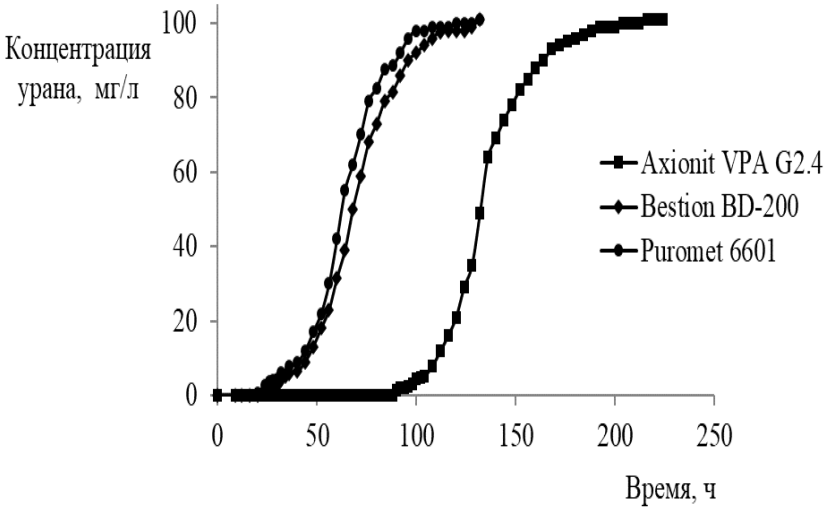


Рис. 6. «Выходные» кривые сорбции урана из сернокислых растворов ПВ (температура 8-10 ˚С)

Таблица 4

Динамические характеристики сорбции урана из сернокислых растворов ПВ

Марка сорбента	ДОЕ по урану, г/л	ПДОЕ по урану, г/л	Защитное время сорбции, ч	Кинетический коэффициент β, ч
Axionit VPA G2.4	53,3	82,1	88	0,020
Puromet 6601	12,1	39,0	20	0,060
Bestion BD200	14,5	42,3	24	0,058

Заключение

В статических и динамических условиях изучена сорбция урана из растворов подземного выщелачивания месторождения Вершинное (АО «Хиагда») гелевым анионитом Axionit VPA G2.4 (АО «Аксион – Редкие и Драгоценные Металлы») с пиридиниевыми функциональными группами в сравнении с анионитами Puromet 6601, Bestion BD 200.

Установлено, что наибольшим временем защитного действия, емкостью «до проскока», ПДОЕ и эффективным коэффициентом диффузии при сорбции из растворов с температурой 8–10 ˚С обладает смола Axionit VPA G2.4. Обработка кинетических данных сорбции этим анионитом по моделям псевдо-первого и псевдо-второго порядка, внутренней диффузии и Еловича с оценкой коэффициентов корреляции позволила установить, что уравнение модели псевдо-второго порядка описывает полученные данные лучше других (коэффициент корреляции R^2 составил 0,9995), и процесс протекает во внешне- или смешаннодиффузионной области.

Литература

1. Геотехнология урана (российский опыт): монография / Под ред. И.Н. Солодова, Е.Н. Камнева. -М.: «КДУ», «Университетская книга», 2017. 576 с.
2. Трошкина И.Д., Руденко А.А. Подземное выщелачивание редких элементов. Уч. пособие. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2017. 128 с.
3. Коломиец Д.Н., Трошкина И.Д., Шереметьев М.Ф., Коноплева Л.В. Сорбция урана сильноосновными анионитами из сернокислых минерализованных растворов // Журн. прикл. химии. 2005. Т. 78. № 5. С. 736-740.
4. Рычков В.Н., Смирнов А.Л., Горцунова К.Р. Сорбция урана из растворов подземного выщелачивания сильноосновными анионитами // Радиохимия. 2014. Т. 56. № 1. С. 35-38.
5. Zagorodnyaya A.N., Abisheva Z.S., Sharipova A.S., Sadykanova S.E., Bochevskaya Ye.G., Atanova O.V. Sorption of rhenium and uranium by strong base anion exchange resin from solutions with different anion compositions. Hydrometallurgy. 2013. Vol. 131–132. P. 127-132.
6. Горцунова К.Р., Рычков В.Н., Смирнов А.Л. и др. Кинетика и динамика сорбционных процессов на примере производственных растворов Хиагдинского уранового месторождения. Сорбционные и хроматографические процессы. 2014. Т. 14. Вып. 5. С. 847-855.
7. Skripchenko, S. Yu., Titova S.M., Zhevlakova T.A., Smirnov A.L. Uranium sorption from ISL solutions with an increased content of chlorides. AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2015. Is. 1. P. 020098.
8. Марков В.К., Виноградов В.К., Елинсон С.В. и др. Уран, методы его определения. М.: Атомиздат, 1964.
9. Кокотов Ю.А., Пасечник В.А. Равновесие и кинетика ионного обмена. Ленинград: Химия. Ленингр. отд-ние, 1970.
10. Tran H.N., You S.-J., Hosseini-Bandegharaei A., Chao H.-P. Mistakes and inconsistencies regarding adsorption of contaminants from aqueous solutions: A critical review. Water Research. 2017. Vol. 120. P. 88-116.
11. Волков В.П. Сорбционные процессы действующих производств. М.: Издательский дом «Руда и Металлы», 2014. 160 с.

ИЗВЛЕЧЕНИЕ НИКЕЛЯ И КОБАЛЬТА ИЗ ПРОДУКЦИОННЫХ РАСТВОРОВ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ОКИСЛЕННЫХ НИКЕЛЕВЫХ РУД

А.С. Гаврилов, Д.П. Ординарцев, А.Г. Крашенинин, С.А. Петрова
ИМЕТ УрО РАН, г. Екатеринбург

Введение

Интенсивное производство никеля приводит к постепенному снижению запасов медно-никелевых сульфидных руд, из которых на сегодняшний день производится 65% никеля в мире. Геологоразведочные работы, проводимые в последние годы, не выявили крупных месторождений богатых медно-никелевых руд [2, 5]. В связи с этим актуальной становится необходимость вовлечения в переработку окисленных никелевых руд (ОНР).

На сегодняшний день по пирометаллургическим и гидрометаллургическим технологиям из богатых ОНР с содержанием 1-3% никеля получают около 35% никеля [1-4]. Бедные высокомагнезиальные ОНР с содержанием никеля менее 1 мас.% не перерабатывают, что значительно снижает сырьевую базу никеля.

Для решения указанной выше проблемы научными коллективами проводятся исследования по переработке ОНР агитационным и подземным выщелачиванием соляной, азотной и серной кислотами [6-18]. Исследованы способы извлечения никеля из ОНР с применением культуральных сред Aspergillus niger и Penicillium, а также смеси хемолитотрофных бактерий Acidithiobacillus ferrooxidans, Acidithiobacillus caldus и Leptospirillum ferrooxidans, Bacillus muciloginosus [19-27]. Известны исследования по получению никеля с помощью специальных растений Alyssum murale, способных селективно накапливать никель [22].

В процессе переработки ОНР одна из важных проблем, оказывающая влияние на рентабельность – разделение никеля и кобальта. С ростом потребления кобальта в последнее десятилетие, связанным с производством элементов питания, данная проблема стала более актуальной [2-4, 28-29].

С переменным успехом для извлечения из растворов и разделения никеля и кобальта применяют экстракционные, сорбционные и гидролитические способы [28-34]. На производстве извлечение никеля и кобальта осуществляют автоклавным осаждением водородом и сероводородом в виде сульфидных концентратов [1, 3-4, 6].

Возможным способом разделения никеля и кобальта может выступить селективное осаждение кобальта из продукционных растворов выщелачивания в виде нерастворимых нитрозонафтольных соединений с последующим получением кобальтового концентрата. После осаждения кобальта из раствора предполагается извлекать никель за счет осаждения гидросульфидом натрия.

Методика и объекты исследований

В лабораторных условиях методом перколяционного выщелачивания ОНР Серовского месторождения был получен продукционный раствор (табл. 1). В составе раствора кобальт, по сравнению с другими элементами, присутствует в качестве микрокомпонента и в процессе его извлечения из раствора совместно будут извлекаться другие элементы, прежде всего никель.

Таблица 1

Продукционный раствор перколяционного выщелачивания

	Ni	Co	Mn	Mg	Al	Fe	pH
Исходный раствор	0,59	0,05	0,3	5,02	1,02	0,001	2,15

Согласно литературным источникам, в качестве способа извлечения кобальта из продукционных растворов может выступить осаждение в виде нитрозосоединений. Образующиеся при осаждении комплексные соединения кобальта наиболее устойчивы по сравнению с комплексами других металлов, что свидетельствует о возможности селективного извлечения кобальта из раствора [35-36].

Извлечение кобальта из продукционных растворов осуществляли с помощью 2-нафтола (Х.Ч, ГОСТ- 923-80), который растворяли в едком натре (Х.Ч, ГОСТ Р 55064 -2012). В процессе осаждения в раствор также вводили нитрид натрия (Х.Ч, ГОСТ 19906-74).

После осаждения кобальта из продукционного раствора осаждали никель. В качестве реагента для осаждения применяли гидросульфид натрия (ТУ- 2154-541-057-05763441-2012), предоставленный нам ПАО «ХИМПРОМ» в качестве научно-технической помощи.

Исследовательская часть

На осаждение подавали 2-нафтол в количестве 10:1 по отношению к кобальту. Перед осаждением 2-нафтол получали в натриевой форме, смешивая с раствором едкого натра, который добавляли в количестве 35% от массы 2-нафтола. Нитрозосоединения кобальта в процессе осаждения получали, добавляя в реактор нитрид натрия в соотношении 6:1 по отношению к кобальту.

В целях получения наиболее полного извлечения кобальта из растворов параметры осаждения варьировали в следующих пределах: T = 20-60 ^{o}C, t = 60-180 мин, количество реагента по отношению к кобальту 3:1-12:1.

Осаждение никеля проводили гидросульфидом натрия, подавая приготовленный раствор в донную часть реакционной зоны. Процесс осаждения проводили при T=25°C и постоянном перемешивании в течение 60 минут.

Результаты и обсуждение

Продукционные растворы перколяционного выщелачивания помимо никеля, магния, марганца, алюминия и железа содержат также кобальт

(табл. 1). Селективное извлечение кобальта из продукционных растворов возможно путем осаждения в виде нитрозосоединений [35-37]. Образующиеся при осаждении нитрозонафталаты кобальта имеют низкое произведение растворимости по сравнению нитрозонафталатами никеля, что дает возможность говорить о вероятности селективного извлечения кобальта из растворов [37].

Первоначально в поисковом режиме был проведен эксперимент по осаждению кобальта 2-нафтолом, который подавали при соотношении 1:10 по отношению к кобальту. (табл. 2). Для образования нитрозосоединений через 30 минут после введения в реактор 2-нафтола вводили нитрид натрия в количестве 1:6 по отношению к кобальту. Осаждение проводили при Т = 60 °С в течение 180 минут.

Результаты осаждения, приведенные в табл. 2, свидетельствуют о возможности при указанных выше условиях извлечь из раствора 99,7% кобальта, оставив при этом никель, магний и марганец в растворе. Незначительные примеси алюминия и железа, перешедшие в осадок, могут быть удалены из него на стадии промывки раствором соляной кислоты [37].

Таблица 2

Результаты химического анализа маточного раствора

	Содержание элементов, г/дм^3						
	Ni	Co	Mn	Mg	Al	Fe	pH
Исходный раствор	0,59	0,05	0,3	5,02	1,02	0,001	2,15
Маточный раствор	0,59	0,00017	0,26	4,93	0,91	0,0002	2,3
Извлечение, %	0	99,7	15	1,7	10,4	77,4	-

Изучено влияние температуры на извлечение кобальта из раствора. Осаждение проводили в течение 180 минут при температуре 20, 50 и 60 °С при постоянном перемешивании (рис. 1а). При температуре 20 °С извлечение кобальта выше, однако вместе с кобальтом в осадок переходит значительная часть никеля. Повышение температуры до 50°С снижает совместное с кобальтом осаждение никеля.

Выполнена серия опытов по поиску параметров осаждения, обеспечивающих наилучшее извлечение кобальта. Изучено влияние продолжительности процесса осаждения на извлечение кобальта из раствора. Извлечение никеля проводили в статических условиях при постоянном перемешивании в течение 60 и 120 минут (рис. 1б). Для сравнения на рисунке 1б показаны результаты осаждения при Т = 60 °С в течение 180 минут.

По результатам химического анализа раствора кобальт осадился на 99,4-99,7%. Снижение продолжительности осаждения до 60 минут приводит к совместному с кобальтом осаждению примесей никеля, марганца, магния и алюминия, образующихся в процессе осаждения. С увеличением продолжительности процесса до 120-180 минут наблюдается снижение количества примесей никеля, марганца и магния

в осадке, что, вероятно, связано с меньшей устойчивостью их нитрозосоединений.

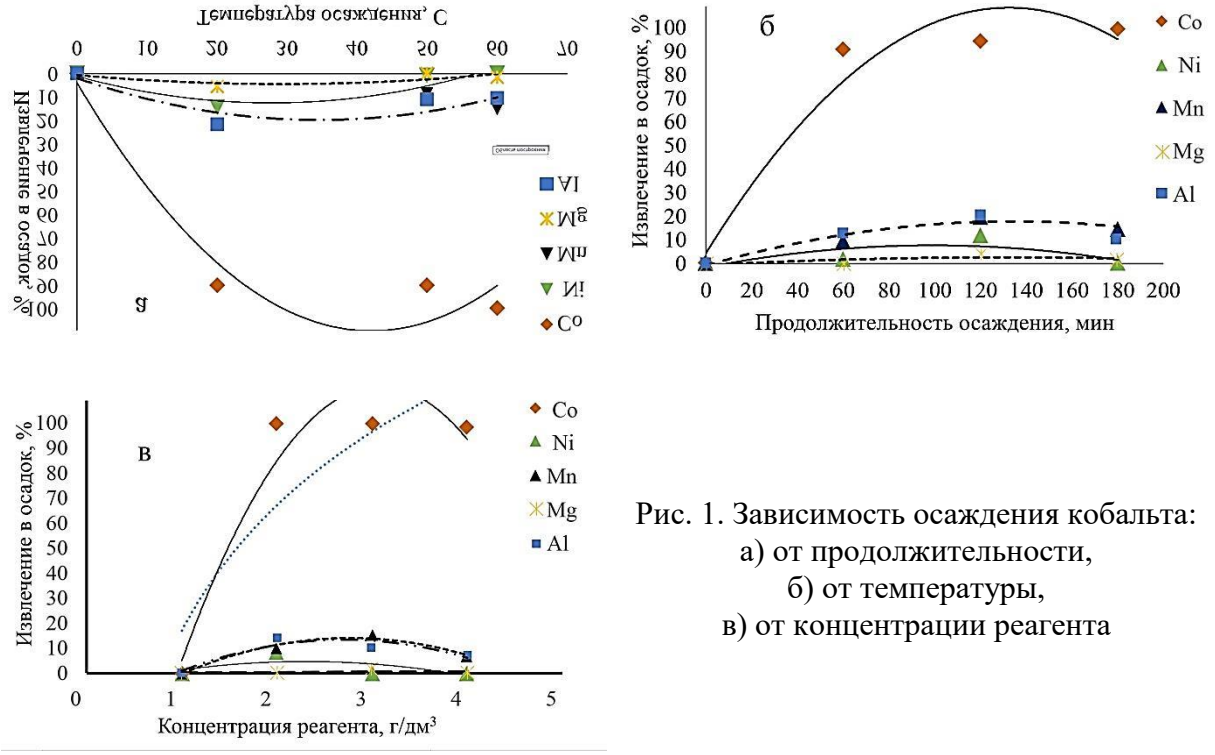


Рис. 1. Зависимость осаждения кобальта:
а) от продолжительности,
б) от температуры,
в) от концентрации реагента

Влияние расхода реагента на полноту извлечения кобальта показано на рисунке 1в. Осаждение проводили в течение 180 минут, подавая на осаждение реагент в соотношении 3:1 (С = 0,15 г/дм^3), 8:1 (С = 0,4 г/дм^3) и 12:1 (С = 0,6 г/дм^3) по отношению к кобальту. Наилучшие показатели по извлечению кобальта – 99,5% – достигнуты при соотношении реагента и кобальта 12:1. Однако вместе с кобальтом в осадок перешло около 8% никеля.

Установлены параметры, обеспечивающие максимальное извлечение кобальта при минимальном осаждении никеля и других металлов: Т = 60ºС, t = 180 минут, расход реагента 10:1 по отношению к кобальту. При данных условиях был получен кобальтовый осадок (табл. 3).

Таблица 3

Результаты химического анализа осадка кобальта до и после промывки

	Содержание элементов, мас. %						
	Ni	Co	Mn	Mg	Al	Fe	m, г
Исходный осадок	2,6	6,47	0,044	0,68	0,48	1,28	4,8
Промытый	0,27	7,18	0,01	0,1	0,053	0,054	3,22

Удаление примесей из кобальтового остатка проводили 15%-ным раствором соляной кислоты при соотношении Т:Ж = 1:10 в течение 180 минут и постоянном перемешивании. По результатам промывки из осадка в раствор переходит, мас. %: 71,5 Fe, 85 Al, 90,1 Mg, 85 Mn и примерно 93 Ni. Отмытый кобальтовый осадок был обожжен при температуре 700 ºС

в течение 3 часов. Полученный огарок содержал, мас. %: 67,3 Co и 6,1 Ni (рис. 2). Данный огарок может быть применен в качестве сырья для пирометаллургического рафинирования кобальта.

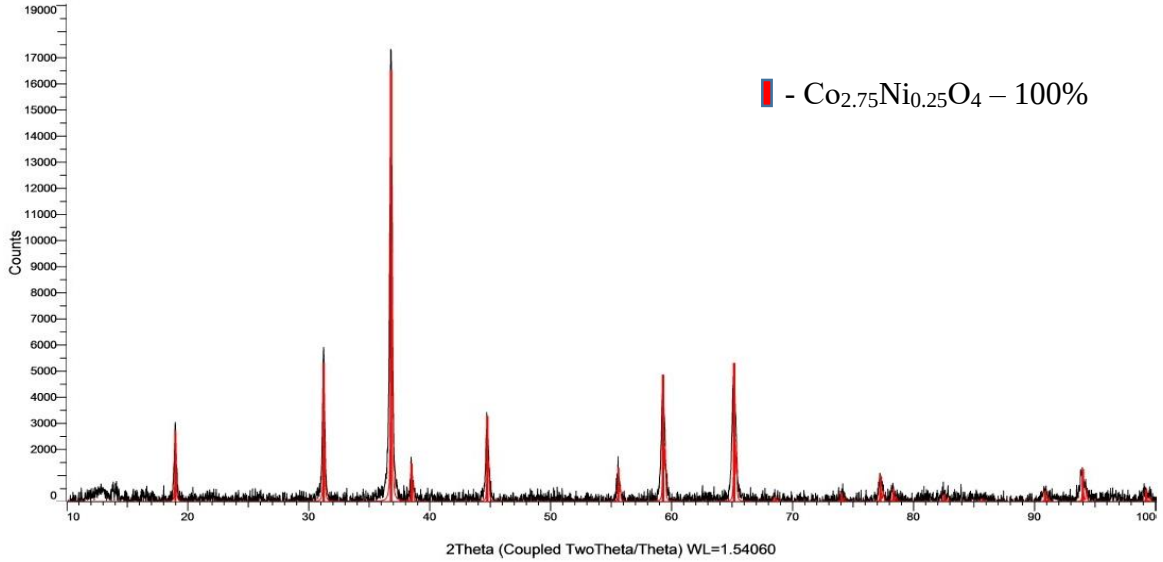


Рис. 2. Кобальтовый огарок

После осаждения кобальта из маточного раствора извлекли никель. Осаждение проводили гидросульфидом натрия в течение 60 минут при T = 25 °C. Для полноты осаждения никеля реагент подавали при 20%-ном избытке [38]. В результате при данных условиях из раствора в осадок извлечено 98% никеля (табл. 4). Получен осадок, содержащий, мас. %: 29,9 Ni, 0,031 Co, 0,33 Fe, 0,24 Mn, 1,27 Mg, 0,22 Al, 22,3 S.

Таблица 4

Исходный раствор и маточный раствор после осаждения никеля

	Ni	Co	Mn	Mg	Al	Fe	pH
Исходный раствор	0,58	0,00017	0,28	4,95	0,97	0,0002	2,30
Маточный раствор	0,001	0,001	0,25	4,8	0,92	0,0002	4,1

Проведенный рентгенофазовый анализ осадка показал, что он состоит преимущественно из сульфатов и сульфидов никеля (рис. 3). Сульфид никеля плавится при температуре выше 800 °C. Разложение сульфата никеля происходит при температуре выше 840 °C по реакции [39]:

$NiSO_4 = NiO + SO_3$.

Наряду с сульфидами никеля и кобальта в осадке присутствуют примеси сульфатов магния и марганца, которые, вероятно, перешли в осадок в результате осаждения железа и частичного гидролиза алюминия. Сульфаты марганца и железа разлагаются при температурах выше 850 °C [39]. Разложение сульфата магния происходит при температуре выше 1178 °C.

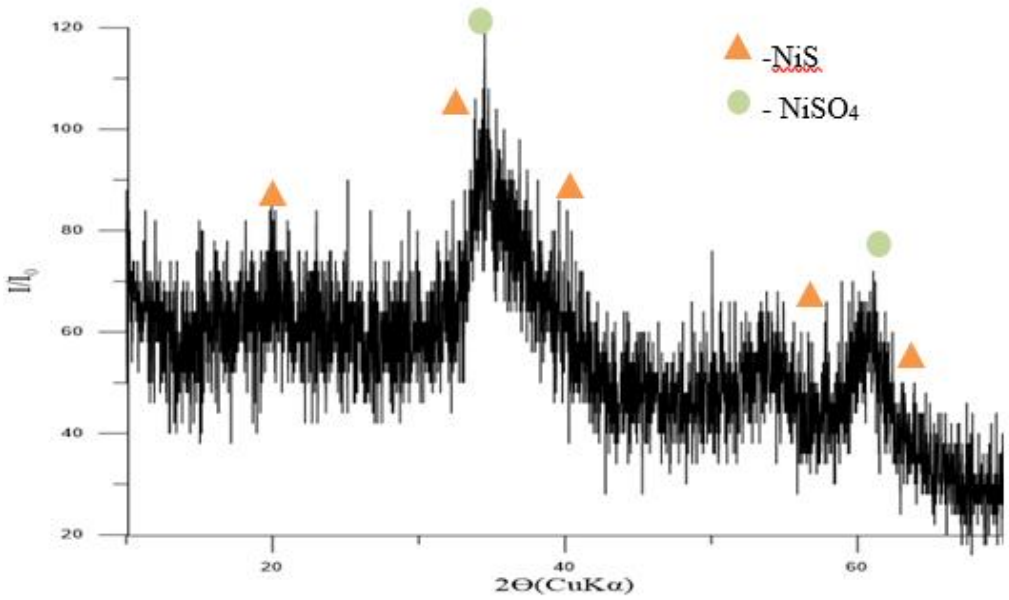


Рис. 3. Никелевый осадок

Для удаления серы осадок обожгли при T = 1180 °C и различной продолжительности (табл. 5). Наиболее полное удаление S из огарка достигается при продолжительности процесса 180 минут. На рис. 4 приведена рентгенограмма полученного огарка.

Таблица 5

Результаты обжига, мас. %

№ оп.	T, °C	Длительность, мин.	Ni	Co	Mn	Mg	Fe	Al	S
Исходный осадок			29,9	0,03	0,24	1,27	0,33	0,22	22,3
1	1180	120	65,3	0,11	0,57	3,6	0,9	2,05	0,072
2	1180	180	65,9	0,1	0,6	3,8	1	2	0,043

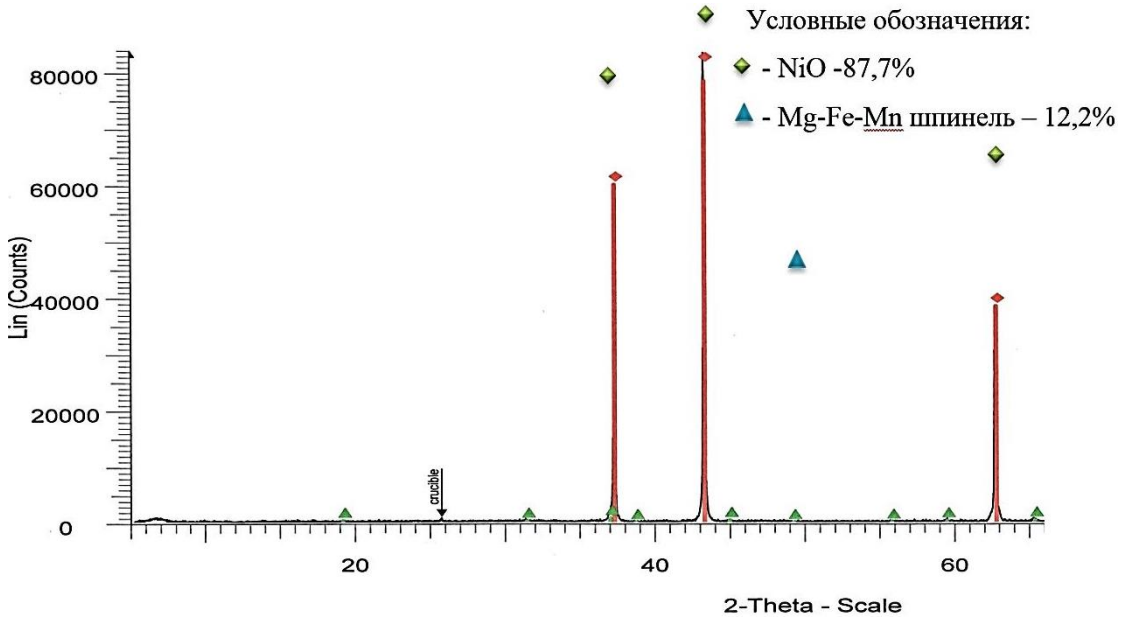


Рис. 4. Огарок, полученный после обжига при T = 1180 °C, t = 180 минут

В результате обжига никельсодержащего концентрата был получен огарок, содержащий в пересчете на оксиды, мас. %: 87,7 NiO, 0,13 CoO, 0,78 MnO, 6,3 MgO, 1,3 FeO и 3,78 Al_2O_3. Данный огарок пригоден для дальнейшей переработки по пирометаллургической схеме.

На рис. 5 приведена принципиальная технологическая схема процесса переработки ОНР с получением кобальтового концентрата, пригодного для дальнейшей переработки. Осаждение кобальта предполагается проводить 2-нафтолом в присутствии нитрида натрия непосредственно из растворов выщелачивания. Полученный осадок после фильтрации промывать 10% раствором соляной кислоты и затем направлять на обжиг при Т=700 °С в течение 3 часов. Промывной раствор возвращается на стадию промывки и по достижении в концентрации никеля в растворе 1 г/дм^3 выводится из цикла на экстракционное извлечение никеля.

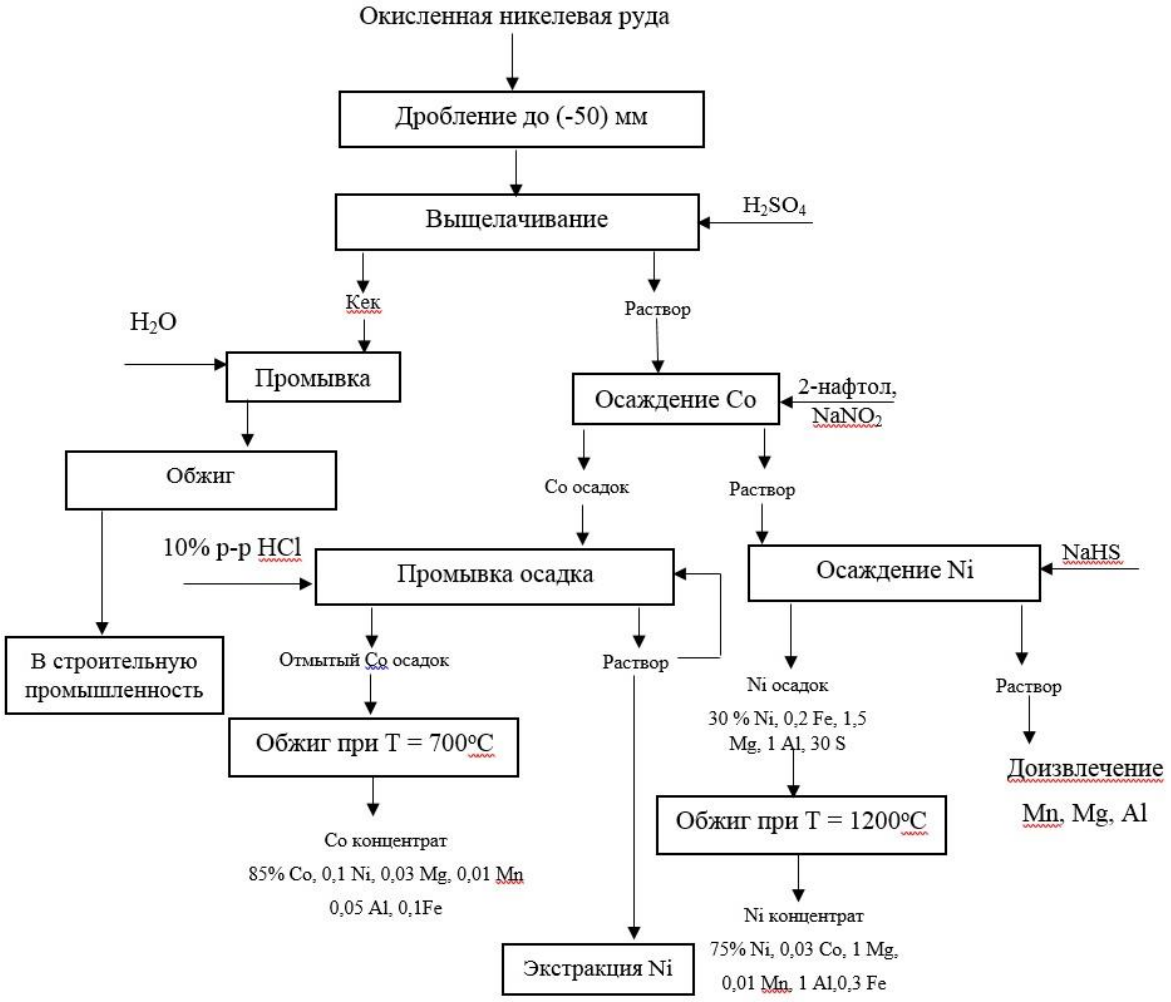


Рис. 5. Технологическая схема переработки ОНР

После осаждения кобальта из раствора гидросульфидом натрия осаждается никель с получением в дальнейшем концентрата, содержащего

25-40% никеля. Концентрат предполагается обжигать в трубчатой печи при Т = 1180 °С с получением огарка, содержащего 75% Ni.

Выводы

1. В качестве селективного способа извлечения кобальта из продукционных растворов выщелачивания ОНР применено осаждение 2-нафтолом в присутствии нитрида натрия. Наилучшие показатели по извлечению кобальта получены в результате осаждения в течение 180 минут при Т = 60°С и соотношении кобальта, 2-нафтола и нитрида натрия 1:10:6. При данных условиях получен осадок, содержащий 6% кобальта. После промывки от примесей и обжига при Т = 700 °С получен огарок, содержащий 67% Co и 6% Ni, который пригоден для дальнейшей переработки пирометаллургическими способами.

2. Из маточного раствора после осаждения кобальта проведено осаждение никеля гидросульфидом натрия. Достигнуто 98%-ное извлечение никеля и получен осадок, содержащий, мас. %: 29 Ni, 0,03 Co и 22,3 S.

3. Для удаления серы проведен обжиг никельсодержащего осадка. В результате обжига в течение 180 минут при Т = 1180 °С достигнуто практически полное удаление серы и получен огарок, содержащий 87% NiO.

4. Представлена технологическая схема переработки ОНР, основанная на кучном выщелачивании с последующим извлечением никеля и кобальта в отдельные товарные полупродукты.

Литература

1. Резник И.Д. Никель. В 3 т. Т 2. Окисленные никелевые руды. Характеристика руд. Пирометаллургия и гидрометаллургия окисленных никелевых руд / И.Д. Резник, Г.П. Ермаков, Я.М. Шнеерсон – М: ООО «Наука и технологии», 2004 – 468 с.
2. Минеральное сырье от недр до рынка: в 3-х т. – Т.2. Цветные металлы. Алюминий, медь, никель, олово, свинец, цинк / Под ред. А.П. Ставского. М.: «Научный мир», 2011. – 496 с.
3. Информационно-технический справочник. Производство никеля и кобальта. М.: Бюро НДТ, 2016. – 202 с.
4. Информационно-технический справочник. Производство никеля и кобальта. М.: Бюро НДТ, 2019. – 195 с.
5. Колмачихина О.Б. Комбинированная технология переработки окисленных никелевых руд (на примере Серовского месторождения). Диссертация канд. техн. наук: 05.16.02 / Колмачихина Ольга Борисовна. – Екатеринбург, 2018. – 132 с.
6. Калашникова М.И. Перспективные направления переработки окисленных никелевых руд применительно к рудам уральских месторождений / Калашникова М.И., Цымбулов Л.Б., Набойченко С.С., Колмачихина О. Б. / Цветные металлы, 2019. № 8. С. 4-11.
7. Сергеева С.В. Разработка электротермической технологии производства ферроникеля из уральских серпентинитовых руд. Диссертация канд. техн. наук: 05.16.02 / Сергеева Светлана Владимировна. – Екатеринбург, 2017. – 126 с.
8. Клюшников А.М. Разработка технологии совместной пирометаллургической переработки окисленных никелевых и сульфидных медных руд. Диссертация канд. техн. наук: 05.16.02 / Клюшников Александр Михайлович. – Екатеринбург, 2017. – 150 с.

9. Когановский А.М. Очистка и использование сточных вод в промышленном водоснабжении / Когановский А.М., Клименко Н.А., Левченко Т.М., Марутовский Р.М., Рода И.Г. // М.: Химия, 1983. 288 с.

10. Смирнов К.М. Технология гидрометаллургической переработки никель-магнезиальных руд Аганозерского месторождения / К.М. Смирнов, Т.В. Молчанова, А.В. Ананьев, О.К. Крылова // Металлы, 2018. № 4. С. 13-18.

11. Басков Д.Б., Плеханов С.В., Орлов С.Л., Середа Г.А. Способ извлечения никеля и кобальта из силикатных никелевых руд // Патент RU 2161658, опубл. 10.01.2001. Бюл. № 1.

12. McDonald R.G. Atmospheric acid leaching of nickel laterites review. Part I. Sulphuric acid technologies / R.G. McDonald, B.I.Whittington / Hydrometallurgy. 2008, № 91. P. 35-55.

13. McDonald R.G. Atmospheric acid leaching of nickel laterites review. Part II. Chloride and bio-tecnologies / R.G. McDonald, B.I.Whittington / Hydrometallurgy. 2008, № 91. P. 56-69.

14. Oxley A., Smith M. R., Caceres O. Why heap leach nickel laterites? Minerals Engineering, 2016. Vol. 88. P. 53-60.

15. Патент RU 2465449 «Способ извлечения никеля и кобальта из силикатных никель-кобальтовых руд», авторы: Гребнев Г.С., Савеня Н.В., Савеня М.Н., Суклета С.А., бюл. № 30, опубл. 27.10.2012.

16. Патент RU 2532871, бюл. № 31, опубл. 10.11.2014, авторы: Калиниченко И.И., Вайтнер В.В., Молодых А.С., Шубин В.Н.

17. B. Ma. Pilot-scale plant study on the innovative nitric acid pressure leaching technology for laterite ores / B. Ma, W. Yang, B. Yang, C. Wang, Y. Chen, Y. Zhang / Hydrometallurgy, 2015. № 155. P.88-94.

18. Atmospheric pressure acid leaching of Caldag lateritic nickel ore / S. Kursunoglu, M. Kaya // International Journal of Mineral Processing. 2016. Vol. 150. P. 1-8.

19. Geoffrey S. Simate, Sehliselo Ndlovu, Lubinda F. Walubita. Fungal and chemolithotrophic leaching of nickel laterites – Challenges and opportunities. Hydrometallurgy vol. 103 (2010), P. 150-157.

20. Geoffrey S. Simate, Sehliselo Ndlovu, Marieke Gericke. Bacterial leaching of nickel laterites using chemolithotrophic microorganisms: Process optimization using response surface methodology and central composite rotatable design // Hydrometallurgy vol. 98 (2009), P. 241-246.

21. Ким Е.А. Разработка процесса биовыщелачивания силикатных никелевых руд железисто-магнезиального типа: автореф. дис. канд. техн. наук. – Москва: МИСиС, 2010. – 26 с.

22. Barbaroux R., Mercier G., Blais J.F., Morel J.L., Simonnot M.O. A new method for obtaining nickel from the hyperaccumulator plant Alyssum murale. Separation and Purification Technology 83. 2011. P.57-65.

23. Никель Урала. Пути развития // Материалы круглого стола. Под ред. проф. д-ра техн. наук Набойченко С.С., УрФУ, г. Екатеринбург, 2013 г. 73с.

24. Чувашов П.Ю. Оптимальные режимы выщелачивания никеля и кобальта из окисленных никелевых руд Серовского месторождения / Чувашов П.Ю., Ватолин Н.А., Халезов Б.Д. Химическая технология. М.: Наука. 2012. Т. 13. № 2. С. 72-75.

25. Калабин А.И. Добыча полезных ископаемых подземным выщелачиванием и другими геотехнологическими методами. – М.: Атомиздат, 1981.

26. Jinhui Li, Deshun Li, Zhifeng Xu, Chunfa Liao, Ye Liu, Bo Zhong. Selective leaching of valuable metals from laterite nickel ore with ammonium chloride-hydrocloric acid solution. Journal of Cleaner Production, 2018. Vol. 179. P. 24-30.

27. Serita H. Ahoranta, Minna K. Peltola, Aino- Maija Lakaniemi, Jaakko A. Puhakka. Enhancing the activity of iron-oxidizing bacteria: A case study with process liquors from heap bioleaching of complex sulfide ores. Hydrometallurgy, 2017. Vol. 167. P. 163-172.

28. Ling Yun Wang, Man Seung Lee. Recovery of Co (II) and Ni (II) from chloride leach solution of nickel laterite ore by solvent extraction with Cyanex 301. International Journal of Mineral Processing, 2017, Vol. 166, pp. 45-52.

29. C.Y. Cheng. Recovery of nickel and cobalt from leach solutions of nickel laterites using a synergetic system consisting of Versatic 10 and Acorga CLX 50 / C.Y. Cheng, M.D. Urbani, M.G. Davies, Y. Pranolo, Zhaowu Zhu.// Minerals engineering Vol. 77, 2015. P. 17-24.

30. S. Kursunogly. Solvent extraction process for the recovery of nickel and cobalt from Caldag laterite leach solution: The first bench scale study / S. Kursunogly, Z. T. Ichlas, M. Kaya // Hydrometallurgy, 2017. Vol. 169. P. 135-141.

31. S. Mondal. Evaluation of n-octyl (phenyl)phosphinic acid (OPPA) as an extractant for separation of cobalt (II) and nickel (II) from sulphate solutions. / S. Mondal, V. Kumar, J.N. Sharma, R.C. Hubli, A.K. Suri // Separation and Purification Technology, 2012. Vol. 89. P. 66-70.

32. Wensheng Zhang. Extraction and separation of nickel and cobalt with hydroxamic acids LIX 1104, LIX 1104SM and the mixture of LIX 1104 and Versatic 10 / Wensheng Zhang, Y. Pranolo, M. Urbani, C. Y. Cheng // Hydrometallurgy, 2012. Vol. 119-120. P. 67-72.

33. N. Dizge. Sorption of Ni(II) ions from aqueous solution by Lewatit cation-exchange resin / N. Dizge, B. Keskinler, H. Barlas // Journal of Hazardous Materials, 2009. Vol 167. P. 915-926.

34. Stefaniak J., Karwacka S., Janiszewska M., Dutta A., Rene E.R., Regel-Rosocka M. Co (II) and Ni (II) transport from model and real sulfate solutions by extraction with bis (2,4,4-trimethylpentyl) phosphinic acid (Cyanex 272). Chemosphere, 2020, Vol. 254, pp. 1-9.

35. Пешкова В.М. Аналитическая химия никеля / Пешкова В.М., Савостина В.М. // М.: «Наука». 1966. 192 с.

36. Пятницкий И.В. Аналитическая химия кобальта / Пятницкий И.В. // М.: «Наука». 1965. 260 с.

37. Козлов П.А. Исследование процессов извлечения кобальта из промышленных продуктов цинкового производства / Козлов П.А., Несмелов В.Ю., Ординарцев Д.П. // «Цветные металлы». 2020. №5. С. 11-16.

38. Халезов Б.Д. Извлечение никеля из растворов гидросульфидом натрия / Халезов Б.Д., Гаврилов А.С., Петрова С.А., Овчинникова Л.А. // Цветные металлы. 2019. № 3. С. 33-38.

39. Химические свойства неорганических веществ: Учеб. пособие для вузов. 3-е изд. испр. / Р.А. Лидин, В.А. Молочко, Л.Л. Андреева; под ред. Р.А. Лидина. – М.: Химия, 2000. 480 с.

ВНЕДРЕНИЕ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ СПВ УРАНА НА ДОБЫЧНЫХ БЛОКАХ АО «ДАЛУР»

В.В. Данилейко[1], М.Ю. Квакин[1], С.А. Зонов[1], В.В. Кузнецов[1], Д.О. Ежуров[2]
1 – АО «РУСБУРМАШ», г. Москва,
2 – АО «Далур», Курганская обл., с. Уксянское

Для пилотного внедрения модернизированного комплекса средств автоматизации был определен блок 6В, расположенный на Западной залежи месторождения Хохловское, АО «Далур». На момент начала эксплуатации блок включал в себя 13 закачных и 7 откачных скважин, которые отрабатываются в едином технологическом режиме. Подача выщелачивающих растворов на блок и откачка продуктивных растворов с блока осуществляются по трубопроводам из полиэтилена низкого давления (ПНД), с размещением их на низких опорах. Магистральный и рядные трубопроводы продуктивных растворов выполнены напорными.

Существующая обвязка технологических скважин на добычных блоках АО «Далур» имеет минимальное оснащение контрольно-измерительными приборами и автоматическими регулирующими органами и не позволяет в полной мере осуществлять оперативный контроль, дистанционное управление и регулирование процессов скважинного подземного выщелачивания (СПВ) урана.

Повышение качества управления технологическим процессом достигается за счет:

- выбора оптимального режима работы скважин (соблюдение баланса откачки-закачки, снижение времени отработки блока);
- организации программного взаимодействия с информационной системой добычного комплекса (ИСДК), направленной на оптимизацию параметров технологических и геотехнологических процессов;
- обеспечения регистрации событий для последующего анализа и совершенствования технологического процесса и регламента работы комплекса технических средств;
- обеспечения информацией о ходе технологического процесса и режимах управления оборудованием оперативного, технологического и обслуживающего персонала;
- повышения оперативности действий персонала при управлении технологическими процессами;
- снижения затрат на срочный ремонт оборудования за счёт своевременного извещения о необходимости ремонта или замены оборудования (учёт моточасов и т.п.);

- обеспечения экономии электроэнергии за счёт выбора оптимальных режимов работы оборудования (погружные электронасосы).

Комплекс средств автоматизации строится по иерархическому принципу и предполагает три уровня, различающихся степенью приближения к технологическому оборудованию. Первый (нижний) уровень – уровень датчиков, исполнительных механизмов и локальных подсистем. Второй (средний) уровень – уровень программируемых логических контроллеров и панелей оператора. Третий (верхний) уровень – уровень сервера SCADA-системы, автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора. Блок-схема взаимосвязей между объектами комплекса средств автоматизации приведена на рис. 1.

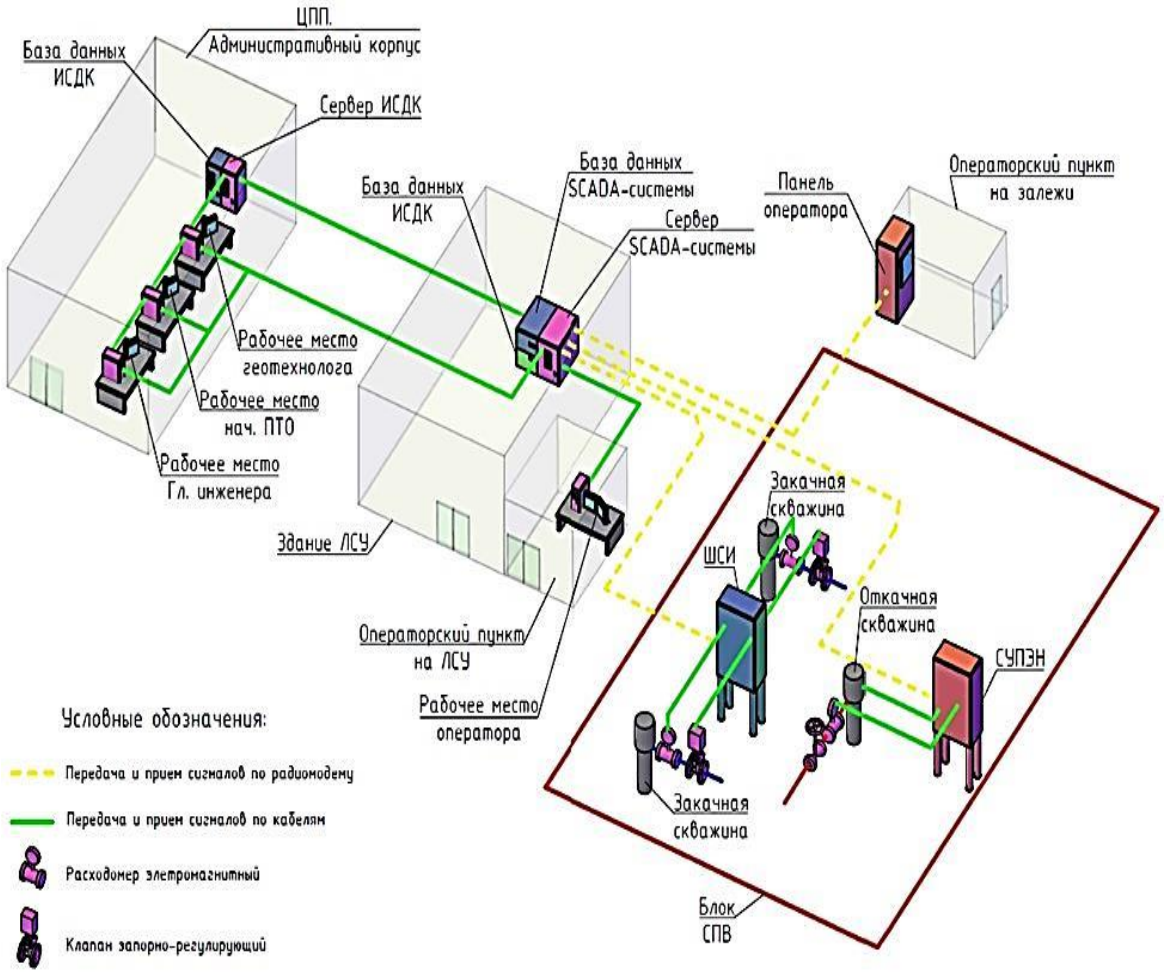


Рис. 1. Концептуальная блок-схема взаимосвязей между объектами комплекса средств автоматизации управления процессами СПВ урана

ИСДК – специальный программный продукт, предназначенный для информационного обеспечения геологоразведочных и добычных работ, обеспечивающий сбор, централизованное хранение и визуализацию данных, введённых в базу, а также позволяющий осуществлять управление и оптимизацию разработки месторождений урана. Данное программное обеспечение успешно функционирует на объектах АО «Далур».

SCADA-система – программный пакет, предназначенный для разработки и обеспечения работы в реальном времени систем сбора, обработки, отображения и архивирования информации об объекте управления.

Комплексом средств автоматизации предусматривается следующий объем контроля и управления:

- контроль давления в рядных трубопроводах выщелачивающих растворов при помощи микропроцессорных преобразователей избыточного давления (датчиков давления) в комплекте с мембранными разделителями сред;
- измерение и регулирование количества продуктивных растворов на выходе из откачных скважин. Для измерения предусмотрены расходомеры-счетчики электромагнитные раздельного исполнения. Регулирование осуществляется с помощью преобразователей частоты, расположенных в утепленных шкафах управления погружными электронасосами;
- измерение и регулирование количества выщелачивающих растворов на входе в закачные скважины. Для измерения предусмотрены расходомеры-счетчики электромагнитные моноблочного исполнения с утепляющим чехлом. В качестве исполнительных механизмов использованы клапаны регулирующе-отсечные с электроприводом;
- контроль динамического уровня растворов в откачных скважинах при помощи погружных гидростатических датчиков уровня;
- дистанционное управление насосными агрегатами и запорно-регулирующими клапанами из операторского пункта.

Для установки приборов, исполнительных механизмов и трубопроводной арматуры предусматривается видоизмененная обвязка закачных и откачных скважин. Принципиальная схема обвязки закачной скважины представлена на рис. 2. На каждой линии к закачной скважине устанавливаются расходомер и запорно-регулирующий клапан для возможности измерения и регулирования подачи выщелачивающих растворов.

Принципиальная схема обвязки откачной скважины приведена на рис. 3. На участке между откачной скважиной и врезкой в рядный трубопровод предусматривается установка расходомера, запорного крана и обратного клапана.

Обмен данными между шкафами управления, расположенными на добычном блоке 6В и оборудованием в операторских пунктах, реализован по радиоканалу с использованием радиомодемов с частотным диапазоном 433 МГц. Схема передачи информации в операторский пункт на площадке ЛСУ приведена на рис. 4.

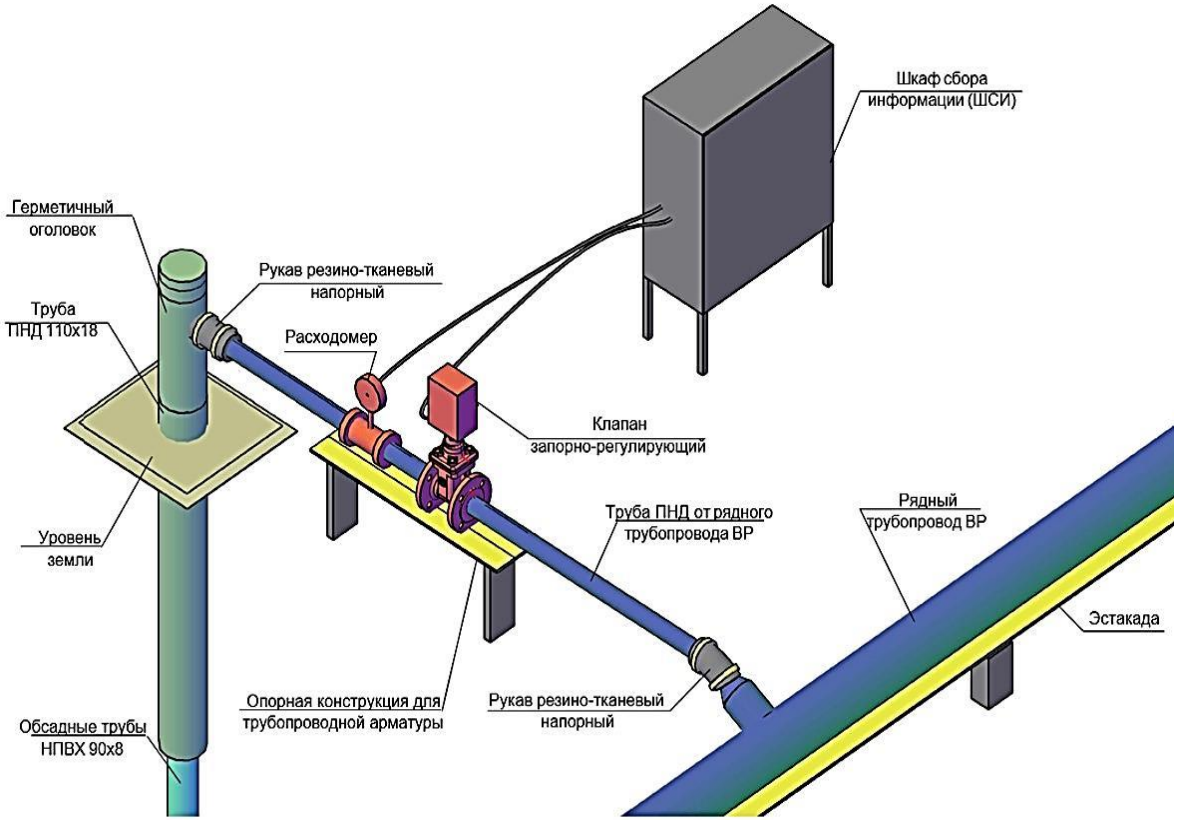


Рис. 2. Принципиальная схема обвязки закачной скважины

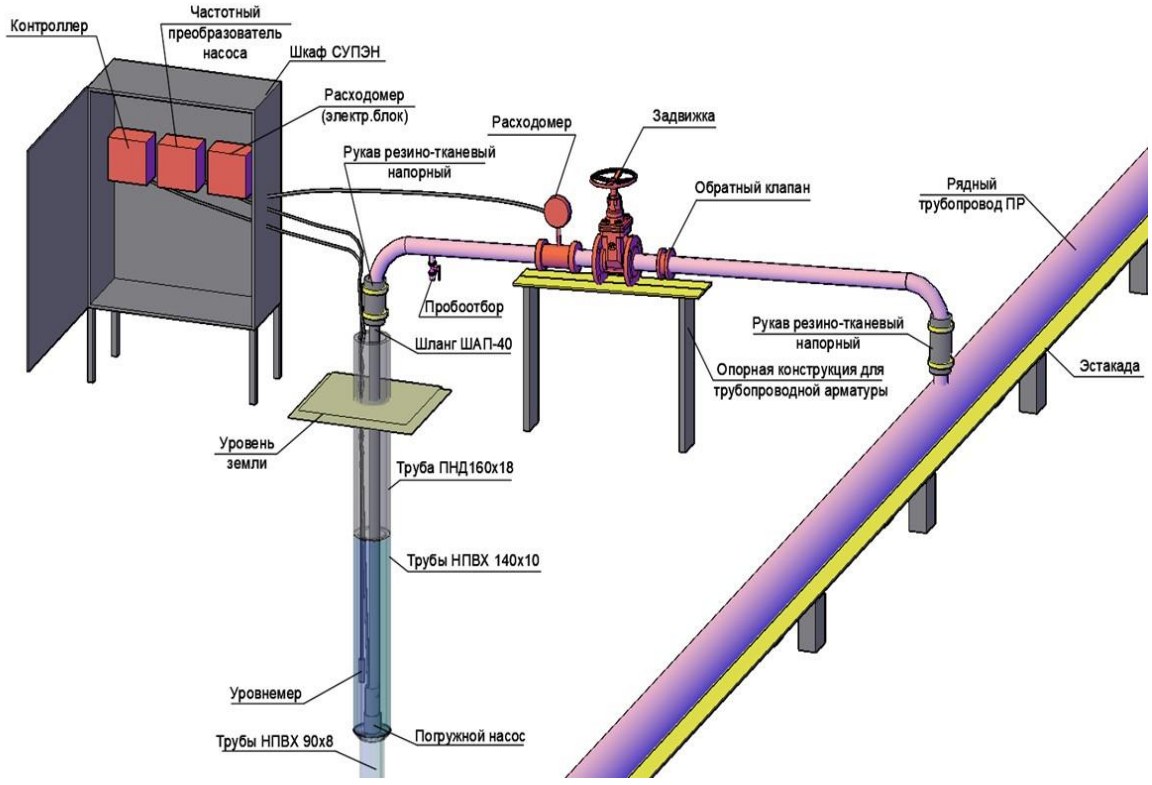


Рис. 3. Принципиальная схема обвязки откачной скважины

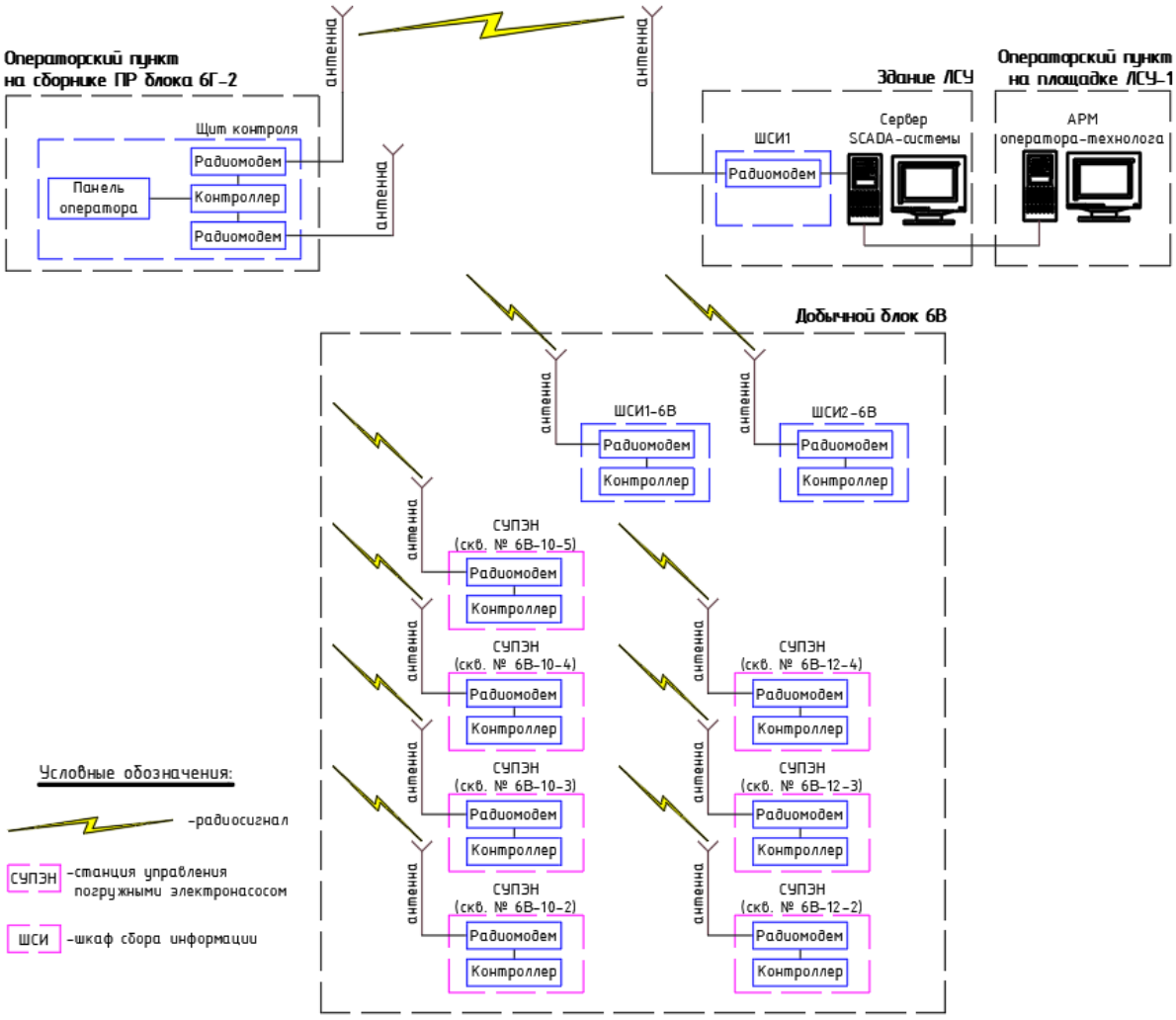


Рис. 4. Схема передачи информации в операторский пункт
на площадке ЛСУ при помощи радиосигнала

Данные приборы имеют следующие преимущества:

- частотный диапазон (433,92±0,2%) МГц;
- поддержка радиосетей со сложной топологией;
- встроенная функция радиомаяка;
- масштабируемость сетей;
- широкий диапазон рабочих температур;
- поддержка четырех типов антенн;
- отсутствует необходимость получения разрешения на использование радиочастот и на эксплуатацию радиомодема.

Предусмотрено два операторских пункта: основной – на существующей площадке ЛСУ-1 и дополнительный – на площадке сборника ПР на одном из блоков Западной залежи.

Для управления погружными электронасосами используются станции управления, оснащенные необходимым оборудованием для сбора, обработки и передачи данных. Основное оборудование: частотный

преобразователь, программируемый логический контроллер, блок индикации расходомера, радиомодем и антенна.

Промежуточный сбор информации с датчиков и управление регулирующе-отсечными клапанами осуществляется со шкафов сбора информации, в которых предусмотрено необходимое контроллерное оборудование и приборы передачи данных.

Дистанционный контроль за работой блока 6В осуществляется из операторской, расположенной у сборника ПР на Западной залежи. Для этой цели в помещении оператора установлен щит контроля с 15-дюймовой панелью оператора, на экране которой отражена мнемосхема технологического процесса.

Основное управление технологическими процессами на блоке предусмотрено с рабочего места оператора, расположенного на существующей площадке ЛСУ-1. Фрагмент мнемосхемы блока 6В приведен на рис. 5.

На мнемосхеме блока 6В отображается необходимая информация о состояниях, установленных режимах, оптимальных, заданных и фактических параметрах работы всех технологических скважин. Отдельно показаны суммарные показатели работы блока, их отклонения от оптимальных.

Каждая скважина может работать в одном из трех режимов:

- дистанционный автоматизированный, когда дебит скважины задается из ИСДК;
- дистанционный ручной, когда дебит скважины задается оператором (также возможно задать степень открытия клапанов для закачных скважин и частоту работы насосов для откачных скважин);
- местный, когда дебит скважины задается вручную непосредственно на полигоне.

Программа предоставляет возможность остановки и запуска насоса, регулировки его текущей частоты, задание дебита. На мнемосхеме отображаются технические параметры насосного агрегата, а также величина динамического уровня в скважине.

На рис. 6 отражен алгоритм взаимодействия ИСДК со SCADA-системой блока 6В. Процесс импорта данных происходит автоматически, полностью исключая ошибки и неточности при ручном вводе параметров оператором. Данные поступают в системы оперативно, позволяя геотехнологу в любой момент времени иметь всю картину работы блока.

Параметры работы технологических скважин используются для подготовки суточных отчетов, на основании которых рассчитываются основные показатели работы блока. Геотехнологи предприятия имеют возможность использовать сохраненные в информационной системе данные по добычному блоку для расчета оптимальных параметров технологических скважин с сохранением баланса откачки-закачки по каждой ячейке.

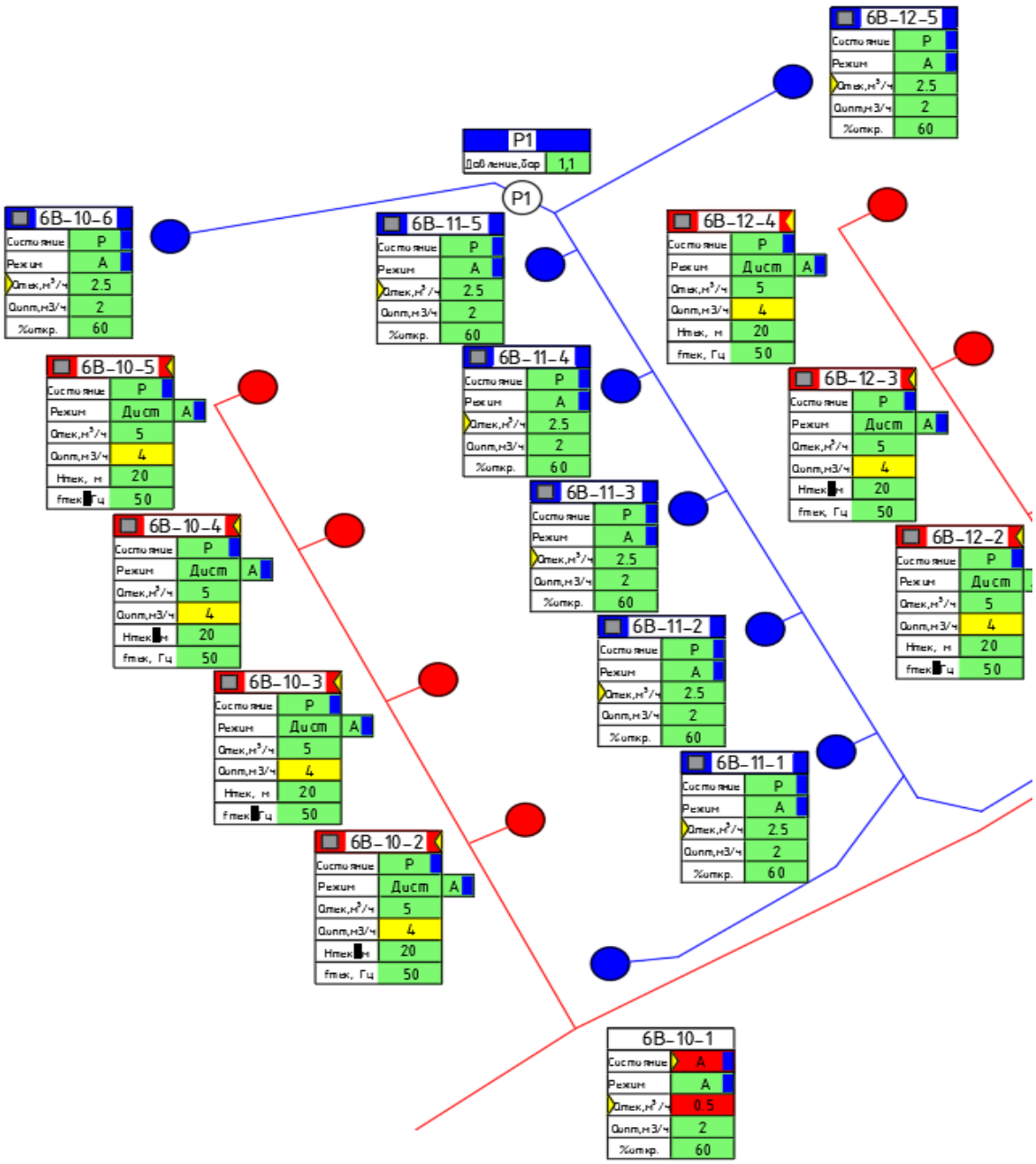


Рис. 5. Фрагмент основной мнемосхемы блока 6В на рабочем месте оператора

Ожидаемые эффекты от внедрения комплекса средств автоматизации на блоке 6В.

Количественные:

- снижение удельного расхода реагентов – на 3-5%;
- рост содержания урана в продуктивных растворах – на 3-5%;
- увеличение срока службы насосных агрегатов – на 5-10%;
- снижение потребления электроэнергии на 3-5%;
- сокращение штатного персонала на полигоне (экономия ФОТ);
- сокращение сроков полной отработки запасов блока.

Качественные:

- автоматизация управления добычным блоком;
- повышение оперативности и достоверности принимаемых решений;
- снижение вероятности аварийных ситуаций;
- снижение техногенной нагрузки на объекты окружающей среды.

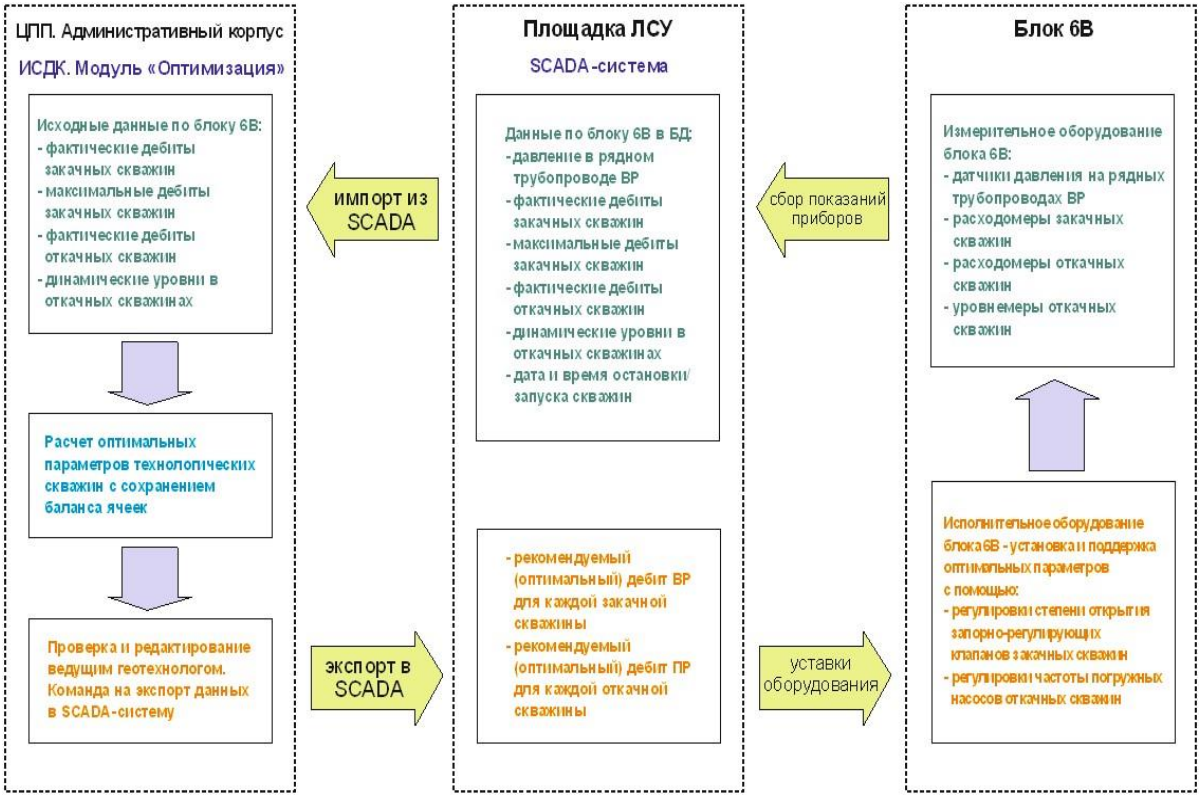


Рис. 6. Блок-схема взаимодействия информационной системы добычного комплекса (ИСДК) и SCADA-системы блока 6В

Литература

1. Солодов И.Н., Камнев Е.Н. Геотехнология урана (российский опыт). М.: КДУ: Университетская кн., 2017. – 574 с.

2. Скороваров Д.И., Куликов Е.В., Белецкий В.И., Фазлуллин М.И. Справочник по геотехнологии урана. М.: Энергоатомиздат, 1997. – 672 с.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА

В.В. Данилейко, И.А. Курашов, А.А. Панков,
С.В. Романов, А.О. Левашов
АО «РУСБУРМАШ», г. Москва

Эволюция обсадных эксплуатационных колонн скважин подземного выщелачивания развивается с появлением новых материалов, совершенствованием свойств уже известных материалов, изменением физических характеристик. Всё это ведёт к совершенствованию конструкции обсадных колонн.

Одним из важных этапов в сооружении скважин для подземного выщелачивания является переход со стальных обсадных труб к полимерным материалам. Применение труб из полиэтилена низкого давления (ПНД) позволило увеличить срок эксплуатации обсадной колонны при работе с агрессивными средами. Это положительно повлияло в первую очередь на экологию и экономику эксплуатирующих предприятий.

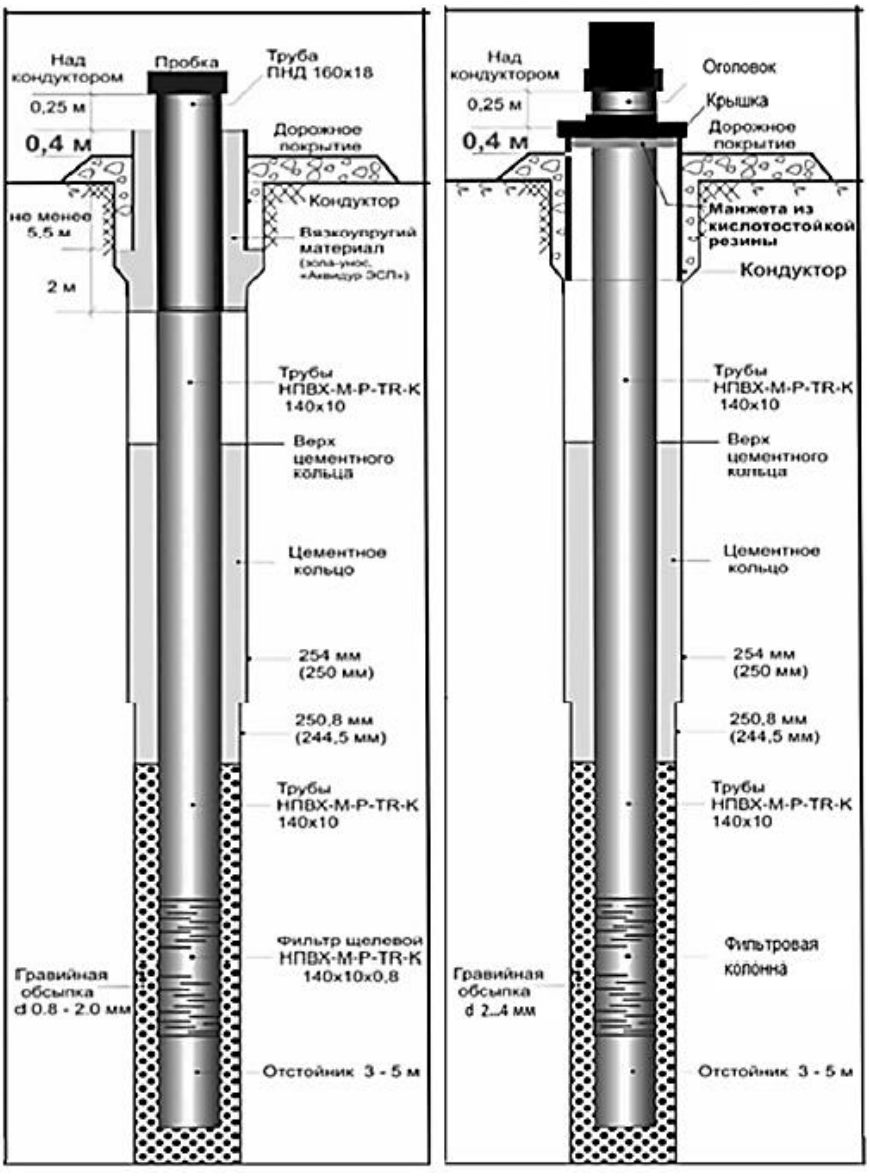
Следующим значительным шагом стало применение в качестве материала обсадной колонны эксплуатационных скважин подземного выщелачивания непластифицированного поливинилхлорида (НПВХ). Переход на данный материал Российскими компаниями начался с 2017 года. Применение НПВХ помогло решить ряд проблем, связанных с использованием труб из ПНД. Увеличение плотности и жёсткости материала сократило затраты на обсадную колонну, из конструкции скважины были устранены пригрузы, необходимые для увеличения массы обсадной колонны при монтаже в среде бурового раствора, плотностью превышающего плотность ПНД на 0,05 г/см^3. Трубы из материала НПВХ позволяют выполнить монолитные стыки резьбового соединения при использовании специального клея, растворяющего поверхность резьбового соединения с последующей полимеризацией, в короткие сроки.

После подбора оптимального материала для обсадной колонны АО «РУСБУРМАШ» занялось подбором наиболее рациональной конструкции колонны, в том числе с использованием современных материалов, которые уже нашли своё применение в различных отраслях, таких как строительство, металлообработка и химическое производство.

АО «РУСБУРМАШ» проводит работы по сооружению скважин для подземного выщелачивания на двух участках месторождений АО «Хиагда» и АО «Далур». В настоящее время в горнорудном дивизионе ГК «Росатом» одним из основных направлений повышения эффективности добычи урана методом скважинного подземного выщелачивания (СПВ) является совершенствование конструкций технологических скважин, сооружаемых на полигонах добычных предприятий.

Это обусловлено целым рядом причин, связанных с требованиями обеспечения надежности, производительности, экологической безопасности и снижения стоимости сооружения. Суммарная стоимость сооружения технологических скважин на добычном блоке составляет порядка 70-75 % от общих затрат на его развертывание.

АО «Хиагда». Используемые в настоящее время конструкции универсальных технологических скважин на месторождениях Хиагдинского рудного поля (ХРП) представлены на рис. 1.



а б

Рис. 1. Конструкция универсальных технологических скважин с гравийной обсыпкой на месторождениях ХРП:
а) типовая конструкция с переходом с трубы НПВХ на трубу ПНД и выводом трубы ПНД на поверхность; б) усовершенствованная конструкция, в которой исключен переход с трубы НПВХ на трубу ПНД и выводом трубы НПВХ на поверхность

Порядок бурения и оборудования типовой универсальной технологической скважины (рис. 1а):

- диаметр забуривания под кондуктор (пневмоударник QL-80) – d=305 мм;
- диаметр кондуктора (стальная труба) – d=273 мм L>5,5 м;
- диаметр бурения под обсадную колонну (пневмоударник QL-80, базальты) – d=254 мм;
- диаметр бурения под обсадную колонну (шарошечное долото, пески с прослоями алевритов и глин) – d=250,8 мм;
- тип обсадных труб – НПВХ-140×10 мм, ПНД переход с трубы НПВХ на ПНД, ПНД-160х18 мм;
- клей на резьбовые соединения – Tangit PVC-U, +5…+40 °С;
- тип фильтра – щелевой НПВХ-140х10-0,8 мм;
- гравийная обсыпка – диаметр d=0,8…2 мм;
- отстойник – труба НПВХ-140х10 мм, L=3…5 м;
- технологический снаряд для подачи гравийной обсыпки и цементного раствора ЛБТ-55 – диаметр d=55 мм;
- герметизация устья – вязкоупругий материал (смола «Аквидур ЭСП», зола-унос, вода);
- герметизация заколонного пространства – цементное кольцо, от верхней границы гравийной обсыпки до отметки 2 м ниже подошвы водоносного горизонта в базальтах.

В результате модельных испытаний по проверке герметичности резьбовых соединений при переходе с трубы НПВХ на трубу ПНД через ПНД переход и резьбовых соединений обсадных труб НПВХ-140х10 мм под воздействием высокого давления, а также применения морозостойкого клея Weld-on 727, было установлено:

1. ПНД переход с обсадной трубы НПВХ-140х10 мм на трубу ПНД-160х18 мм, резьбовое соединение которого покрыто резинобитумной мастикой, при давлении 2,5-3 атм. и более не обеспечивает герметичность резьбовых соединений труб НПВХ и ПНД и течет.
2. Резьбовые соединения труб НПВХ-140х10 мм без применения клея теряют герметичность при давлении более 3 атм. С клеем «Тангит» выдерживают давление не менее 20 атм и не теряют свою герметичность.
3. Склеенные морозостойким клеем Weld-on 727 фрагменты труб с помощью ключей и патрубка раскрутить не удалось. Клей не густеет при температуре -20…-25 °С.

По результатам испытаний была разработана усовершенствованная конструкция универсальной технологической скважины, в которой из состава обсадных колонн был исключен ПНД переход, обсадные колонны монтировались полностью из обсадных труб НПВХ полной заводской готовности с выводом их на поверхность; наряду с щелевыми фильтрами рекомендованы к использованию каркасно-дисковые фильтры, а для герметизации резьбовых соединений используются клей «Тангит» и

морозостойкий клей Weld-on 727 в холодное время года. Для герметизации устья используются крышка на кондуктор, манжета из кислотостойкой резины между колонной и кондуктором, чехол из кислотостойкого материала на колонну и кондуктор. Крупность гравийной обсыпки увеличена до 2-4 мм (рис. 1б).

Снижение стоимости сооружения типовой универсальной скважины напрямую зависит от уменьшения диаметра бурения. Уменьшение диаметра приводит к невозможности одновременного размещения в стволе скважины технологического снаряда и обсадной колонны. А это, в свою очередь, приводит к отказу от гравийной обсыпки и выполнению цементации затрубья через внутриколонное пространство. Цементация производится через цементировочные окна с помощью затрубного разделительного устройства (пакера), при этом необходимо загерметизировать в определенном интервале внутриколонное пространство между обсадной трубой и технологическим снарядом, который используется для подачи цементного раствора. Для герметизации внутриколонного пространства были проведены модельные испытания пакера ПУ-120. Эксперимент показал, что пакер обеспечивает герметизацию заданного интервала внутри колонны обсадных труб при давлении не менее 25 атм.

Согласно разработанному Технологическому регламенту на блоке 4 залежи Х1 Хиагдинского месторождения было сооружено 3 экспериментальных скважины новой конструкции (рис. 2).

Порядок бурения и оборудования экспериментальной универсальной технологической скважины (рис. 2а):

– диаметр забуривания под кондуктор (пневмоударник QL-80) – d=254 мм;

- диаметр кондуктора (стальная труба) – d=219 мм;

- диаметр бурения под фильтровую колонну (пневмоударник QL-80, базальты) – d=203 мм;

- диаметр бурения под фильтровую колонну (пески с прослоями алевритов и глин, шарошечное долото) – d=190,5 мм;

- обсадная колонна – полной заводской готовности;

- тип обсадных труб – НПВХ-140×10 мм, с модификаторами морозостойкости, ударопрочности и устойчивости к ультрафиолету;

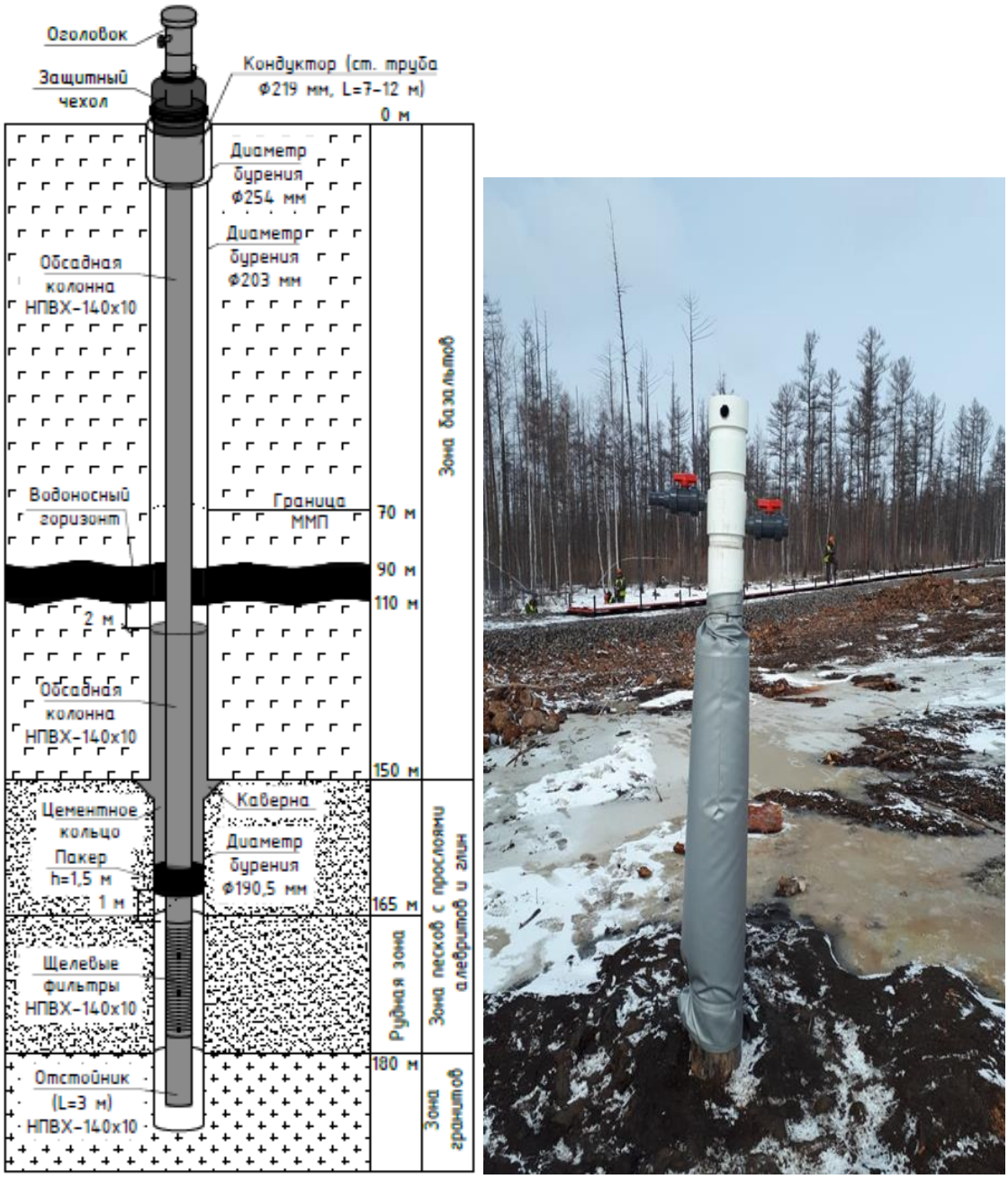
- тип резьбы – упорная, коническая для обсадных труб;

- тип фильтра – щелевой НПВХ-140х10-0,8;

- клей на резьбовые соединения – Weld-On 727, -26 °С…+43 °С;

- герметизация заколонного пространства – цементное кольцо от пакера до отметки 2 м ниже подошвы водоносного горизонта;

- герметизация устья – крышка на кондуктор, манжета из кислотостойкой резины между колонной и кондуктором, чехол из кислотостойкого материала на колонну и кондуктор (рис. 2б).



а б

Рис. 2. Экспериментальная универсальная технологическая скважина:
а) конструкция экспериментальной универсальной технологической скважины без гравийной обсыпки и с меньшими диаметрами бурения;
б) оголовок скважины с защитным кислотостойким чехлом

Проведенные расчеты показали, что стоимость сооружения 1 пог. м экспериментальной скважины на 593,5 рубля меньше стоимости 1 пог. м типовой универсальной скважины, а общая экономия стоимости сооружения скважины при средней глубине 200 м составляет 118 700 руб. Снижение стоимости достигнуто за счет:

- сокращения времени работы бурового станка;
- экономии дизельного топлива;
- экономии ФОТ;

- снижения объема цементного раствора;
- отказа от гравийной обсыпки;
- отказа от смолы «Аквидур ЭСП».

В процессе эксплуатации всех сооруженных экспериментальных скважин выявилась утечка через окна цементировочного узла. Причина – цементные кольца не обеспечивают герметизацию колонн в зоне манжет цементировочных узлов.

Чтобы устранить выявленный недостаток в конструкции сооруженных экспериментальных скважин, разработан технологический регламент восстановления герметичности и перекрытия заданных участков обсадных колонн скважин для подземного выщелачивания. Идея заключается в том, что для каждого диаметра обсадной трубы изготавливаются специальные манжеты соответствующего диаметра и требуемой длины. Манжеты изготавливаются путем литья из полиуретана, стойкого к истиранию и агрессивным средам. Определен порядок доставки манжеты к заданному участку обсадной колонны.

Для того, чтобы в дальнейшем не возникало подобных проблем, решено отказаться от окон в цементировочном узле. Подачу цемента в заколонное пространство предполагается осуществлять с помощью шланга ПНД-32 мм со стенкой 4,8 мм, закрепленного в мешке цементировочного узла и спускаемого вместе с обсадной колонной. Цена предлагаемого решения ~ 8 тыс. руб.

АО «Далур». Конструкции откачной и закачной технологических скважин, сооружаемых на месторождениях АО «Далур», приведены на рис. 3.

Порядок бурения и оборудования откачной и закачной технологических скважин:

- диаметр бурения пилот-скважины шарошечным долотом – d=132 мм;
- диаметр разбурки под обсадную колонну (пески, опоки, глины), расширитель (крокодил d=220 мм);
- тип обсадных труб: откачная скважина – труба НПВХ-140х10 мм (L=120 м) + труба НПВХ-90х8 мм; закачная скважина – труба НПВХ-90х8 мм;
- тип фильтра – ФКД-155х18-0,8 мм;
- отстойник – труба ПНД-110х18 мм, L= 5÷10 м;
- герметизация устья – цементация в интервале 0-40 м;
- герметизация заколонного пространства – колонна герметизируется в 70-метровом интервале выше цементировочного узла.

В качестве основных направлений совершенствования конструкций скважин определены: уменьшение диаметров и выбор способов бурения, применение фильтра меньшего диаметра, изменение способа гидроизоляции затрубного пространства с использованием бентогильз и колец из гидрофильной резины (КГР).

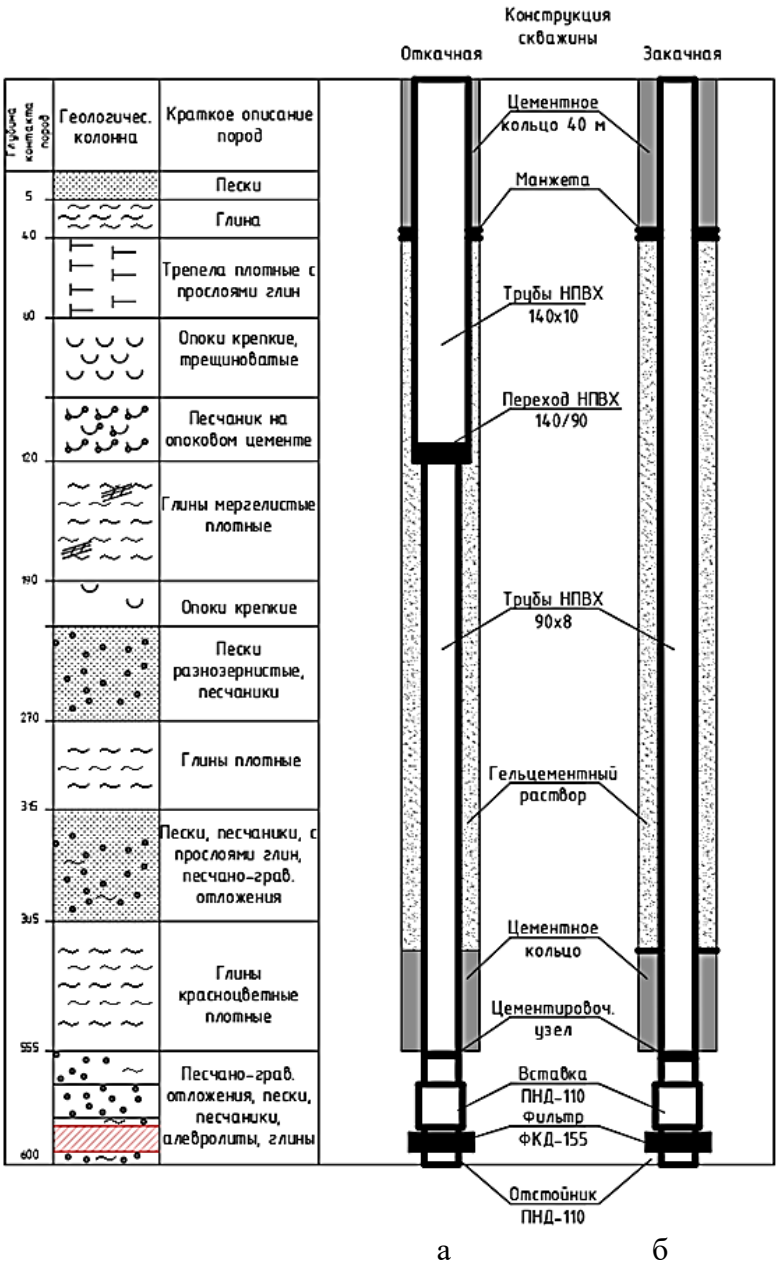
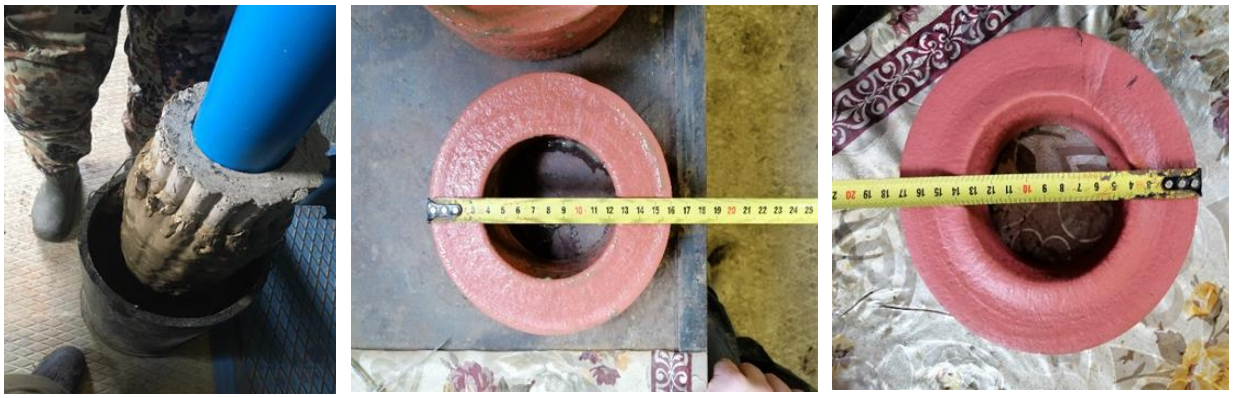


Рис. 3. Конструкция технологических скважин на месторождениях АО «Далур»:
а) откачная скважина; б) закачная скважина

Перед проведением работ по бурению экспериментальных скважин были проведены модельные эксперименты по проверке набухаемости (роспуска) бентогильз и колец из гидрофильной резины (КГР) (рис. 4).

Бентогильзы надевались на трубу НПВХ 90х8 мм и помещались на 24 часа в емкость с буровым раствором и технической водой в соотношении 2:1. Через 24 часа объем бентогильзы увеличился до 40% (Рис. 4а).

КГР, надетое на фрагмент трубы НПВХ 90х8 мм, помещалось в ведро с буровым раствором и технической водой в соотношении 2:1. Через 24 часа высота КГР увеличилась на 10 мм, диаметр – на 30 мм (рис. 4б), через 36 часов диаметр КГР увеличился на 50 мм (рис. 4в).



а б в

Рис. 4. Модельные эксперименты по набухаемости:
а) бентогильз (24 часа); б) КГР (24 часа); в) КГР (36 часов)

Результаты проведенных опытов подтвердили возможность использования бентогильз и КГР для гидроизоляции затрубного пространства вместо цементного кольца.

Сооружение 3 экспериментальных технологических скважин производилось на блоке 6А западной залежи Хохловского месторождения. Сооружение экспериментальных скважин проводилось следующим образом:

1) Бурение пилот-скважины шарошечным долотом Ø132 мм, разбурка шарошечным долотом Ø190,1 мм. Скважина оборудована обсадной колонной из труб НПВХ 90х8 мм с фильтром ФПК-155х74 мм, с бентогильзами, двумя мембранными узлами, установленными выше и ниже фильтра, и трубой ПНД 110х18 мм длиной 3,9 м, выведенной на поверхность.

2) Бурение пилот-скважины шарошечным долотом Ø132 мм, разбурка шарошечным долотом Ø171,4 мм. Скважина оборудована обсадной колонной из труб НПВХ 90х8 мм с фильтром ФПК-135х74 мм, с бентогильзами, двумя мембранными узлами, установленными выше и ниже фильтра, и трубой ПНД 110х18 мм длиной 5,9 м, выведенной на поверхность.

3) Бурение сплошным забоем шарошечным долотом Ø171,4 мм. Скважина оборудована обсадной колонной из труб НПВХ 90х8 мм с фильтром ФПК-135х74 мм, с бентогильзами, мембранным узлом, установленным над фильтром, и трубой ПНД 110х18 мм длинной 9,1 м, выведенной на поверхность.

Освоение всех скважин проводилось традиционным для АО «РУСБУРМАШ» способом.

Усредненные данные о сооруженных экспериментальных и типовых технологических скважинах включили в себя данные о затратах времени на буровые и сопутствующие работы, освоение скважин и т.д. Технико-экономический анализ и сравнительная оценка стоимости сооружения скважин показали, что экономия при сооружении 1 пог. м

экспериментальной скважины составляет 193,92 руб., а стоимость скважины в целом на 114 411,93 руб. меньше.

Снижение стоимости достигнуто за счет:

- сокращения времени работы бурового станка вследствие уменьшения диаметров проходки и исключения операций по приготовлению, закачиванию и продавке цементного раствора в заданный интервал;
- экономии дизельного топлива;
- экономии ФОТ;
- разницы в стоимости цементного раствора и бентогильз.

В результате проведённых опытно-экспериментальных работ можно сделать следующие выводы:

1. Технология сооружения экспериментальных скважин показала свою состоятельность по времени бурения и стоимости в сравнении со скважинами, сооружаемыми традиционным способом.

2. Работы по совершенствованию процессов бурения и сооружения технологических скважин необходимо продолжать.

Литература

1. Гайворонский А.А., Цыбин А.А. Крепление скважин и разобщение пластов. М., Недра, 1981, 145 с.

2. Зубарев А.Б. Условия работы, обоснование конструкции и технологии применения полиэтиленовых обсадных труб для крепления технологических скважин подземного выщелачивания металлов. Автореферат канд. дис., М., МГРИ, 1983, 24 с.

3. Калинин А.Г., Ошкордин О.В., Питерский В.М., Соловьев Н.В. Разведочное бурение. М., Недра, 2000, 748 с.

4. Крылов Д.А., Таламанов Е.Н., Булда Ю.А. Исследование взаимодействия цементного раствора с проницаемыми пластами // РНТС, Сер. «Бурение», 1981, вып. 8. С. 21-23.

5. Башкатов А.Д. Прогрессивные технологии сооружения скважин. М., Недра, 2003, 554 с.

ОПЫТ СНЯТИЯ С ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ДОБЫЧИ И ПЕРЕРАБОТКИ УРАНОВЫХ РУД И РЕКУЛЬТИВАЦИЯ НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ

В.П. Карамушка, Е.В. Дунаева, Е.Н. Камнев
АО «ВНИПИпромтехнологии», г. Москва

В районе Кавказских минеральных вод во второй половине XX века отрабатывались два урановых месторождения. Негативные последствия добычи и переработки уранового сырья сохраняются до сих пор. Поэтому организация рекультивационных и очистных работ остается актуальной и прежде всего – на урановорудных территориях.

Район Кавказских Минеральных Вод (КМВ) находится на восточном склоне Транскавказского (Ставропольский свод – Дзирульский массив) поперечного поднятия в пределах Эльбрус-Кисловодского выступа.

Геологический разрез района формируется литолого-стратиграфическими комплексами двух структурных этажей – доальпийского складчатого фундамента и мезо-кайнозойского чехла.

Фундамент залегает на глубинах 1,2–2 км. Наиболее древние в его составе докембрийские образования представлены засаутской серией, обнаженной в бассейне р. Малка и вскрытой скважинами на широте г. Кисловодска и севернее. Хасаутская серия подразделяется на три свиты – муштинскую, малкинскую и шиджатмазскую. В описываемом районе известны отложения только последней свиты, представленные ритмичным чередованием серицит-хлоритовых и кварцальбит-эпидотовых сланцев с метатуффитами мощностью 500 м.

Стратифицированные палеозойские отложения принадлежат к ордовикской, силурийской и девонской системам. Они обнажаются в среднем течении р. Малка и вскрыты скважинами в долинах рек Ольховка и Кума на глубинах до 1600 м, на восточном склоне горы Машук (1600–2000 м), на участке Калаборского месторождения минеральных вод, в районе гор Бык, Верблюд и др. Представлены эти отложения кварцитовидными песчаниками, известняками, филлитизированными алевролито-глинистыми и кремнистыми сланцами ордовика-среднего девона. Породы прорваны интрузиями позднепалеозойских гранитоидов малкинского типа и неогеновых гранит-граносиенит-порфиров Кавминского комплекса. Степень регионального метаморфизма осадочных пород соответствует фации зеленых сланцев.

На значительной части территории скважинами чаще всего вскрыты отложения пестроцветного и карбонатного кимеридж-титона (мезмайская и матламская свиты).

Почти километровая толща пород палеогена развита повсеместно к северу от широты ст. Белый Уголь, выведена на поверхность многими экструзивами (горы Машук, Змейка, Железная, Развалка, Лысая, Бык,

Верблюд и др.), хорошо изучена и стратифицирована. В ее составе выделяются 10 свит. К палеоцену относятся эльбурганская свита, свита Горячего Ключа и абазинская свита песчано-мергелисто-глинистого состава. На этих отложениях трансгрессивно залегает толща эоценовых пород, сложенных главным образом мергелями, мергелистыми глинами, известковистыми аргиллитами и в небольшом объеме известняками, согласно перекрытыми темными глинами майкопа. В ее составе выделена георгиевская (нижний эоцен), черкесская (нижний – средний эоцен), керестинская, кумская (средний эоцен) и белоглинская (верхний эоцен) свиты.

В олигоцене получил развитие своеобразный комплекс осадков, занимающий возрастной диапазон до нижнего миоцена включительно, слагающий подавляющую часть территории КМВ в междуречье рек Кумы и Подкумка и именуемый майкопской серией. Это мощная толща морских некарбонатных или слабокарбонатных глин, в том числе с костными остатками рыб, с подчиненными слоями песчаников и мергелей.

По внешнему виду, химическому и минеральному составу породы интрузивов довольно однообразны и относятся к группе лейкократовых щелочных образований. Они имеют светло-серый цвет, порфировую и микрогранитовую структуру основной массы и отнесены к гранит-порфирам (горы Бештау, Бык, Шелудивая, Джуца и др.), граносиенит-порфирам (горы Железная, Развалка, Змейка, Медовая, Острая, Тупая и другие), кварцевым сиенит-порфирам (горы Верблюд, Лысая, Юца и др.). Все разновидности пород связаны между собой взаимопереходами.

На горах Бештау и Бык северо-восточные разрывы несут промышленное урановое оруденение. Узлы пересечения субширотных и субмеридиональных разрывнотрещинных зон наиболее благоприятны для формирования месторождений минеральных вод.

Первые тонны урановой руды были добыты в 1951 г., первая тонна закиси-окиси урана выпущена в 1954 г. Добыча руды на руднике № 1 (Бештау) была прекращена в 1971 г., на руднике № 2 (Бык) – в 1990 г.

С 1975 г. гидрометаллургический завод в г. Лермонтов наряду с местной рудой также перерабатывал привозную руду месторождения Желтые Воды (Украина) и уранфосфорные рудные концентраты месторождений Прикаспийского горно-металлургического комбината (Казахстан, полуостров Мангышлак, г. Шевченко).

Первоначально урановые руды перерабатывали по кислотно-содовой осадительной схеме, затем в 1959 г. завод был реконструирован с переводом на кислотную бесфильтрационную сорбционно-экстракционную схему, а в 1972 г. вторично реконструирован под использование комплексной схемы с выпуском сложных фосфорных удобрений и закиси-окиси урана.

В 1994 г. Лермонтовское производственное объединение «Алмаз» было акционировано с выделением из его состава трех предприятий:

«Гидрометаллургический завод», «Электротехнический завод» и совхоз «Горный». Выведенные из эксплуатации рудники № 1 и 2 (Бештау и Бык) и хвостохранилище гидрометаллургического завода (ГМЗ) остались на балансе государства, остальные обслуживающие предприятия – мастерские, база отдыха, профилакторий, база стройматериалов, ТЭЦ, базы хранения горючего и автозаправки – были проданы на аукционах.

Иными словами, на балансе государства остались наиболее опасные и загрязненные объекты, требующие больших затрат на рекультивацию загрязненных территорий и приведение их в безопасное состояние.

При эксплуатации рудников образовались отвалы забалансовых руд и загрязненных пород, расположенные на территории площадью 36 га на руднике № 1 (Бештау), 18,4 га на руднике № 2 (Бык). Отходы гидрометаллургического завода, полученные при переработке урановых руд, были сосредоточены в открытом хвостохранилище площадью 79,7 га. Общий объем накопленных отходов составляет около 18,8 млн т, из которых на хвостохранилище приходится 14,1 млн т и на отвалы рудников – более 4 млн т. Общая площадь загрязненных территорий составляет 167 га.

Работы по ликвидации рудников и закрытию штолен и стволов выполнялись до 1994 г. по техническим решениям предприятия в соответствии с действовавшими на тот период нормативами. Было демонтировано оборудование стволов и штолен, закрыты выходы из них, выположены откосы, укрыта поверхность отвалов забалансовых руд и загрязненных пород; шахтные стволы предварительно засыпаны, открытые штольни перекрыты решетками, порталы засыпаны на 20–30 м породами, построена установка очистки шахтных вод на штольне № 16 рудника № 1 (Бештау).

Тем не менее, эрозия и обвалы в 1990–1993 гг. изменили состояние отвалов и выявили недостатки выполненных работ по ликвидации штолен и отвалов в части возможного проникновения человека в отработанные горные выработки и устойчивости отвалов.

В хвостохранилище ГМЗ с 1954 г. складировали хвосты уранового производства, а с 1991 г. – фосфогипс от переработки апатита. Проведенные исследования показали, что последний является хорошим изолирующим материалом, позволяющим предотвратить эксхаляцию радона. На основании этих исследований в 1996–1998 гг. институтом «ВНИПИпромтехнологии» выполнен проект, предусматривающий использование фосфогипса в качестве изолирующего материала в процессе вывода из эксплуатации и рекультивации хвостохранилища. По данному проекту проведены опытно-промышленные работы по укладке фосфогипса на карте № 5 хвостохранилища, которые подтвердили возможность его использования.

Учитывая особую значимость Кавказских Минеральных Вод, отмеченную в Указе Президента РФ об «Особо охраняемом эколого-

курортном регионе Российской Федерации» от 27 марта 1992 г. № 309, и в целях эффективного использования зарубежного опыта, полученного в процессе работ с урановыми отходами в государствах Евросоюза и Восточной Европы, правительством России было принято решение обратиться к ЕС с просьбой оказать техническое содействие в разработке эффективной программы рекультивации объектов уранового производства в Лермонтовском регионе.

В рамках программы ЕС консорциумом в составе: ВИСМУТ ГмбХ (г. Хемниц), ВИЗУТЕК ГмбХ (г. Хемниц), С&Е ГмбХ (г. Хемниц), Г.Е.О.С. ГмБХ (г. Фрайберг) совместно с ОА «Атомредметзолото» (г. Москва), АО «ВНИПИпромтехнологии» (г. Москва), ГМЗ (г. Лермонтов) разработана «Концепция по рекультивации урановых рудников на бывшем государственном предприятии «Алмаз» в г. Лермонтов, Россия» (EUROPAID/116483/C/SV/RU).

Концепцией определены необходимость выполнения рекультивационных работ, пределы необходимой защиты, учтены социальные аспекты развития курортного региона, приняты во внимание пожелания жителей г. Лермонтова и администрации региона.

Базируясь на основных положениях концепции, в развитие п. 112 ФЦП «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года», институтом «ВНИПИпромтехнологии» был проведен комплекс инженерно-экологических изысканий, разработана проектная документация, которая успешно прошла государственную экологическую экспертизу. В настоящее время ведутся рекультивационные работы.

Выполнению проектных работ предшествовало изучение материалов наблюдений за состоянием первого от поверхности водоносного горизонта в районе ГМЗ и хвостохранилища, а также в поверхностных водотоках. На основании анализа данных более чем за десятилетний период сделаны следующие основные выводы:

- на поведение радиоактивных элементов в минеральных водах курортов КМВ какого-либо заметного влияния не оказали ни геологоразведочные работы в пределах Бештаугорского и Быкогорского участков, ни промышленная отработка месторождений горным способом и методом подземного выщелачивания;

- повышенные концентрации радиоактивных элементов в некоторых типах минеральных вод Кисловодска, Пятигорска и Железноводска обусловлены естественными геологическими и специфическими гидрогеохимическими условиями, способствующими растворению и выносу радиоактивных элементов из пород с повышенным содержанием радиоактивных элементов;

- разработка месторождений привела к некоторому загрязнению радиоактивными веществами поверхностных вод и аллювиальных отложений по ходу стока этих вод. Однако предприятие принимало все возможные меры, вплоть до установки очистных сооружений, чтобы не

допустить загрязнений выше установленных нормативов, что в подавляющем большинстве случаев соблюдалось;

- после окончания горных работ на месторождениях загрязнение поверхностных вод существенно снижается. На Быковском руднике и на штольне № 32 Бештаугорского рудника эти загрязнения значительно ниже допустимых нормативов, а на штольне № 16 Бештаугорского рудника для снижения концентрации до нормативных значений до 1991 г. использовали очистные сооружения. Анализ данных наблюдений за период 1991–2010 гг. указывает на необходимость строительства новых очистных сооружений.

Постоянно проводимый мониторинг за расходами и составом вод, вытекающих из штольни № 16, показывает, что необходимость их очистки наряду с радиационными факторами продиктована и их химическим составом.

По материалам наблюдений, водоприток из штольни составляет от 25 до 50 $м^3$/ч. Принятая проектная производительность – 50 $м^3$/ч.

Проектом предусматривается реагентный метод очистки, так как данный метод был отработан на реальных водах при проектировании институтом «ВНИПИпромтехнологии» очистных сооружений для рудников № 6, 2 и 4 ПАО «ППГХО» (Забайкальский край).

В штольне № 16 на расстоянии 1950 м от устья расположена самоизливающаяся скважина радонсодержащей воды, которая подается на курорты г. Пятигорск. Проектом предусмотрены и осуществлены реконструкция скважинного оголовка, прокладка трубопровода из коррозионностойкой стали с омоноличиванием бетоном. Данная конструкция позволяет обеспечить эксплуатацию скважины без доступа персонала.

Согласно анализу имеющихся данных, основными источниками радиоактивного загрязнения окружающей среды являются выделения радона с поверхности хвостохранилища, а также просачивание радионуклидов через ограждающие дамбы с грунтовыми водами и их попадание далее в гидросистему и поверхностные воды.

Измеренные значения эксхаляции (потока) радона с поверхности хвостохранилища и прилегающей территории (мБк/($м^2$·с)) и мощности экспозиционной дозы (МЭД) гамма-излучения на высоте 1 м (мкР/ч) представлены в табл.

По данным, приведенным в таблице, можно сделать следующий выводы:

- интенсивность эксхаляции радона (ИЭР) с единицы поверхности дамб и карт, не имеющих изолирующего покрытия (фосфогипс), составляет 1500–7800 мБк/(с·$м^2$);

- МЭД внешнего гамма-излучения на этих участках находится в пределах 110–350 мкР/ч;

- на участках, покрытых фосфогипсом и грунтом, ИЭР и МЭД не превышают нормативных значений и, как правило, не отличаются от

фоновых показателей. Исключение составляет участок дамбы 5, покрытый неуплотненным фосфогипсом, где ИЭР в среднем в 2,5 раза превышает допустимый уровень;

- на участках территории, примыкающих к хвостохранилищу и используемых для забора грунта и для сельскохозяйственных целей, ИЭР и МЭД находятся на фоновом уровне;

- карту 6 (пруд-осветлитель) необходимо рекультивировать.

Таблица

Данные измерений потока радона и гамма-излучения
с поверхности хвостохранилища (2011 г.)

Участок	Материал верхнего слоя	Число измерений	Потоки радона, мБк/(м^{2*}с)		МЭД, мкР/ч	
			пределы	среднее	пределы	среднее
Дамба 1	Песок	17	50–14700	3700	50–550	330
Дамба 4	То же	32	450–35600	7800	75–390	280
Карта 4	-«-	2	1300–1970	1640	300–400	350
Дамба 5	Грунт Фосфогипс	6 9	20–110 990–3940	70 2510	10–18 10–28	14 21
Карта 5	Фосфогипс Хвосты Грунт	11 4 4	20–80 640–130 20–960	30 960 610	10–14 120–250 14–12	12 200 16
Карта 5а	Фосфогипс	10	20–290	70	13–42	23
Дамба 5б	То же	2	50–80	65	56–64	60
Карта 6	Илы	12	110–2800	1480	60–180	110
СЗЗ хвосто-хранилища	Почва	18	30–390	120	14–34	22

Проведенные институтом в 2011 г. исследования (см. табл.) показывают, что илы имеют радиоактивное загрязнение и при подсушке карты будут служить источником загрязнения значительных территорий в результате ветрового разноса, что подтверждено результатами плановых исследований, проведенных специалистами ВНИПИпромтехнологии в 2017 г. и оперативными данными, полученными от экологической службы предприятия, а также ФМБА РФ.

После проведения предварительных оценок специалистами института был предложен вариант окончательной ландшафтной рекультивации, предусматривающий планировку каскада карт хвостохранилища фосфогипсом под один уклон от природной отметки ниже карты 6 до природной отметки выше каскада хвостохранилища с последующей посадкой укрепляющих склон деревьев, предпочтительно хвойных.

Данный вариант позволит продлить на 20–30 лет работу градообразующего предприятия (ГМЗ) и органично вписать техногенный рельеф в окружающую природную среду, что очень важно для курортной зоны.

Наряду с техническими вопросами рекультивации объектов

урановой добычи специалисты института рассматривали возможные перспективы использования рекультивируемых территорий с оценкой возможности их включения в курортный кластер. Учитывая, что на горе Бештау возрожден Успенский Второафонский мужской монастырь, и данное место активно посещается туристами из здравниц Кавказских Минеральных Вод, предлагается в одной из штолен на горе Бештау создать музей горного дела, посвященный добыче и переработке урановых руд.

Примером может служить созданный СГО «Висмут» музей на отработанной шахте «Ауэ» в Саксонии (Германия).

Кроме перечисленных направлений использования рекультивированных площадей, заслуживает внимания совместная разработка Института курортологии (г. Пятигорск) и АО «ВНИПИпромтехнологии» по созданию в одной из штолен рудника № 2 (г. Бык) эманотория для приема сухих радоновых ванн, более эффективных, чем традиционные. В мировой практике такие объекты имеются.

Считаем, что указанные направления заслуживают включения в госпрограмму «Развитие Северного Кавказа».

По результатам исследований на рассматриваемом объекте, а также в соответствии с данными, полученными практически на всех предприятиях уранодобывающей отрасли, специалистами института была разработана методика, позволяющая определить толщину противорадонового слоя для любых конкретных условий (Санитарные правила ликвидации, консервации и перепрофилирования предприятий по добыче и переработке радиоактивных руд «СПЛКП-91» № 6028-91).

Запроектированный и частично выполненный комплекс рекультивационных работ весьма эффективен, просматриваются дальнейшие перспективы использования рекультивируемых территорий.

Заключение

1. Применение фосфогипса как строительного материала при выполнении рекультивационных и ландшафтных работ намного эффективнее по сравнению с глинами и суглинками, традиционно используемыми в качестве радонозадерживающего слоя на хвостохранилищах и отвалах. При отказе от фосфогипса для рекультивационных работ потребуется более 1 млн $м^3$ глины или суглинка, что обеспечить в природных и экологических условиях Кавказских Минеральных Вод невозможно.

2. Опыт реализации комплекса работ на рассматриваемых месторождениях показывает, что в перспективных проектах добычи и переработки урановых руд на проектной стадии освоения месторождения необходимо оценивать возможные направления перепрофолирования производства по окончанию отработки месторождений с учетом всех затрат, связанных с рекультивационными и дезактивационными работами, а также

обеспечением новых рабочих мест и сохранением инфраструктуры.

3. Единственным нормативным документом, определяющим регламенты и объемы рекультивационных работ на объектах уранодобывающей отрасли, являются вышеупомянутые «СПЛКП-91». Но данный документ устарел и не соответствует современным требованиям радиационной безопасности и современным технологиям.

Институт «ВНИПИпромтехнологии» готов переработать данный норматив с включением в него авторских технологий и методик, позволяющих оптимизировать весь цикл рекультивационных работ – от инженерных изысканий до окончания строительно-монтажных работ и организации системы мониторинга.

Литература

Карамушка В.П., Камнев Е.Н., Кузин Р.Е. Рекультивация объектов добычи и переработки урановых руд. – М.: Горная книга, 2014. – 182 с.

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДВУХСТАДИЙНОГО ПРОТИВОТОЧНОГО СПОСОБА ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ В ГИДРОМЕТАЛЛУРГИИ УРАНА, РЕДКИХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Д.В. Майников, В.А. Толкачев, С.М. Радушинский
АО «ВНИПИпромтехнологии», г. Москва

За рубежом в 50-70-е годы XX века наряду с общеизвестным прямоточным одностадийным способом кислотного выщелачивания урана в промышленной практике на некоторых заводах использовался двухстадийный способ противоточного выщелачивания. Сущность этого способа заключается в следующем (рис. 1).

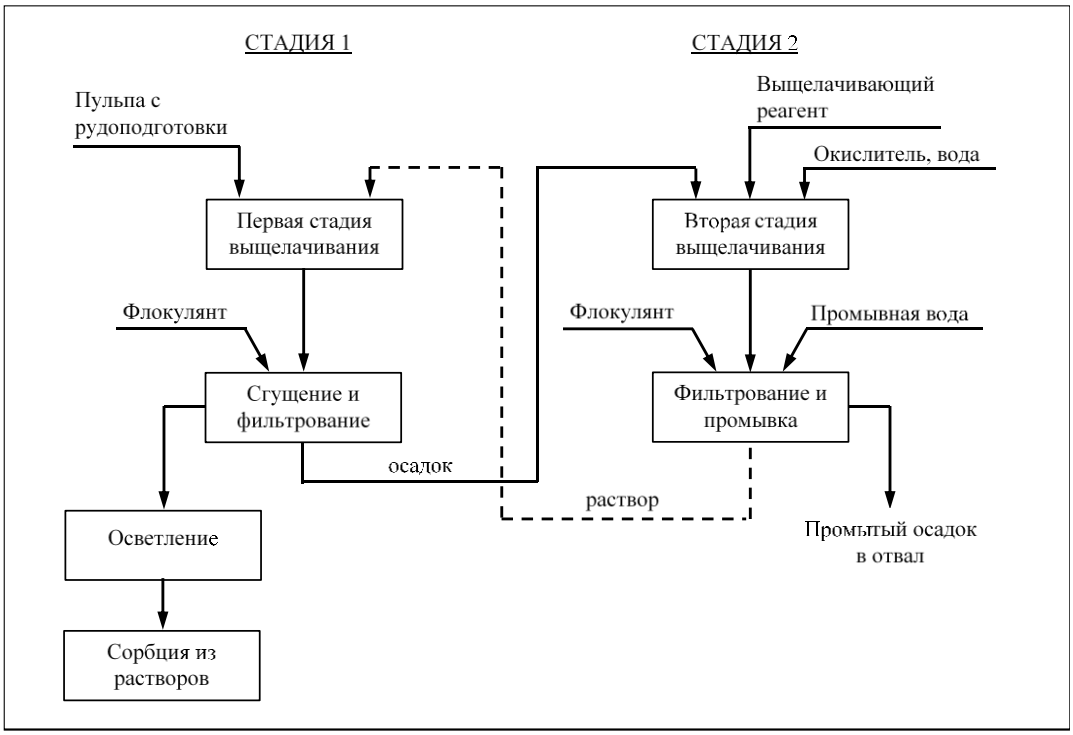


Рис. 1. Принципиальная схема противоточного двухстадийного выщелачивания

Измельченный твердый материал, как правило, в виде сгущенной пульпы после процесса рудоподготовки поступает на первую стадию выщелачивания. На первой стадии в системе реакторов или пачуков используют кислотный раствор низкой концентрации со второй стадии. После выщелачивания пульпу первой стадии разделяют с использованием сгущения и фильтрования, твердую фазу с минимальным количеством влаги направляют на вторую стадию, куда подают все количество выщелачивающего реагента с окислителем. После разделения пульпы и промывки осадок на второй стадии направляют в отвал, а раствор процесса разделения и промывки транспортируют на первую стадию. Полученный

на первой стадии раствор с минимальным количеством выщелачивающего реагента после осветления направляется на сорбционную или экстракционную переработку.

Преимущество этого способа выщелачивания по сравнению с прямоточным одностадийным выщелачиванием заключается в том, что одинаковое извлечение ценного компонента из осадка достигается при меньшем расходе выщелачивающего реагента или при одинаковом расходе реагента при противоточном способе получается более высокое извлечение.

В СССР и странах народной демократии ни на одном из 18 заводов по переработке урана этот способ не применялся. Возможно, это было связано с тем, что противоточный двухстадийный способ выщелачивания предполагал операции фильтрования пульп на обеих стадиях и получение осветленного товарного раствора для последующей сорбционной переработки, в то время как на всех заводах извлечение урана после процесса одностадийного выщелачивания осуществлялась сорбцией из пульп. Упоминание о двухстадийном противоточном выщелачивании урана мы находим в работе [1], изданной в 1961 году. Позже в работах [2, 3], составленных по материалам, опубликованным в иностранной периодической литературе, наряду с описанием процессов переработки урановых руд по различным технологическим схемам содержатся характеристики некоторых заводов, на которых использовался двухстадийный способ противоточного выщелачивания.

Так, например, в США на заводе «Лаки Мак» фирмы «Юта Интернешнл» [2] в 60-е годы использовалась противоточная двухстадийная схема с атмосферным выщелачиванием на первой и второй стадиях, с разделением пульпы на первой стадии в сгустителе, а на второй в системе непрерывной противоточной декантации (НПД). Такая схема позволяла частично нейтрализовать избыточную кислотность свежей рудой и, главное, одновременно снизить кислотность и ОВП, что благоприятно сказывалось на последующем процессе сорбции из растворов.

На заводе [2] «Юравэн» (США) для выщелачивания урана и ванадия использовалось двухстадийное выщелачивание. Разделение пульпы на первой стадии также осуществлялось в сгустителе, а на второй стадии при относительно небольшом расходе промывной воды в системе НПД, состоящей из восьми сгустителей.

На американском заводе фирмы «Пасфиндер майнз корпорейшн» [2] с производительностью 1800 т руды в сутки в соответствии с проектом планировалось двухстадийное выщелачивание руды. Однако его не удалось освоить из-за недостатка подготовленного персонала. Кислотность на второй стадии рассчитывается таким образом, чтобы в растворе оставался избыток кислоты, достаточный для нейтрализации карбонатов, содержащихся в поступающей на первую стадию исходной пульпы.

В настоящее время нам неизвестны какие-либо сообщения об использовании этого способа выщелачивания в отечественной

промышленности. Имеются лишь результаты лабораторных и укрупненных исследований двухстадийного противоточного способа выщелачивания марганца из шлака (ЮАР), лабораторных исследований выщелачивания меди, цинка, кобальта и молибдена из комплексного сульфидного концентрата [4] Центрального Казахстана, а также не совсем удачные результаты промышленных испытаний процесса переработки черносланцевых ванадийсодержащих руд месторождения Бала-Саускандык на опытном предприятии с производительностью 2 т в час в Казахстане.

В 2020 году в АО «ВНИИХТ» были проведены сравнительные лабораторные исследования прямоточного и противоточного способов выщелачивания марганца из шлака, образованного после производства силикомарганца (ЮАР). При прямоточном выщелачивании в реакторе шлака массой 100 г серной кислотой в количестве 50 % к массе твердого при времени выщелачивании 3 часа и температуре 85°С, крупности измельченного материала -0,3 мм извлечение марганца составило 45,3 %. При противоточном выщелачивании, осуществляемом в периодическом режиме, после шести циклов эффективность извлечения увеличилась до 56,5 % при прочих одинаковых условиях.

В опубликованной работе [4] представлены результаты лабораторных исследований азотнокислой переработки медного флотоконцентрата, полученного из руды месторождения Саяк IV (Центральный Казахстан), методами прямоточного и двухстадийного противоточного выщелачивания. В отличие от выщелачивания марганца выщелачивание меди происходило в непрерывных условиях при производительности 200 г твердого в час. Исследования показали, что проведение процесса в режиме двухстадийного противотока позволяет получить продуктивные растворы, поступающие на сорбцию, с меньшей остаточной кислотностью и более низким ОВП, а также снизить расход азотной кислоты почти в два раза без снижения уровня извлечения ценных компонентов.

В период 2011 года на опытном заводе ОХТЗ АО «ВНИИХТ» впервые были проведены исследования переработки ванадийсодержащей руды из черных сланцев месторождения «Бала-Саускандык» (Казахстан). Было изучено влияние основных параметров процесса одностадийного прямоточного автоклавного выщелачивания на степень извлечения ванадия в раствор. Показано, что для достижения извлечения ванадия в раствор на уровне 82,84 % потребуются: расход кислоты (масс.) 14-16 %, остаточная концентрация кислоты 70-80 г/л, соотношение Ж : Т=1:1, температура 140 °С, продолжительность процесса 3 часа. Для достижения извлечения ванадия в раствор на уровне 90-95 % необходим более высокий удельный расход серной кислоты – свыше 16-18 %. Это исключает возможность рентабельного получения ванадия из черных сланцев даже при попутном извлечении урана, суммы РЗМ и других ценных компонентов. С целью достижения высоких показателей переработки был предложен способ [5] двухстадийного противоточного выщелачивания.

На основании исследований двухстадийного противоточного выщелачивания были выданы исходные данные на проектирование опытного предприятия по переработке ванадийсодержащей руды с производительностью 2 т/ч (рис. 2).

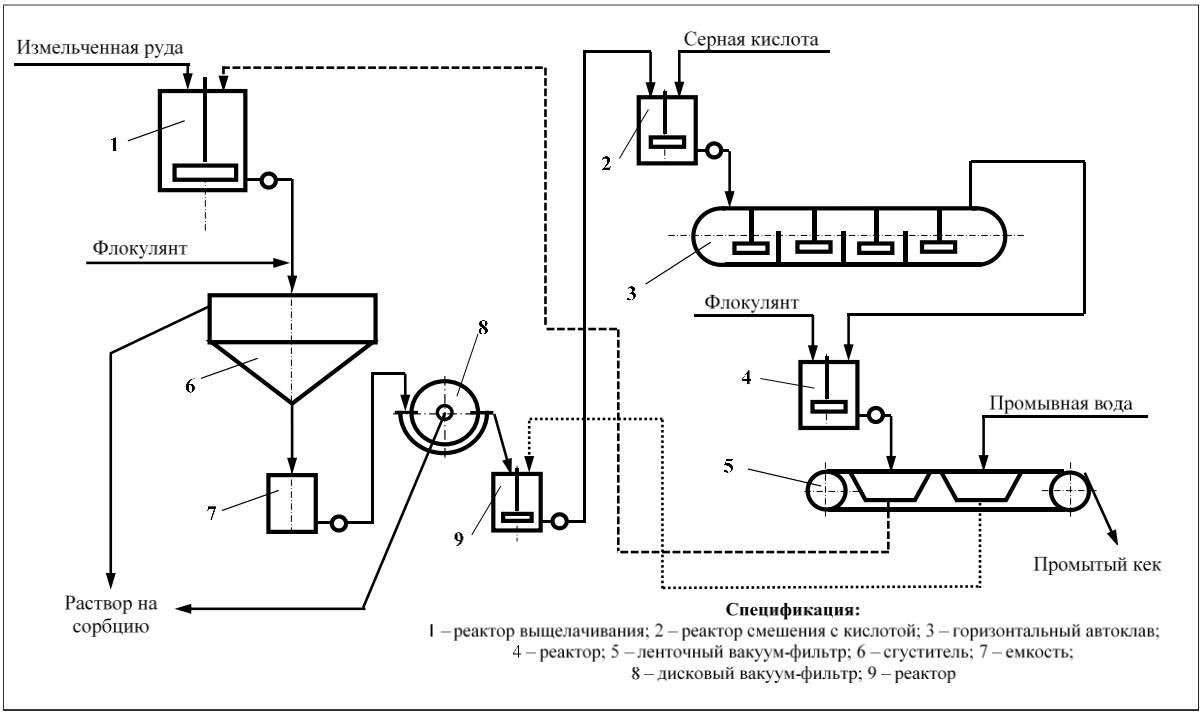


Рис. 2. Аппаратурно-технологическая схема переработки ванадийсодержащей руды [5]

На второй стадии на операции выщелачивания использовался горизонтальный автоклав, для фильтрования пульпы и промывки осадка был установлен ленточный вакуум-фильтр. Опытный завод был построен и эксплуатировался с более высокой производительностью до 3 т/ч. Вместе с тем на этом предприятии не все наши проектные технические решения были реализованы в полной мере. Очень часто автоклав, изготовленный в Китае, выходил из строя, а ленточный вакуум-фильтр не эксплуатировался в соответствии с требованиями. Наши специалисты не были приглашены для проведения работ. Сработал такой же отрицательный фактор, как и на американском предприятии «Пасфиндер майнз корпорейшн» – недостаток подготовленного персонала.

В марте 2015 года были повторно проведены три опыта укрупненных исследований процесса извлечения ванадия и сопутствующих ценных компонентов (урана, молибдена и РЗМ) с использованием двухстадийного противоточного выщелачивания, включающих атмосферное выщелачивание на первой стадии и автоклавное на второй при удельном расходе кислоты ~13,45 %. Извлечение ванадия в опытах составило (%): 87,0; 90,1; 95,5 (в среднем 90,8 %), т.е. повторно были подтверждены преимущества двухстадийного противоточного выщелачивания.

Начатые повторные переговоры о возобновлении работ были прерваны вследствие того, что одна из фирм Великобритании предложила казахской фирме «Балауса» полное финансирование всех работ по переработке ванадийсодержащей руды.

В заключение следует отметить, что способ двухстадийного противоточного выщелачивания со временем будет широко использоваться в гидрометаллургии урана, редких и цветных металлов в связи с необходимостью переработки упорных руд, для вскрытия которых требуется высокая концентрация реагентов и столь же высокое их остаточное содержание.

Полагаем, что предлагаемый способ может быть использован для переработки карбонатных руд Рудника № 6 ПАО «ППГХО» с целью сокращения выщелачивающего реагента – соды и снижения его остаточной концентрации в растворах, поступающих на сорбционное извлечение урана и молибдена. Как следствие, этот способ позволит использовать избыточное количество маточного раствора для фильтрационно-репульпационной промывки отвального осадка, поступающего для заполнения отработанных карьеров, исключить строительство нового наливного хвостохранилища и замкнуть технологическую схему по жидкой фазе.

Литература

1. Шевченко В.Б. Технология урана / В.Б. Шевченко, Б.Н. Судариков. – М.: Госатомиздат, 1961. – 330 с.

2. Гидрометаллургическая переработка уранорудного сырья / Ю.В. Смирнов, З.И. Ефимова, Д.И. Скороваров, Г.Ф. Иванов; под ред. Д.И. Скороварова. – М.: Атомиздат, 1979. – 280 с.

3. Зефиров А.П. Заводы по переработке урановых руд в капиталистических странах / А.П. Зефиров, Б.В. Невский, Г.Ф. Иванов. – М.: Госатомиздат, 1962. – 372 с.

4. Лабораторные испытания гидрометаллургического способа переработки полиметаллического сырья центрального Казахстана / Н.А. Бобыренко, Е.Ю. Мешков, А.А. Соловьев, С.В. Захарьян // Горный журнал. – 2021. – № 3. – С. 92-97.

5. Патент РФ № 2493273 С2, МПК С22В 3/08, 34/22, 60/02, 59/00. Способ переработки черносланцевых руд / Школьник В.С., Жарменов А.А., Козлов В.А., Кузнецов А.Ю., Бриджен Н.Д., Толкачев В.А., 2013, Бюл. № 26.

АВТООЧИСТКА ОСТАТОЧНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ РАСТВОРОВ ДВУХСКВАЖИННОГО ОПЫТА ПВ-89 НА ДОБРОВОЛЬНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ УРАНА

М.Д. Носков[1], А.Г. Кеслер[1], Т.С. Теровская[1],
Ю.И. Лаптев[2], Г.И. Авдонин[3], А.В. Сащенко[3]
1 – СТИ НИЯУ МИФИ, г. Северск,
2 – АО «Далур», Курганская обл., с. Уксянское,
3 – ФГБУ «ВИМС», г. Москва

АО «Далур» ведет разработку месторождений, относящихся к Зауральскому ураново-рудному району, методом сернокислотного скважинного подземного выщелачивания (СПВ). Планы развития предприятия предполагают освоение Добровольного месторождения, расположенного в Звериноголовском районе Курганской области. Важным условием добычи урана методом СПВ является обеспечение экологической безопасности разработки месторождения. Поэтому на стадии проектирования разработки месторождения целесообразно оценить защитные геохимические свойства пород продуктивного горизонта по отношению к остаточным технологическим сернокислым растворам, образующимся в результате добычи урана методом сернокислотного СПВ. Для оценки автоочищающей способности геологической среды были выполнены исследования керна контрольных скважин в области двухскважинного опыта ПВ-89 на Добровольном месторождении и проведено математическое моделирование изменения состояния продуктивного горизонта.

Добровольное месторождение урана было выявлено в 1986 году в Зауральском рудном районе. Месторождение локализовано в палеоаллювиальных отложениях средне-верхнеюрского возраста, выполняющих депрессионную эрозионную структуру (Убаганскую палеодолину) в породах кристаллического фундамента, залегающих на глубинах 480-600 м от земной поверхности [1, 2]. Содержание урана в песках составляет 3,1–5,2 г/т, в глинах – 5,3–10,2 г/т. Руды представляют собой первично сероцветные породы, богатые органическим веществом и дисульфидами железа [2]. Основными породообразующими минералами являются кварц, калиевый полевой шпат, каолинит, мусковит, иллит.

Продуктивный водоносный горизонт относится к зоне затруднённого водообмена. Скорость движения подземных вод составляет первые сантиметры в год. Литологически водовмещающая толща представлена аллювиальными и пролювиальными образованиями. Ритмично чередующиеся прослои разнозернистых песков, песчаников и гравийно-песчаных отложений разделены глинистыми водоупорами, имеющими переменную мощность. Воды рудоносного комплекса по условиям залегания – межпластовые напорные, водопроводимость пласта колеблется

от 11,6 м^2/сутки до 195,8 м^2/сутки, средний коэффициент фильтрации от 3,6 до 15,2 м/сутки. Воды преимущественно солёные, с минерализацией 11,1–13,0 г/л. В составе макрокомпонентов преобладают хлориды натрия. Значение окислительно-восстановительного потенциала в водах изменяется от +60 до +120 мВ. Содержание урана в воде достигает $7{,}8 \cdot 10^{-6}$ г/л, при фоновых концентрациях в горизонте $1 \cdot 10^{-6}$ г/л.

В 1990 году на Добровольном месторождении урана было проведено геотехнологическое опробование с целью определения прогнозных геотехнологических показателей отработки месторождения. Полигон опытного геотехнологического опробования включал в себя скважины: Т-1 – откачная, Т-2 – нагнетательная, Т-3 – поглощающая, Г-8 – водоснабженческая, Г-9 – наблюдательная. Схема расположения откачной, нагнетательной и наблюдательной скважин приведена на рис. 1.

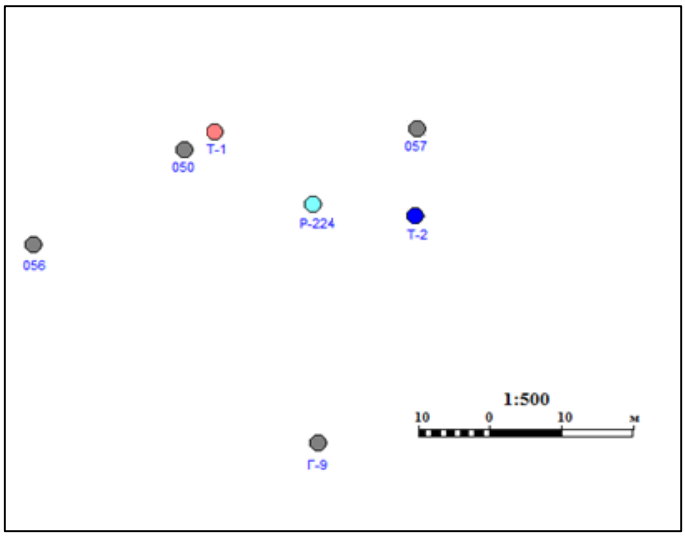


Рис. 1. Схема расположения скважин на полигоне опытного геотехнологического опробования

Двухскважинный опыт проводился в период с 06.01.1990 по 23.09.1990 гг. по схеме В.А. Грабовникова [3], дебит откачной скважины превышал дебит закачной скважины в 5 раз. Первые два месяца испытаний концентрация кислоты в выщелачивающем растворе составляла около 10 г/л. С третьего по пятый месяцы концентрация поддерживалась на уровне 20 г/л. Затем концентрацию увеличили до 30 г/л. На завершающей стадии опыта средняя концентрация кислоты составляла 40 г/л. В процессе опыта были достигнуты следующие геотехнологические показатели: величина Ж/Т достигла 0,94; кислотоёмкость руды – 8,9 кг/т; извлечение урана – 26,1%; средняя концентрация урана в откачных растворах составила 99 мг/л [3].

С 16.07.2020 по 21.07.2020 года на участке двухскважинного опыта ПВ-89 на Добровольном месторождении между откачной и закачной скважинами была сооружена контрольная скважина Р-22 (см. рис. 1). При сооружении контрольной скважины проведен отбор керновых проб в интервале от кровли до подошвы продуктивного водоносного горизонта. Химический состав пород и руд определялся полуколичественным

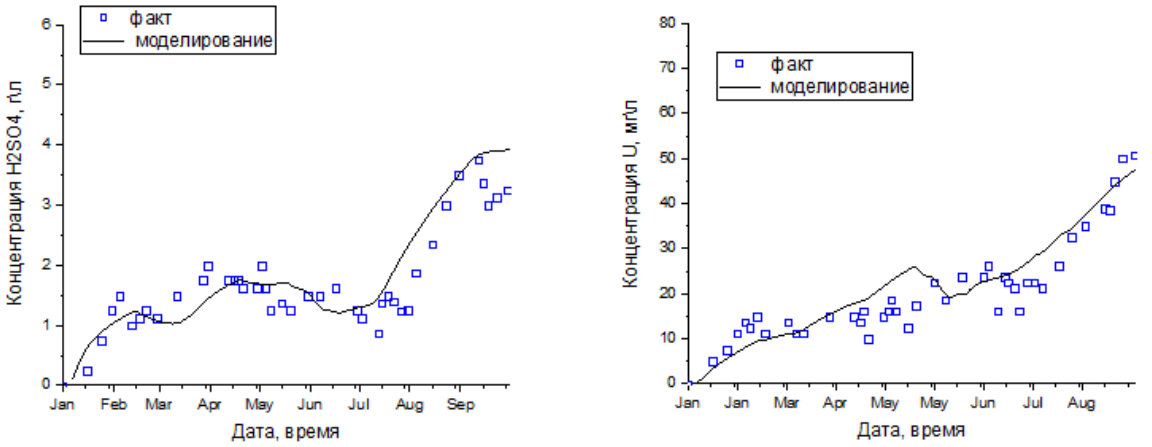
рентгено–спектральным анализом и химическим силикатным анализом. Минералого-аналитические исследования включали традиционные и прецизионные методы: авторадиографию штуфов для определения характера распределения урановой минерализации; петрографическое изучение шлифов горных пород с целью установления их минерального состава; рентгенографический фазовый анализ. Также были проведены исследования на рентгеновском микроанализаторе, укомплектованном энергодисперсионной приставкой и на электронном растровом микроскопе. Анализ состава водных вытяжек проводился методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Микробиологические исследования проводились с помощью посева на элективные питательные среды. Численность микроорганизмов определялась методом предельных разведений в двукратной повторности.

Математическое моделирование изменения состояния продуктивного горизонта в процессе и после завершения двухскважинного опыта проводилось с помощью специализированной информационно-моделирующей системы, предназначенной для решения геоэкологических задач при разработке месторождений урана способом СПВ [4,5]. Разработанное программное обеспечение основано на математической модели, описывающей изменение напоров в водоносном горизонте, фильтрацию жидкости и связанный с ней конвективный массоперенос, гидродинамическую дисперсию, комплексообразование, ассоциацию-диссоциацию кислот, сорбцию, выпадение осадков, растворение и переотложение минералов, гомогенные и гетерогенные окислительно-восстановительные процессы.

Моделирование изменения состояния продуктивного горизонта в процессе и после завершения двухскважинного опыта проводилось на основе сопряжённой трёхмерной геолого-гидрогеологической модели. Модель была создана на основе данных, полученных при сооружении скважин полигона опытного геотехнологического опробования. Область моделирования включала в себя участок продуктивного горизонта, а также прилегающие к нему части перекрывающего и подстилающего водоупоров. Расчёты проводилось с использованием реальных дебитов скважин и состава выщелачивающего раствора. Сравнение рассчитанных и фактических временных зависимостей концентрации урана и концентрации серной кислоты в откачных растворах скважины Т-2 приведены на рис. 2.

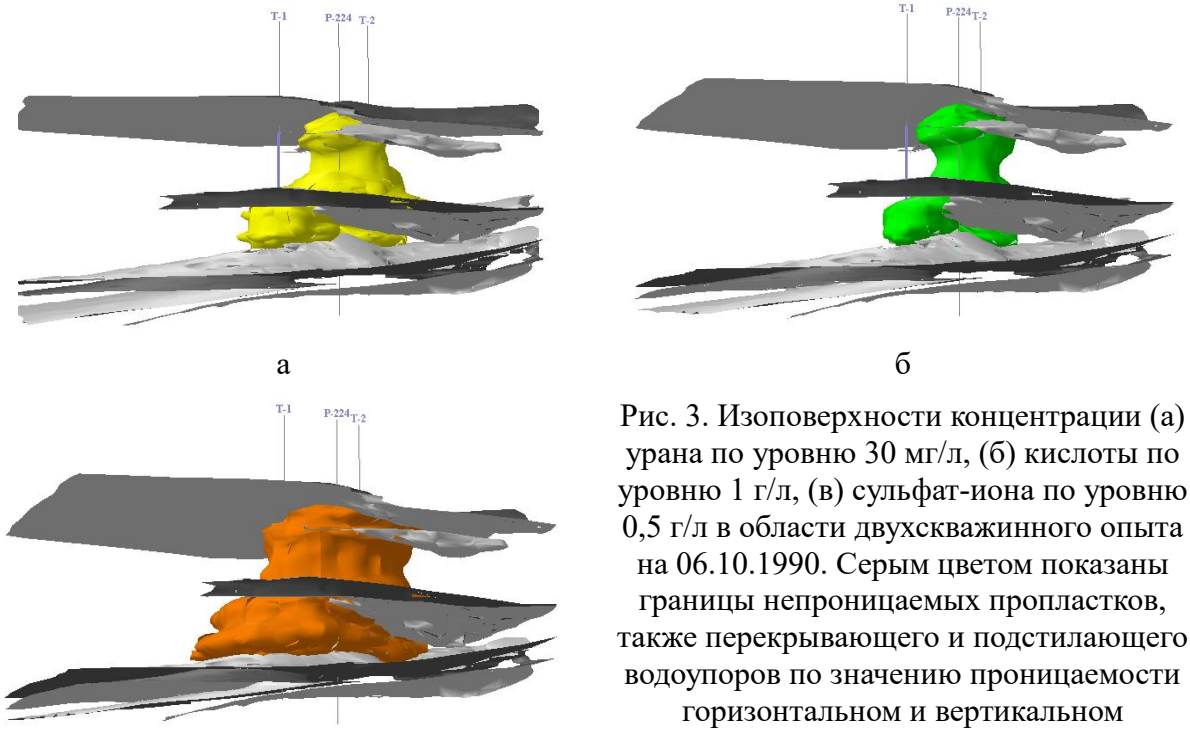
В процессе проведения двухскважинного опыта ПВ-89 в продуктивном горизонте образовалась область остаточных технологических сернокислых растворов, содержащая кроме нагнетаемой серной кислоты также уран и продукты взаимодействия кислоты с минералами вмещающей породы (алюминий, железо, магний, калий и др.). Общая минерализация остаточных технологических сернокислых растворов превысила 30 г/л. На рис. 3 с помощью поверхностей равной

концентрации на 3D сценах показаны результаты моделирования распределения концентрации урана, серной кислоты и сульфат-иона на момент завершения двухскважинного опыта.



а б

Рис. 2. Сравнение фактической концентраций серной кислоты (а) и урана (б) в откачных растворах скважины Т-2 с результатами моделирования



а б

в

Рис. 3. Изоповерхности концентрации (а) урана по уровню 30 мг/л, (б) кислоты по уровню 1 г/л, (в) сульфат-иона по уровню 0,5 г/л в области двухскважинного опыта на 06.10.1990. Серым цветом показаны границы непроницаемых пропластков, также перекрывающего и подстилающего водоупоров по значению проницаемости горизонтальном и вертикальном направлениях 1:3

В первое время после завершения опытных работ в результате взаимодействия с серной кислоты с кислотопоглощающими минералами происходит увеличение показателя кислотности (нейтрализация кислоты) и выход в раствор петрогенных минералов алюминия, железа, магния, кальция, калия и др. Затем, по мере нейтрализации серной кислоты, происходит выпадение гидроксидов урана, железа, алюминия и их

концентрации в остаточных растворах снижаются. Также процесс самоочистки происходит за счет сорбции загрязняющих компонентов на глинистые минералы. В результате взаимодействия содержащихся в остаточных растворах сульфат иона, кальция, калия, алюминия происходит образование гипса и алунита. При этом гипс образуется во всей области остаточных технологических растворов, а алунит преимущественно на границе между остаточными растворами и пластовыми водами. Одновременно с кислотно-основными процессами в продуктивном горизонте протекают окислительно-восстановительные процессы между остаточным технологическим раствором и содержащимся в породе органическим веществом. По мере увеличения значения кислотного показателя pH и понижения Eh среды ниже +150 мВ начинается восстановление сульфат-иона присутствующими в пласте сульфатредуцирующими бактериями. В результате происходит образование дисульфида железа.

Следует отметить, что низкая скорость движения подземных вод в рудоносных горизонтах на Добровольном месторождении (сантиметры в год), не способствует распространению техногенных растворов, и процесс нейтрализации происходит преимущественно в исходной области остаточных растворов. Кроме того, наблюдается смещение остаточных растворов в направлении подстилающего водоупора в результате действия гравитационных сил. При этом происходит разбавление остаточных технологических растворов пластовыми растворами, содержащимися в слабопроницаемых пропластках. На рис. 4 с помощью поверхностей равной концентрации на 3D сцене показаны результаты моделирования распределения сульфат-иона на момент сооружения контрольной скважины Р-224.

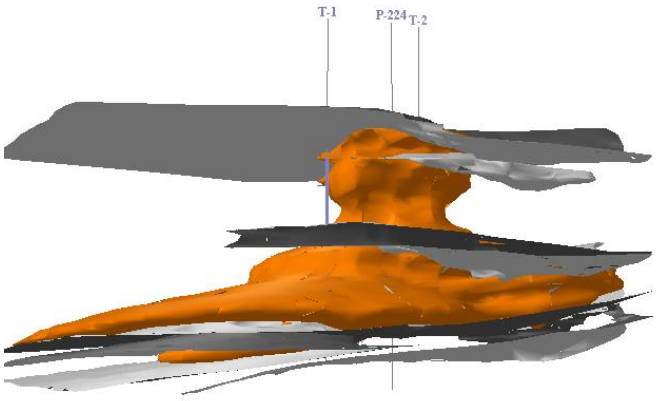
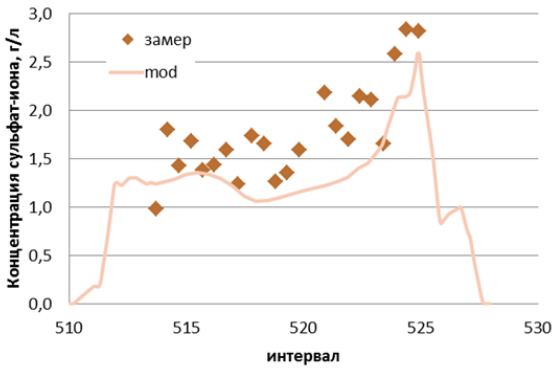
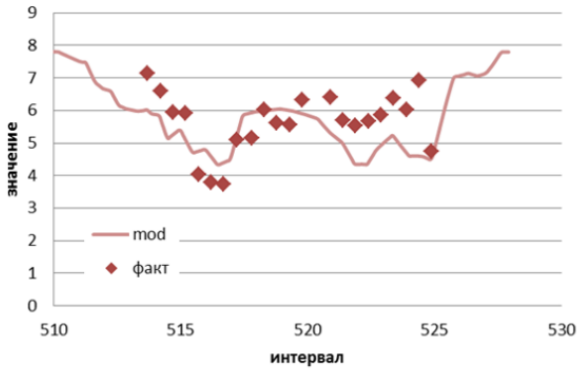


Рис. 4. Изоповерхность концентрации сульфат-иона по уровню 1 г/л на 07.2020, отношение масштабов в плане и разрезе 1:3

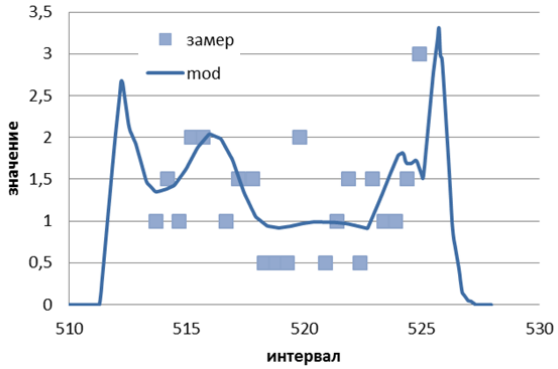
На рис. 5 приведены результаты моделирования и измерений концентрации сульфат-иона, значений водородного показателя pH и содержания гипса в интервале вскрытия продуктивного горизонта контрольной скважиной Р-224.



а



б



в

Рис. 5. Распределения (а) концентрации сульфат-иона, (б) значения pH и (в) содержания гипса в породе интервале вскрытия продуктивного горизонта контрольной скважиной Р-224

В результате протекания процессов самоочистки за тридцать лет, прошедших после завершения двухскважинного опыта ПВ-89 на Добровольном месторождении, в значительной степени произошло самовосстановление геологической среды по отношению к остаточным сернокислым растворам: концентрация серной кислоты снизилась в тысячи раз, минерализация технологических растворов уменьшилась на порядок, концентрация урана практически равна фоновым значениям.

Анализ данных лабораторных исследований керна и результатов моделирования изменения состояния продуктивного горизонта в результате проведения двухскважинного опыта ПВ-89 на Добровольном месторождении позволяет сделать вывод, что основными механизмами самоочистки геологической среды по отношению к остаточным сернокислым растворам являются:

- нейтрализация кислоты алюмосиликатными минералами, содержащимися в рудовмещающей породе в достаточном количестве, и выпадение в осадок радиоактивных и петрогенных компонентов в результате гидролиза;
- уменьшение окислительно-восстановительного потенциала остаточных технологических растворов в результате взаимодействия с содержащимся в продуктивном горизонте органическим веществом и деятельности сульфатредуцирующих бактерий;
- деминерализация остаточных технологических растворов в результате новообразования минералов (гипс, пирит, алунит и др.);

- сорбция загрязняющих компонентов на глинистых минералах, содержащихся в рудовмещающей породе в достаточном количестве;

- разбавление остаточных технологических растворов пластовыми водами при смещении линзы остаточных растворов вследствие регионального потока и гравитационного опускания.

Литература

1. Уран российских недр / Машковцев Г.А., Константинов А.К., Мигута А.К., Шумилин М.В., Щеточкин В.Н. – М.: ВИМС, 2010. – 850 с.

2. Отчет Тургайской партии № 89 о результатах предварительной разведки Добровольного рений-редкоземельно-уранового месторождения в Северном / «ГЕОЛОГОРАЗВЕДКА», рук. Дементьев П.К. – М., 1991. – Книга IY. – 94 с.

3. Грабовников В.А. Геотехнологические исследования при разработке металлов. – М.: Недра, 1995. – 155 с.

4. Бабкин А.С., Истомин А.Д., Кеслер А.Г. и др. Программа для ЭВМ «Моделирование геоэкологического состояния месторождений АО «Далур», разрабатываемых способом подземного выщелачивания». Авторы: Бабкин А.С., Истомин А.Д., Кеслер А.Г., Носков М.Д. и др. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2016610552, 14 января 2016 г.

5. Теровская Т.С., Кеслер А.Г., Носков М.Д. Система моделирования геоэкологического состояния продуктивного горизонта при добыче урана методом скважинного подземного выщелачивания // Изв. вузов. Физика. – 2017. – Т. 60, № 9/2. – С. 123-127.

Научное издание
ФГБУ «ВИМС»

Сборник трудов Пятого международного симпозиума
«Уран: геология, ресурсы, производство»

Редакционно-издательский сектор (РИС) ВИМС.
119017, Москва, Старомонетный пер., д. 31. Тел. (495) 9515043
Компьютерная верстка: Е.О.Василёва, А.В.Барышников.
Отпечатано на ризографе в РИС ВИМС.

Подписано в печать 17.12.2021 г.
Формат 60×90 1/16. Усл. печ. л. 23,7
Тираж 100 экз. Заказ № 12.