



ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСА ГЕОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ПОИСКАХ СКРЫТЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА

Т.М. Овсянникова¹, А.И. Несмеянова¹, Н.А. Гребенкин¹, Д.А. Прохоров¹,
А.В. Стародубов¹, Д.М. Машнин¹, И.С. Тубольцев¹

*¹Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья
им. Н.М. Федоровского, Москва, Россия, lima@u238.ru*

APPLYING THE COMPLEX OF GEOCHEMICAL EXPLORATION TECHNIQUES TO DETECT CONCEALED URANIUM DEPOSITS

T. Ovsyannikova¹, A. Nesmeyanova¹, N. Grebenkin¹, D. Prokhorov¹,
A. Starodubov¹, D. Mashnin¹, I. Tuboltsev¹

*¹All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources
named after N.M. Fedorovsky, Moscow, Russia, lima@u238.ru*



Актуальность работ обусловлена необходимостью выявления скрытого и слабопроявленного уранового оруденения, в т.ч. в сложных геологических, ландшафтно-геоморфологических и климатических обстановках.

Основные проблемы, связанные с применением методов:

- пространственное разобщение вторичных концентраций урана в поверхностных природных объектах (рыхлых отложениях, почвах, водах, растительности) с коренной урановой минерализацией;
- большое число «ложных» поверхностных аномалий (связаны вариациями геохимического фона, механическим рассеянием обогащенных ураном пород, концентрационными геохимическими барьерами и др.).

Основные задачи при ОМР:

- ✓ сбор и систематизация данных о закономерностях распределения химических элементов (изотопов) на поисковых объектах в конкретных районах проведения работ;
- ✓ выбор оптимального комплекса геохимических критериев и признаков оруденения;
- ✓ адаптация технологий опробования и аналитических методов.

Объекты ОМР — урановые месторождения следующих геолого-промышленных типов:

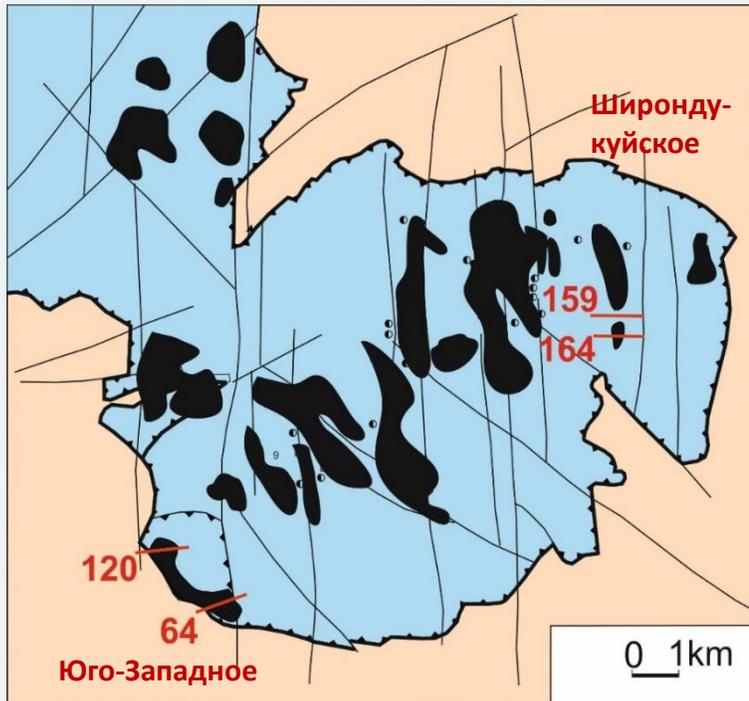
- в вулкано-тектонических структурах (ВТС);
- в древних структурно-стратиграфических несогласиях (СН);
- в палеодолинах (водородный/песчанниковый тип).

Работы выполнялись специалистами ФГБУ «ВИМС» при содействии и помощи руководства и персонала АО «Урангео», АО «Хиагда» и ПАО «ППГХО».



Месторождения в ВТС

Стрельцовская ВТС с профилями ОМР



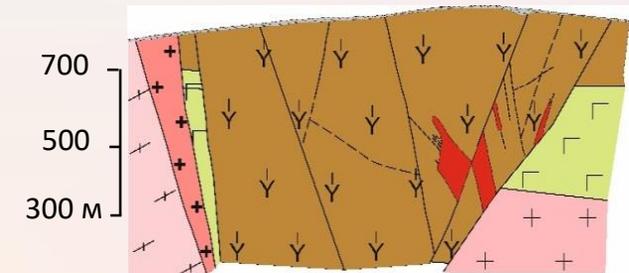
Юго-Западное (слабо проявленное)

Почти полностью локализовано в эффузивных породах кислого состава. Оруденение представлено несколькими рудными зонами, суммарно прослеживающимися на 2 км; ширина 150–300 м. Рудные тела — многочисленные крутопадающие жилы. **Глубина залегания — от 40 до 550 м**; мощность — 0,30–13,0 м, содержание U — 0,050–0,234%.

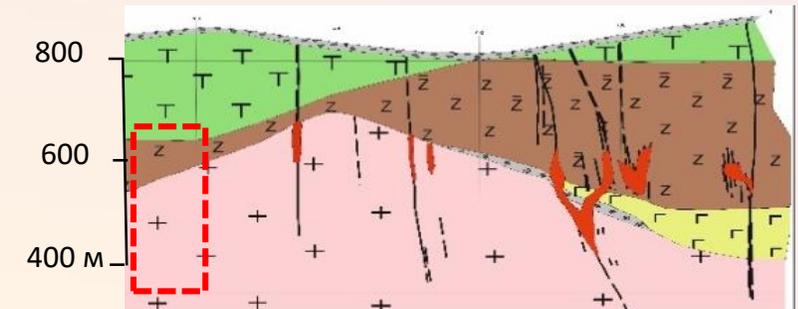
Южно-Широндукуйское (скрытое)

Локализовано в гранитах, трахидацитах и андезито-базальтах. **Глубина залегания: 90–350 м**. Проявлены 2 морфологических типа рудных залежей. В *гранитах, базальтах и андезитах* — *жилообразные залежи*, приуроченные к крутопадающим разломам субмеридионального и СВ-простираения, протяженностью 100–150 м и вертикальным размером 50–70 м. В *трахидацитах* рудные тела имеют штокверкоподобную форму с раздувами и апофизами (высота раздувов 30–50 м, протяженность 200–300 м). Балансовые руды в целом рядовые, содержания U: 0,050–2,6%.

Геологический разрез по профилю 64



Геологический разрез по профилю 164





Месторождения в древних ССН

Столбовое

(скрытое в пределах участка ОМР)

Оруденение локализуется в гранитах фундамента. Представляет собой серию рудных жил настурана с кварцем, сульфидами и гематитом.

Протяженность жил по простиранию и падению от начальных десятков метров до 200 м. Мощность – 0,4–2,5 м. Содержание урана от 0,05 до первых %. В 2015 г. под чехлом рифейских песчаников установлены рудные жилы с богатыми рудами.

Особенности района: отсутствие выдержанного почвенного слоя, курумы.

Геологическая карта участка

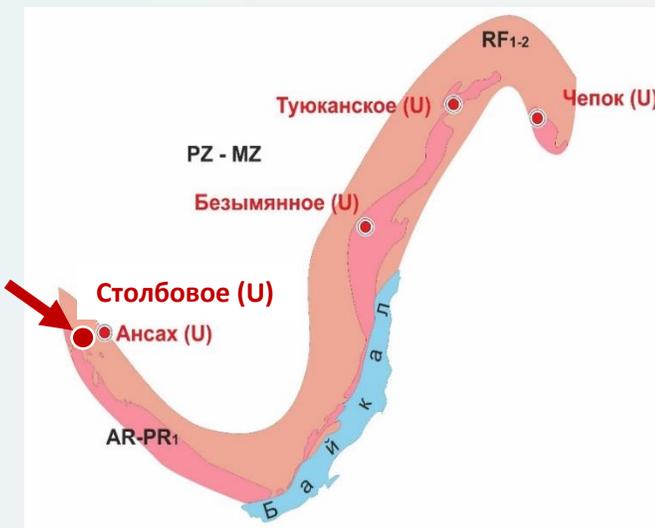
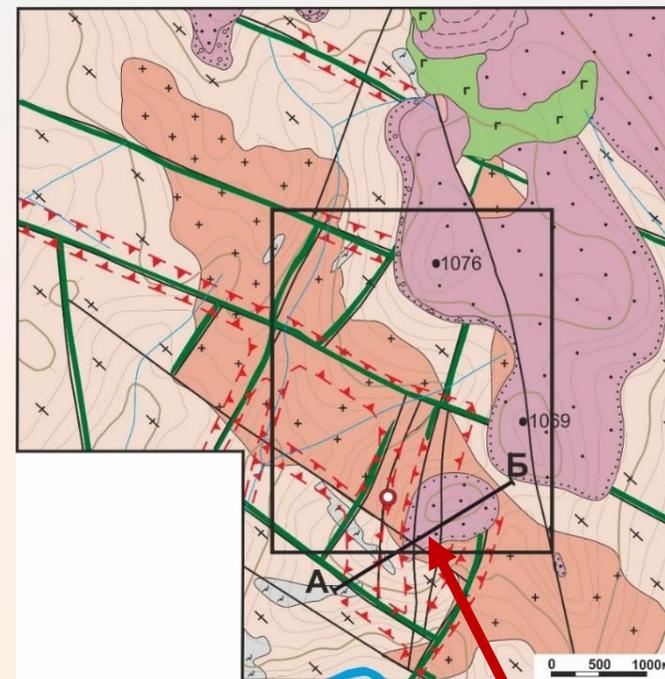
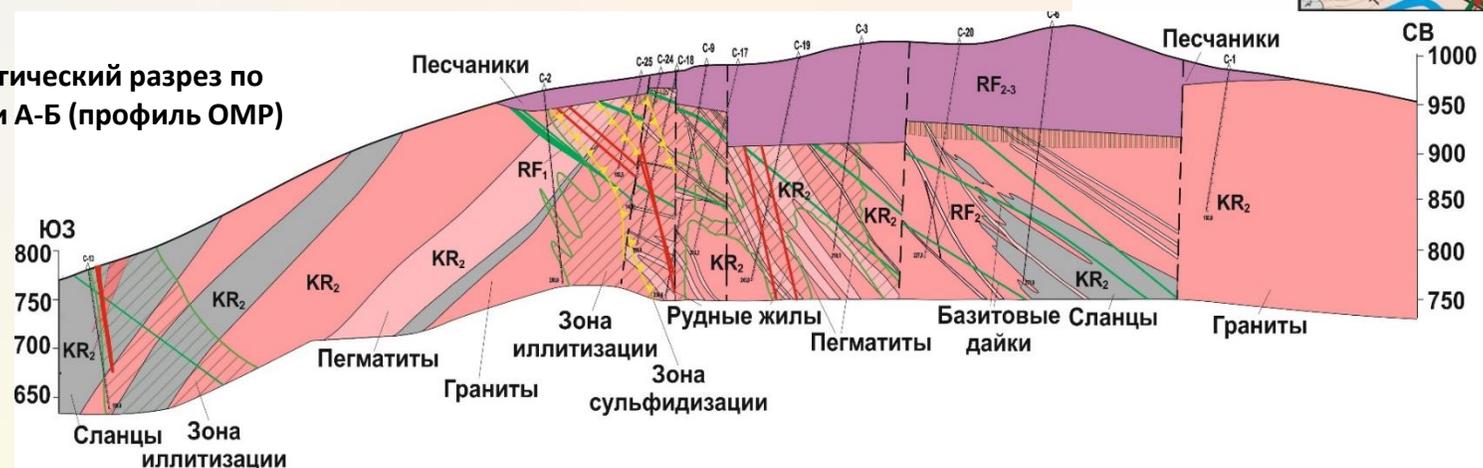


Схема размещения месторождений урана типа «несогласия» в пределах южного обрамления Восточно-Сибирской плиты

Геологический разрез по линии А-Б (профиль ОМР)



Профиль ОМР



Месторождения в палеодолинах (гидрогенные)

Тетрахское (скрытое)

Месторождение локализовано в палеодолине, врезанной в кристаллический фундамент, в проницаемых вулканогенно-осадочных отложениях неогена (N_1), **перекрытых платобазальтами мощностью до 100 м.**

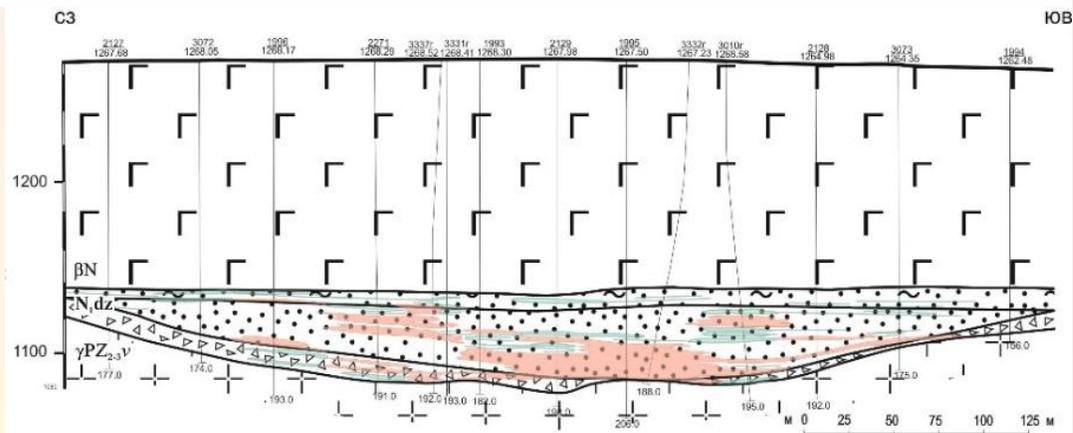
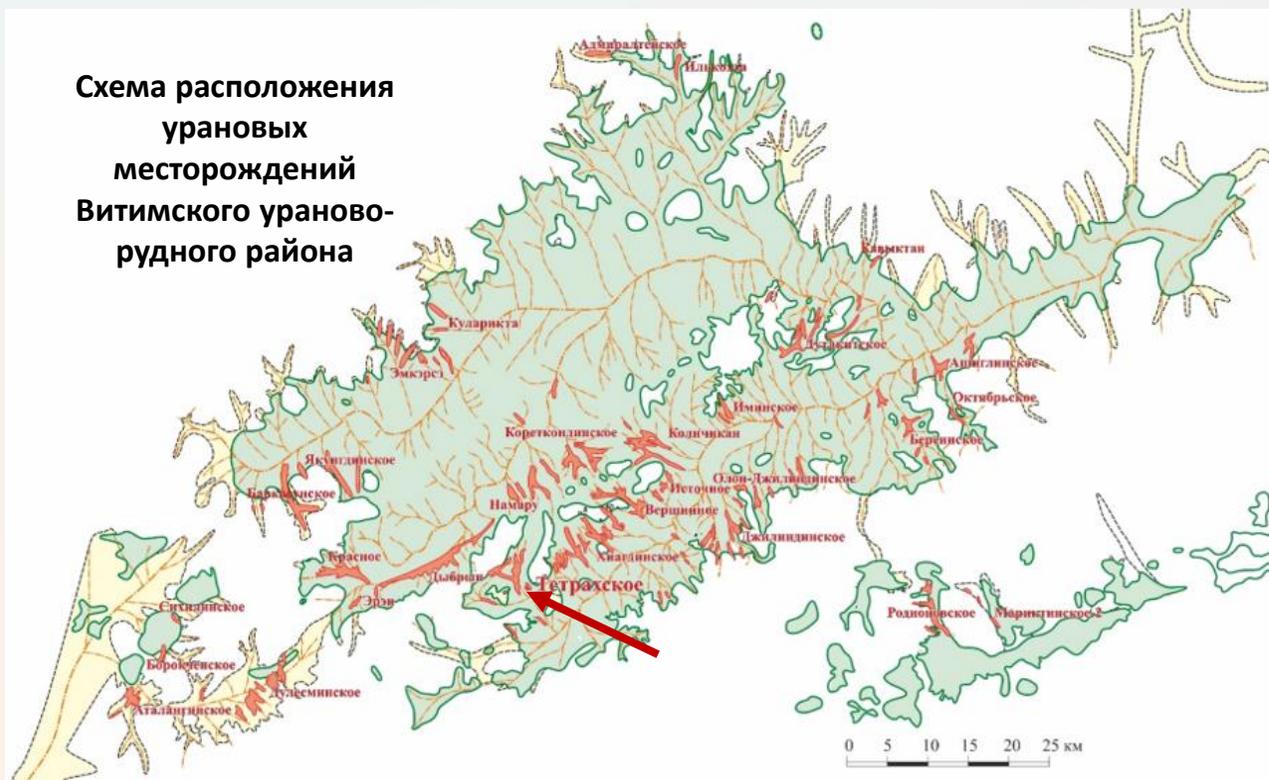
Глубина залегания руд до ~200 м.
Длина залежи в основной палеодолине 4 км, в палеопритоке — 2,5 км, ширина от первых сотен метров до 0,8-1,2 км; мощность изменяется от десятков сантиметров до 20 и более метров.

Содержание U: 0,016–0,252%.

Ландшафтно-геоморфологические условия на участке благоприятны для проведения геохимического опробования: развиты почвы и растительность, антропогенное воздействие на территорию минимально.

Схематический геологический разрез через палеодолину

Схема расположения урановых месторождений Витимского ураново-рудного района





Комплекс геохимических методов, опробованных в ходе ОМР

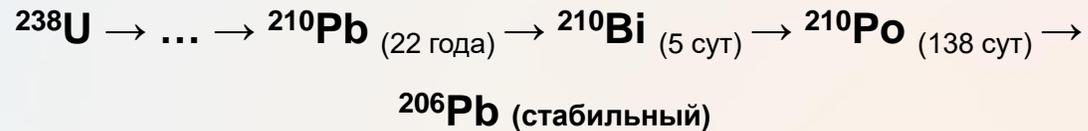
Методы/месторождения	Юго-Западное	Широндукуйское	Столбовое	Тетрахское
Изотопно-почвенный метод (МП $^{210}\text{Po} \times ^{210}\text{Pb}$)	+	+	+	+
Подвижный уран ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в содовых вытяжках)				+
Картирование сорбционно-солевых ореолов (КСО)				+
Общая альфа- и бета-активность в пробах растительности	+	+	+	+
$^{210}\text{Po} \times ^{210}\text{Pb}$ и элементный состав в пробах растительности			+	
«Нанодракции» металлов (атмогеохимический метод)	+	+		+
Изотопные отношения Pb в «нанодракциях» металлов	+	+		



Геохимические методы с частичным извлечением элементов

Изотопно-почвенный метод (ИПМ)

позволяет локализовать погребенное оруденение по аномальным почвенным ореолам **мультипликативного показателя (МП) и изотопных отношений (ИО) ^{210}Po и ^{210}Pb** (ДПР ^{238}U) в солянокислых вытяжках (МП= ^{210}Po × ^{210}Pb); глубинность метода — до 600 м. Для оценки аномалий привлекается анализ **изотопных отношений подвижного урана ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$)**, экстрагируемого разбавленным содовым раствором.



Отбор проб в почвенном горизонте с повышенной сорбционной емкостью (горизонт «В»). После радиохимического выделения Po и Pb (Bi) выполняют радиометрические измерения их альфа- и бета-активностей.

Ограничения (сложности интерпретации): наличие мощных экранирующих водоупоров, активных газопроводящих разломных структур, малая мощность почвенного слоя и/или его невыдержанность, высокая расчлененность рельефа и др., отложенный по времени анализ проб.

Особенности поверхностных наложенных ореолов рассеяния, выявляемых методами с частичным извлечением элементов:

- **соответствие элементного состава вещественному составу руд (+);**
- **«краевые аномалии» (-);**
- **«отклик» на сопряженные структурно-тектонические элементы земной коры (-/+).**



Картирование сорбционно-солевых ореолов (КСО)

основано на извлечении подвижных форм химических элементов из почвенных проб при помощи горячего буферного раствора гидраксиламина гидрохлорида в 0,1M HCl с последующим мультиэлементным анализом ICP-MS.

Отбор проб осуществляется из верхней части горизонта «В», для анализа выделяют фракцию почвы размером <1 мм. По результатам обработки данных с помощью факторного и кластерного анализа строят графики **мультипликативных показателей концентраций химических элементов.**

Среди преимуществ метода высокая контрастность получаемых аномалий, классическая простая схема отбора проб и пробоподготовки и высокая чувствительность.

Подтвержденная глубинность метода — 150 м.



Био- и атмо-геохимические методы

Определение общих альфа- и бета-активностей в озоненных пробах растительности

— одно из перспективных направлений биогеохимических исследований, которые в целом отличаются повышенной глубиной, контрастностью аномалий и другими преимуществами.

Процедура включает: отбор проб в профильном или площадном варианте, пробоподготовку (сушку, измельчение, озонение и приготовление счетных образцов), измерение активности образцов на низкофоновом альфа-бета-радиометре, градуированном по эффективности регистрации излучения порошковых проб.

Образование, устойчивость и контрастность биогеохимических аномалий обусловлены следующими предпосылками:

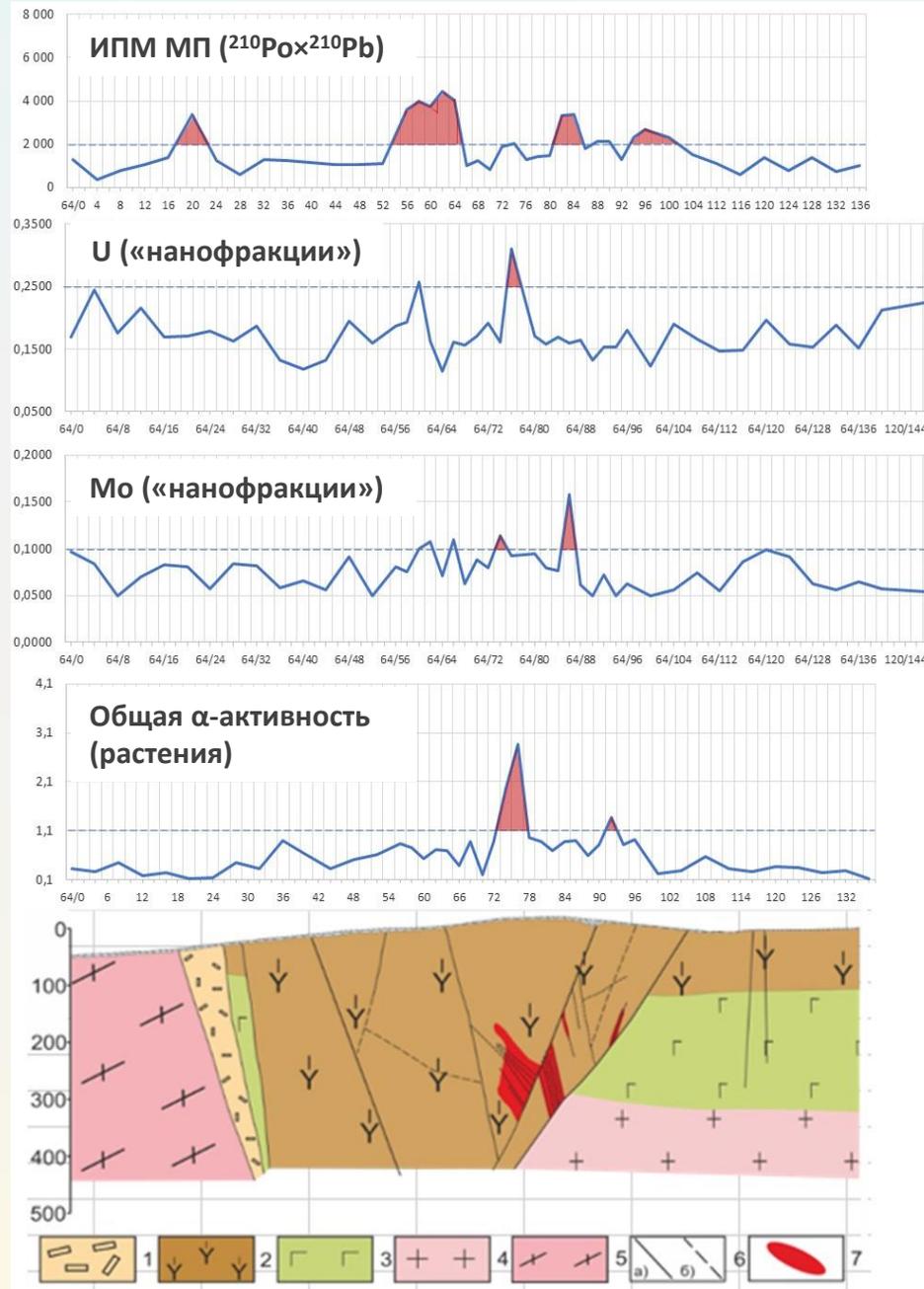
- 1) растения могут концентрировать химические элементы, поступающие из питающей среды;*
- 2) при корневом поступлении элементов в растения происходит естественная «экстракция» наиболее подвижных (водорастворимых) форм элементов, за счет которой уменьшается мешающее влияние геохимического фона;*
- 3) накопление элементов растениями и их частями идет в течение длительного времени из большого объема почв и рыхлых отложений, что снижает воздействие сезонных колебаний водного режима, неоднородностей почвенного слоя, изменений окислительно-восстановительных условий среды и т.п.*

Определение «нанодракций» металлов, сорбированных коллекторами на основе активированного угля

основана на определении **элементного состава механических агрегатов частиц сверхмалых размеров (10–200 нм)**, транспортируемых постоянным потоком геогаза в направлении земной поверхности и извлекаемых с помощью специальных коллекторов. Возможно гамма-спектрометрическое **определение ДПР Rn** в коллекторах (до экстракции).

Использованная схема опробования включает длительную экспозицию угольных коллекторов в почвенных шпурах глубиной ~1 м, извлечение (экстракцию) «нанодракций» в раствор и последующий **мультиэлементный анализ ICP-MS**, в т.ч. с определением $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$.





Месторождения в ВТС

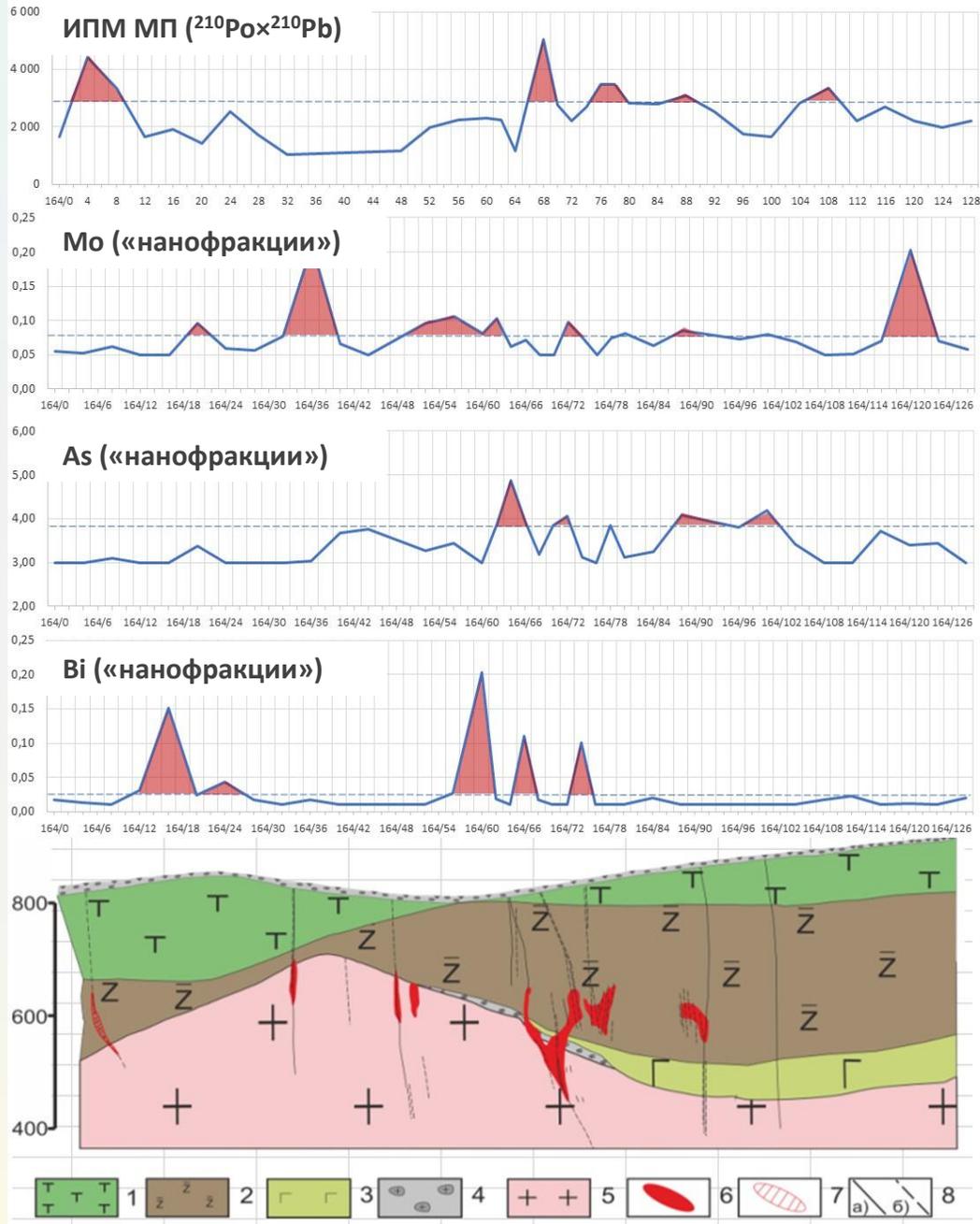
Месторождение Юго-Западное профиль 64

На рисунке:

- Аномалии МП ($^{210}\text{Ро} \times ^{210}\text{Рb}$) преимущественно по периферии проекции оруденения;
- Одиночные атмогеохимические аномалии U и Мо непосредственно над оруденением;
- Четкий аномальный ореол общей альфа-активности в пробах растений (корни мятлика лугового) непосредственно над оруденением.

Геологический разрез:

- 1 — липариты мелко- и крупновкрапленниковые;
- 2 — липариты флюидалные стекловатые;
- 3 — андезитобазальты и базальты с горизонтами конгломератов;
- 4 — граниты крупнозернистые порфировидные гнейсовидные;
- 5 — граниты средне- и крупнозернистые порфировидные лейкократовые и биотитовые;
- 6 — тектонические нарушения (а — установленные, б — предполагаемые);
- 7 — установленные рудные тела.



Месторождения в ВТС

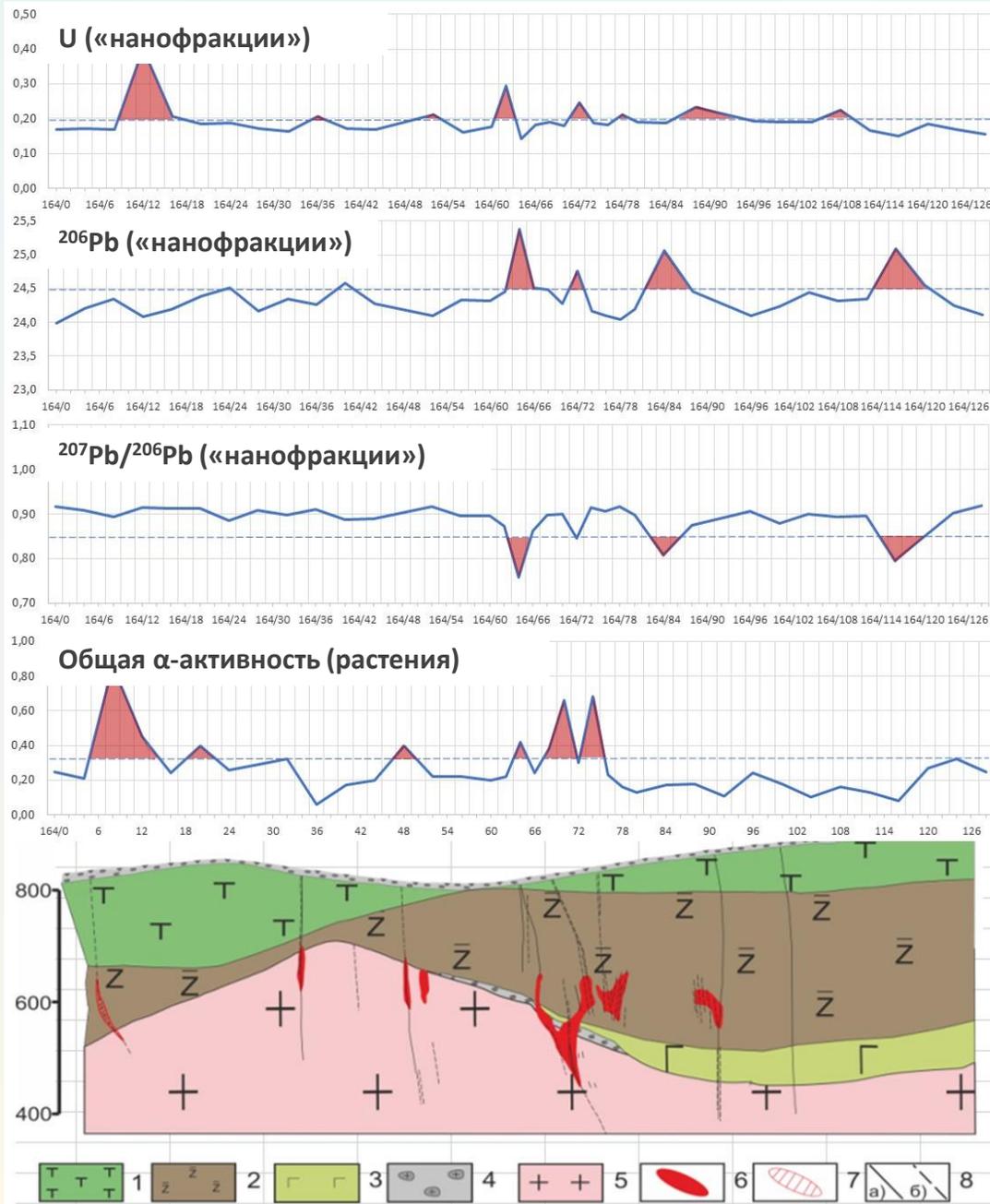
Месторождение Южно-Широндукуйское профиль 164

На рисунке:

- Большинство аномалий МП ($^{210}\text{Po} \times ^{210}\text{Pb}$) находится над рудной зоной, хотя и не фиксируют все известные рудные тела;
- В пределах проекции рудной зоны проявлены атмогеохимические аномалии U, Mo и Bi разной интенсивности.

Геологический разрез:

1 — андезиты массивные и миндалекаменные, их лавовые брекчии с горизонтами мелкогалечных конгломератов; 2 — трахидациты полосчато-флюидалные; 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).



Месторождения в ВТС

Месторождение Южно-Широндукуйское профиль 164

На рисунке:

- Слабые атмогеохимические аномалии U практически над всеми над рудными телами;
- Над основной рудной зоной интенсивные аномалии радиогенного Pb (пониженные значения отношения радиогенных изотопов $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ служит признаком наиболее богатого оруденения);
- Основная рудная зона проявлена контрастными аномальными ореолами общей альфа-активности в пробах растительности (лук-слизун);
- В восточной части профиля атмогеохимические аномалии U и изотопов Pb не сопровождаются повышением общей альфа-активности в пробах растительности.

$$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}} = \frac{^{235}\text{U}}{^{238}\text{U}} \cdot \frac{\exp(\lambda_{235}t) - 1}{\exp(\lambda_{238}t) - 1}$$

«Первичный» радиогенный Pb	Современный «чистый» радиогенный Pb	Смесь Pb
$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \approx 1,1$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \approx 0,05$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} < 1$



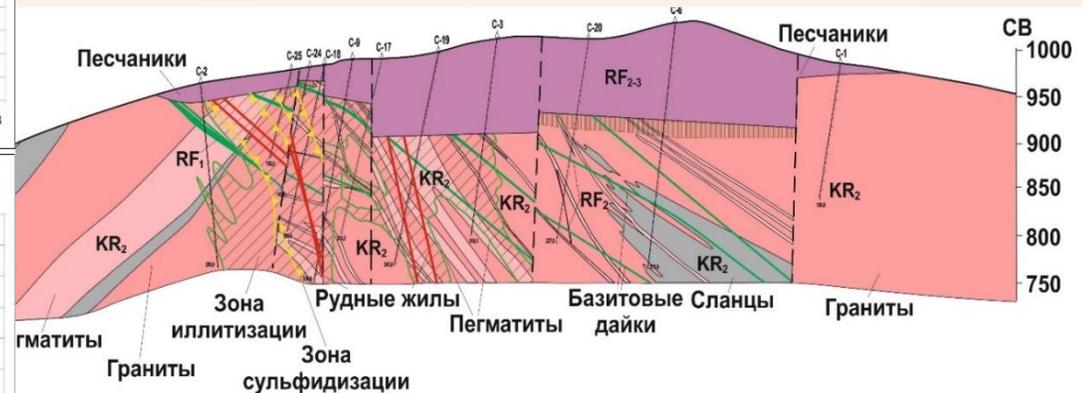
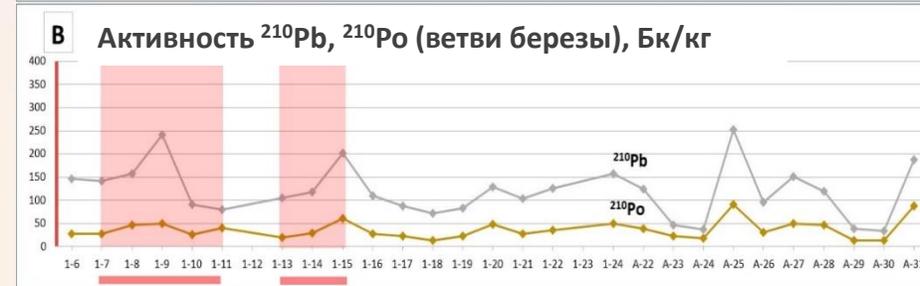
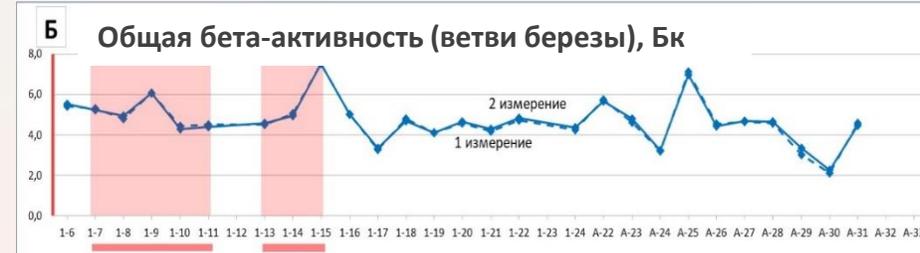
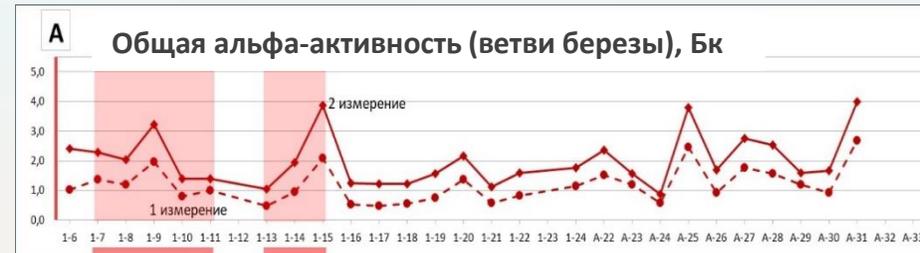
Месторождения в древних ССН

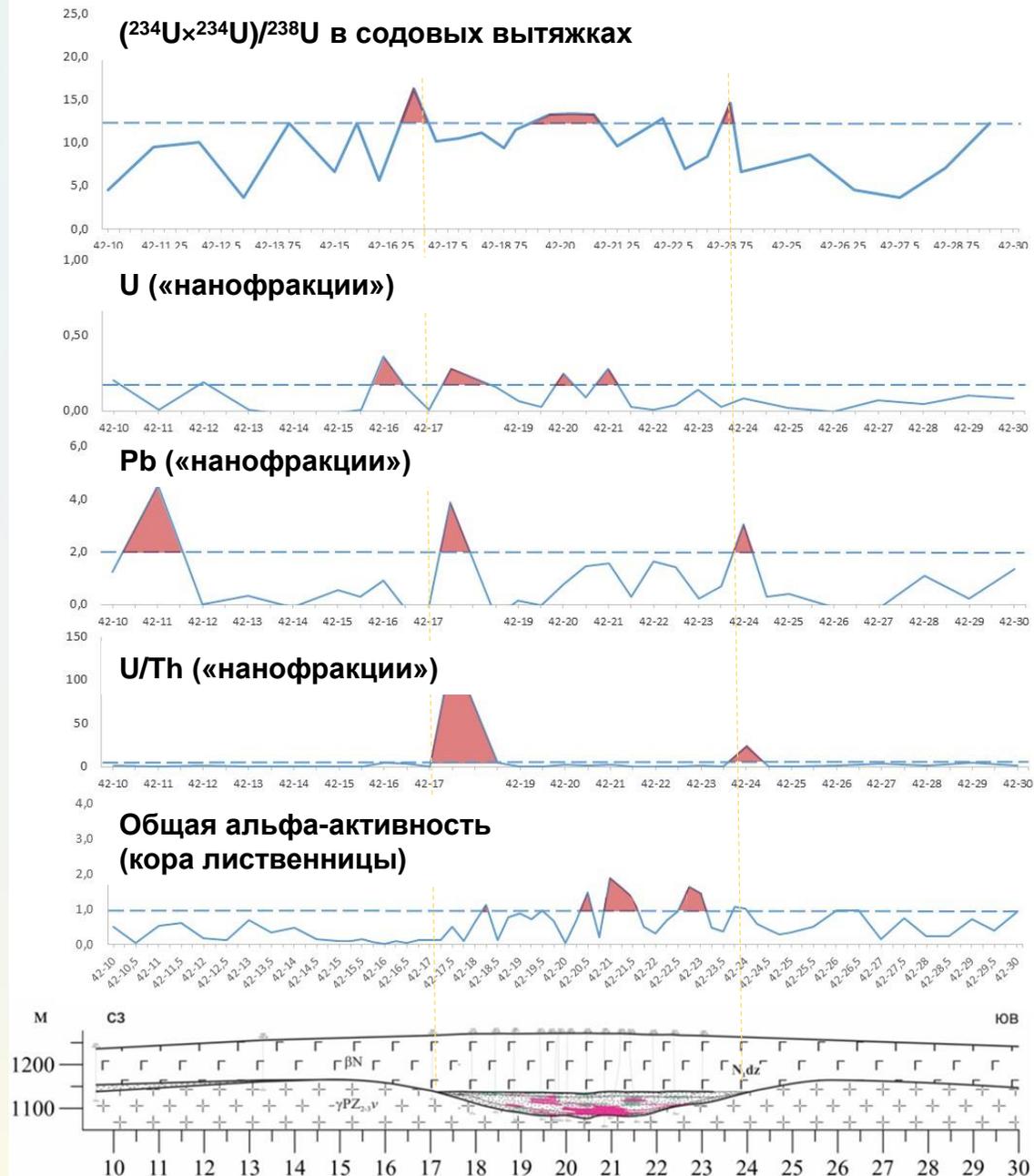
Месторождение Столбовое

профиль ОМР

На рисунке:

- Рудная зона проявлена в слабых аномалиях общей альфа- и бета-активности, ^{210}Pb в озоленных пробах растений (ветви березы);
- Над проекцией оруденения также установлены мультиэлементные аномалии ($\text{U}\times\text{Ba}\times\text{As}\times\text{W}$) в озоленных пробах растений (ветви ели);
- Повышение значений геохимических показателей над разломными зонами.





Месторождения урана в палеодолинах

Месторождение Тетрахское профиль 42

На рисунке:

- Слабые аномалии подвижного U в почвенных вытяжках над оруденением и по его периферии;
- По бортам палеодолины атмогеохимические аномалии Pb и U/Th;
- Над оруденением и над бортом палеодолины с СЗ-направления отмечается слабый аномальный атмогеохимический ореол U;
- Непосредственно над оруденением аномалия общей альфа-активности в пробах растительности (кора лиственницы).

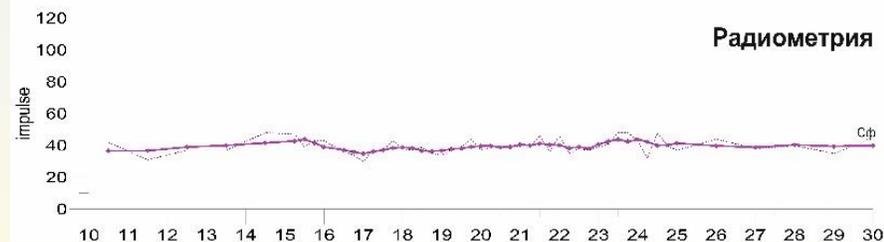
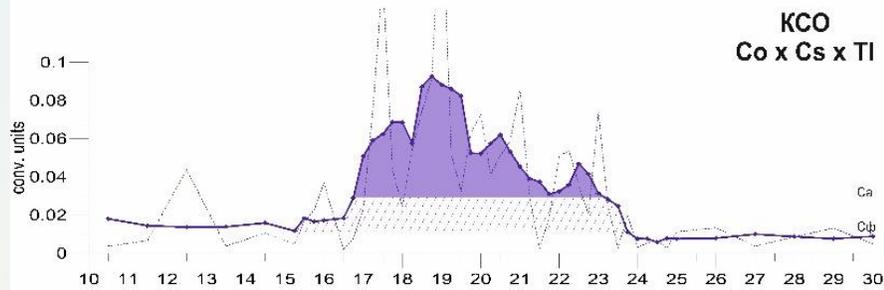
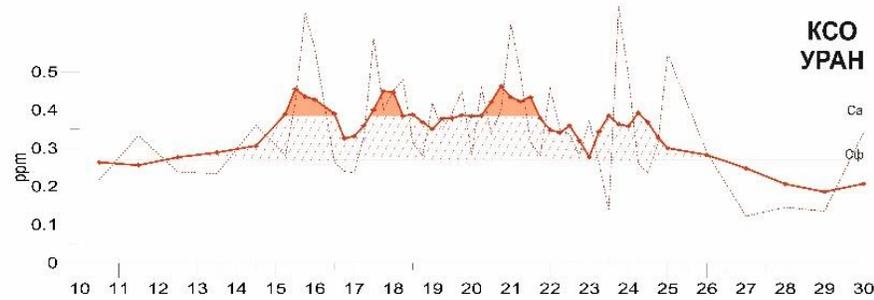
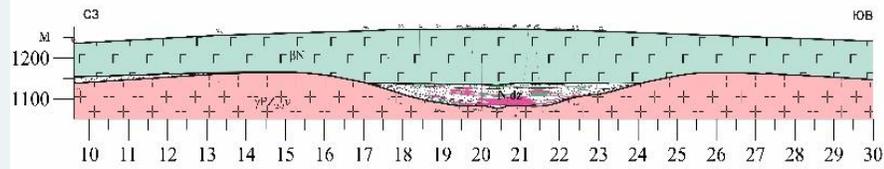
Геологический разрез:

См. предыдущий слайд.

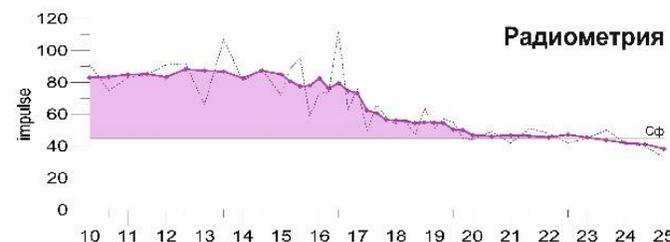
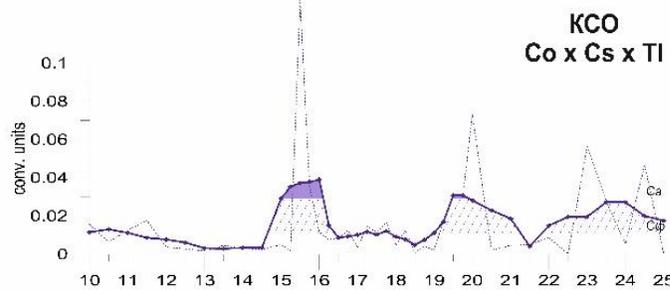
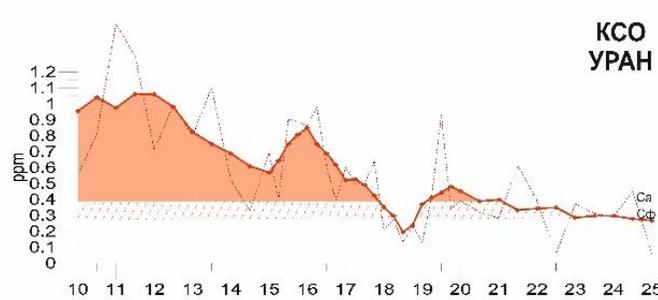
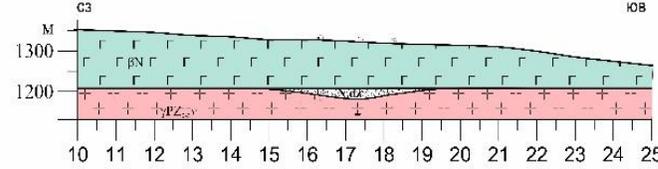


Месторождения урана в палеодолинах (гидрогенные)

Линия 42 (I) через рудную палеодолину



Линия 70 (II) через безрудную палеодолину

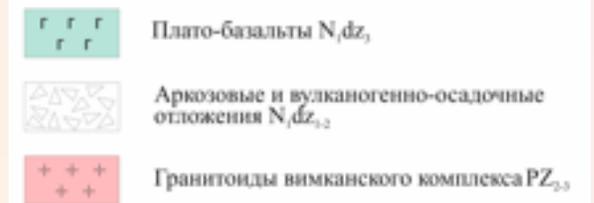


Месторождение Тетрахское профили 42, 70

На рисунке:

- Аномалии подвижного U и мультипликативного показателя $Co \times Cs \times TI$ по данным КСО над оруденением (пр. 42) и безрудной палеодолиной (пр. 70);
- На пр. 70 ореол U практически повторяет распределение МЭД по данным шпуровой съемки.

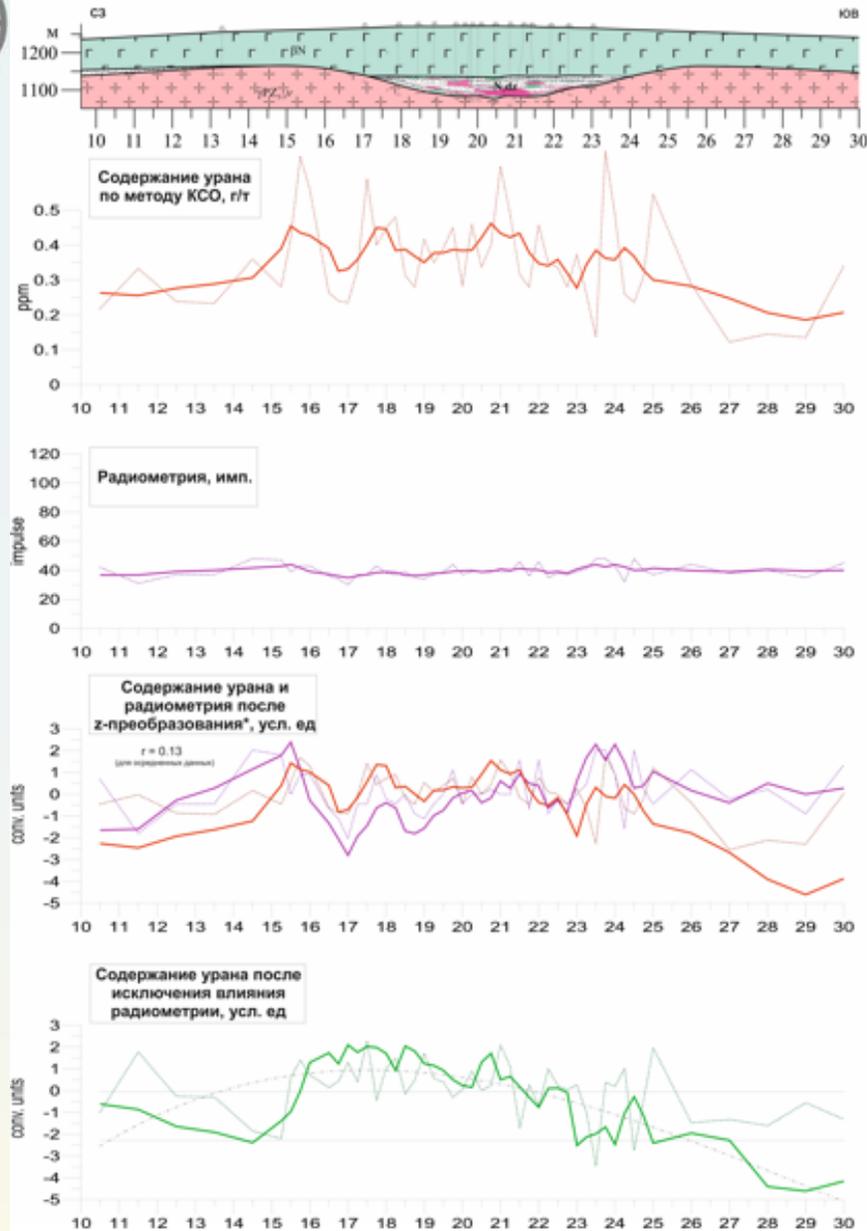
Условные обозначения



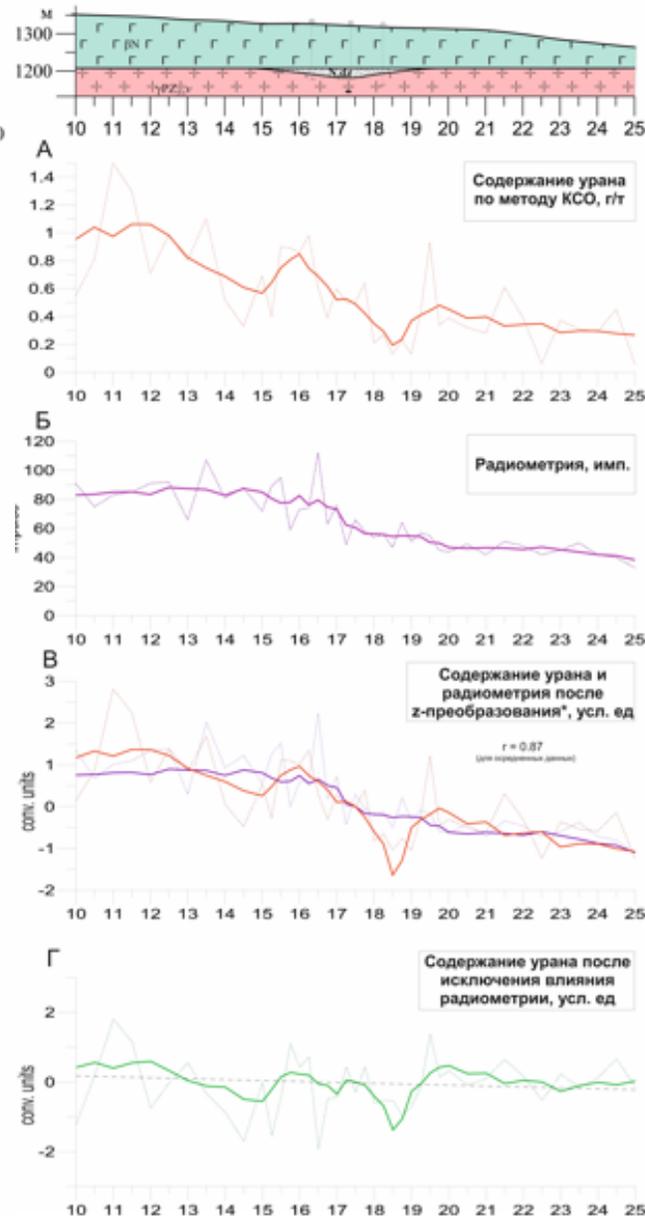
Пунктирные линии – результаты КСО; сплошные линии – осреднение данных «скользящим окном»; заливка – выделенные аномальные зоны.



Линия 42 (I) через рудную палеодолину



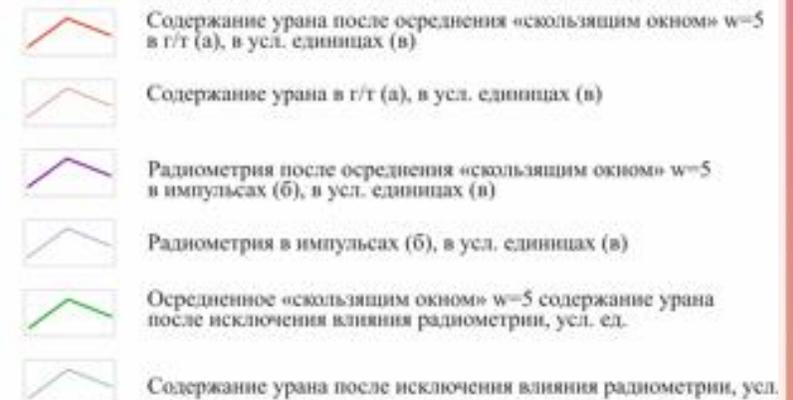
Линия 70 (II) через безрудную палеодолину



Месторождение Тетрахское, профили 42, 70

На рисунке:

- Учет геохимического «фона» путем вычисления нормализованной разности содержаний U и МЭД (шпуровая съемка).
- Результаты КСО согласуются с полевыми наблюдениями — в районе безрудного профиля в элювиально-делювиальных отложениях помимо базальтов, присутствуют перемещенные обломки высокорadioактивных гранитоидов витимканского комплекса (предполагаемый источник рудного вещества для месторождений Хиагдинского рудного поля).





Оценка эффективности геохимических методов по результатам ОМР

Методы/месторождения	Юго-Западное	Широндукуйское	Столбовое	Тетрахское
Изотопно-почвенный метод (МП ^{210}Po х ^{210}Pb)	😊	😊	?	😊
Подвижный уран ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в содовых вытяжках)	н/д	н/д	н/д	😊
Картирование сорбционно-солевых ореолов (КСО)	н/д	н/д	н/д	😊
Общая альфа- и бета-активность в пробах растительности	😊	😊	😊	😊
^{210}Po х ^{210}Pb и элементный состав в пробах растительности	н/д	н/д	😊	н/д
«Нанодракции» металлов (атмогеохимический метод)	😊	😊	н/д	😊
Изотопные отношения Pb в «нанодракциях» металлов	😊	😊	н/д	н/д



Выводы:

- **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 «нанодробках»**, сорбированных угольными коллекторами. Для оценки рудных концентраций (т.е. выделения наиболее перспективных участков) может быть привлечен анализ **отношений радиогенного свинца (^{206}Pb , ^{207}Pb) в «нанодробках».**
- На **месторождениях палеодолинного типа биогеохимическое опробование следует комплексировать с ИПМ с определением изотопных отношений подвижного урана и/или урана в «нанодробках».** 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).

Результаты ОМР Результаты ОМР в целом укладываются в современные представления о механизмах формирования над глубоко залегающей рудной минерализацией поверхностных наложенных ореолов рассеяния, выявляемых геохимическими методами с частичным извлечением элементов.

Следующий шаг: совершенствование технологий опробования, в т.ч. повышение стабильности, сопоставимости и воспроизводимости аналитических результатов, снижения пределов определения методов.

Краевые аномалии необходимо интерпретировать на основе поисковых моделей в комплексе с другими геохимическими и геофизическими признаками.



Спасибо за внимание!