



АРМЗ
РОСАТОМ

Новые критерии выявления урановых месторождений ВИТИМСКОГО ТИПА

Солодов Игорь Николаевич

Доктор г.-м. наук

Директор программ инновационного и технологического развития АО «Атомредметзолото»

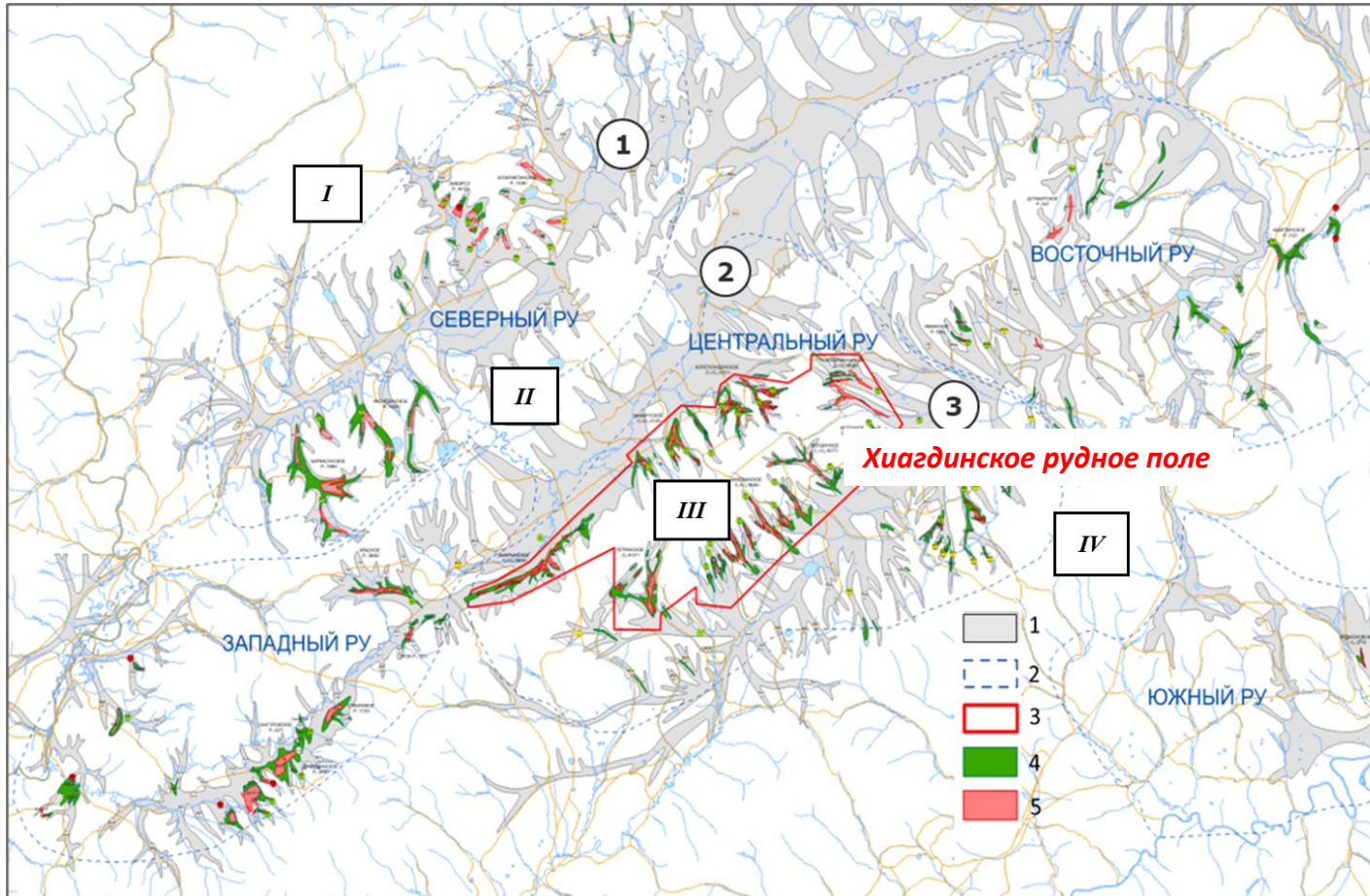
Карамушка Владимир Петрович

Главный специалист НИЛ геомеханики и недропользования (НИЛ-37) ВНИПИПТ

Витимский урановорудный район (ВУРР)



АРМЗ
РОСАТОМ



- ❑ Рудный район состоит из 5 рудных узлов, включающих 7 рудных полей и **80** рудных залежей с выявленными прогнозными ресурсами и запасами из них 40 палеодолин в ХРП
- ❑ **А** всего палеодолин около **250** – потенциал поисков
- ❑ В стадии отработки методом СПВ находятся месторождения Хиагдинского рудного поля (Центральный рудный узел)
- ❑ **Урановые руды** приурочены к палеодолинам – притоки стволowych палеорусел – 2-го и 3-го порядков

Поднятия: Северное (I), Центральное (II) Байсыханское (III) и Ингурское (IV) поднятия

Стволочные палеодолины 1-го порядка: Хойготская (1), Аталангинская (2) и Амалатская (3)

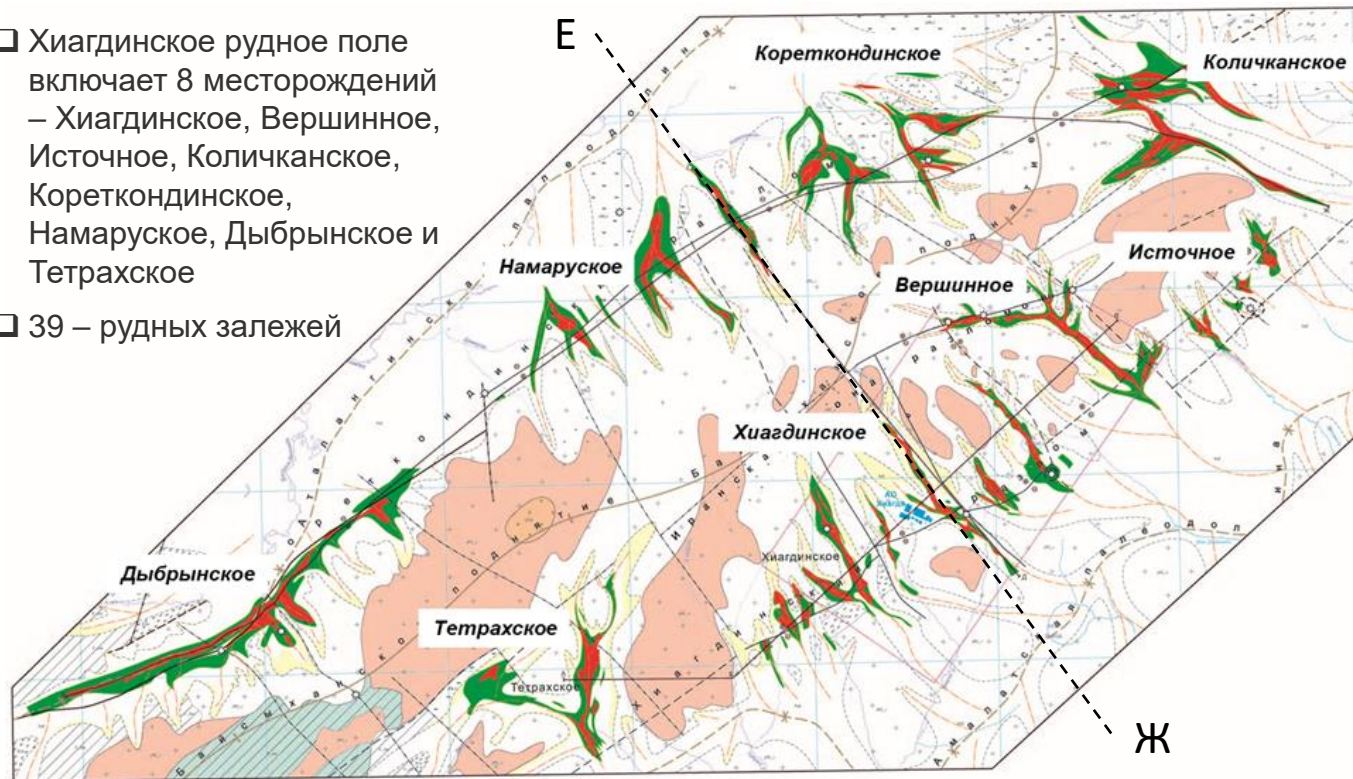
Хиагдинское рудное поле



АРМЗ
РОСАТОМ

- Хиагдинское рудное поле включает 8 месторождений – Хиагдинское, Вершинное, Источное, Количканское, Кореткондинское, Намаруское, Дыбынское и Тетрахское

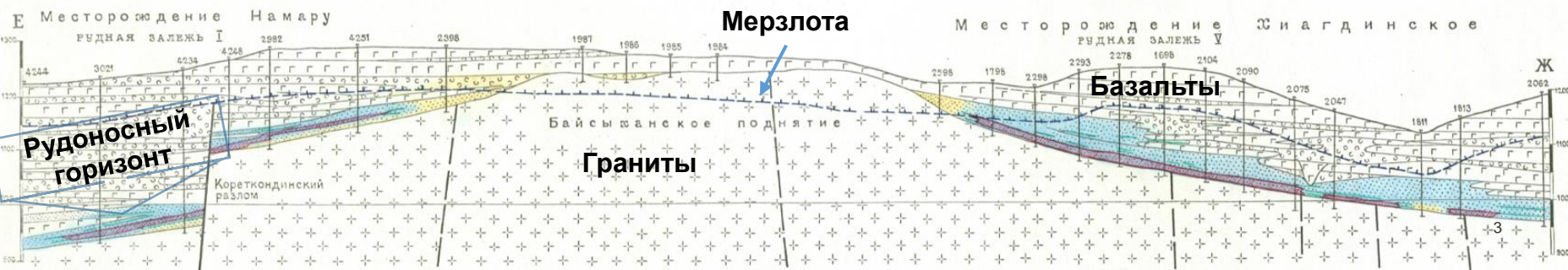
- 39 – рудных залежей



- Рудные залежи, локализованные в неогеновых углефицированных терригенных отложениях неогенового возраста, приурочены к палеодолинам и палеооврагам, врезанных в кристаллический гранитный фундамент на склонах Байсыханского поднятия

- Рудоносные горизонты перекрыты базальтовым покровом

- Базальты и осадочные отложения заморожены на глубину до 90 м

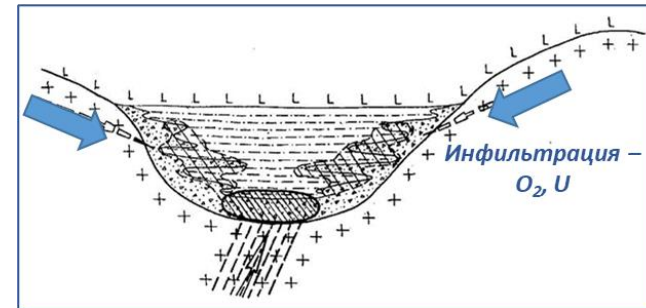
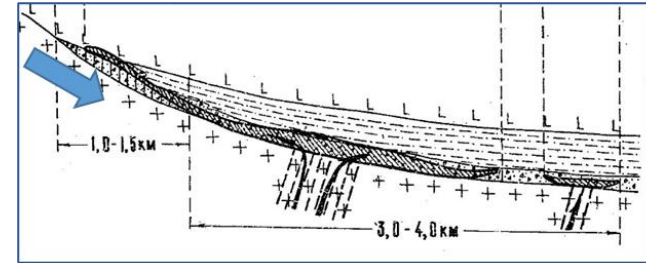


Используемые поисковые критерии



АРМЗ
РОСАТОМ

- 1 Граниты баргузинского и витимканского комплексов – объемный источник урана с содержанием U $\approx 10^{-4}$ %
- 2 Палеодолины и овражно-балочная сеть врезанные в кристаллический фундамент на склонах поднятий
- 3 Палеоруслу заполненные миоценовыми (N_{2-3}) делювиально-пролювиально-аллювиальными терригенными отложениями с углефицированными растительными остатками (концентраторами урана),
- 4 Вынос урана из кор выветривания гранитоидов (синие стрелки) кислородными инфильтрационными водами с бортов и верховьев палеодолин
- 5 Перекрытие слабопроницаемыми болотно-озерными отложениями и плато-базальтами, препятствующими проникновению окислительных и метеорных вод



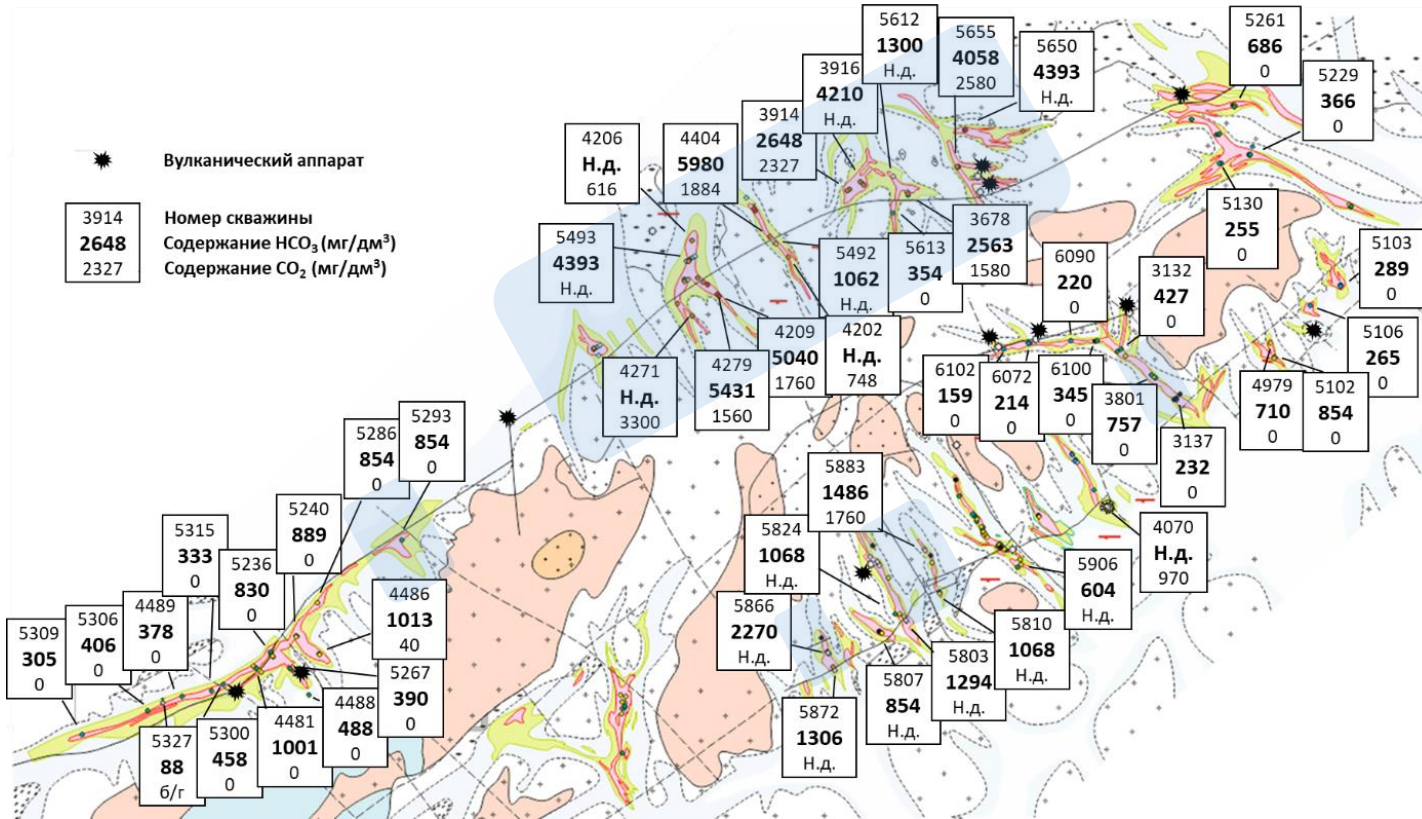


АРМЗ
РОСАТОМ

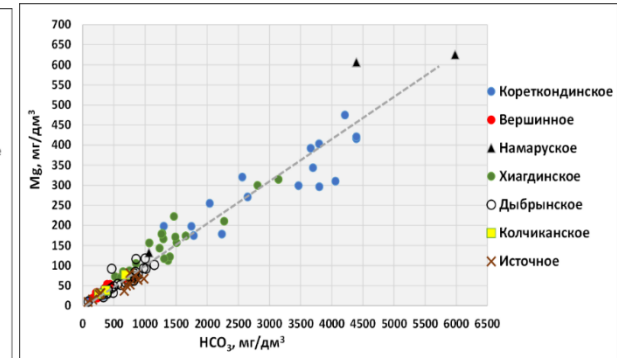
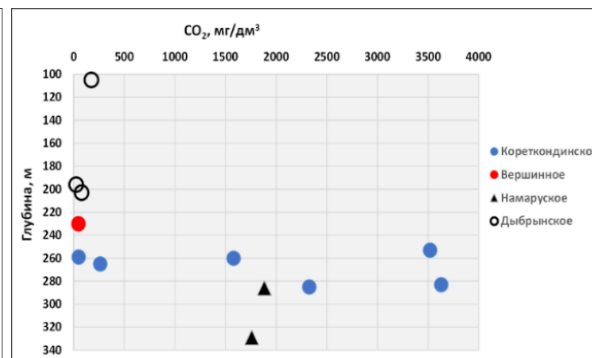
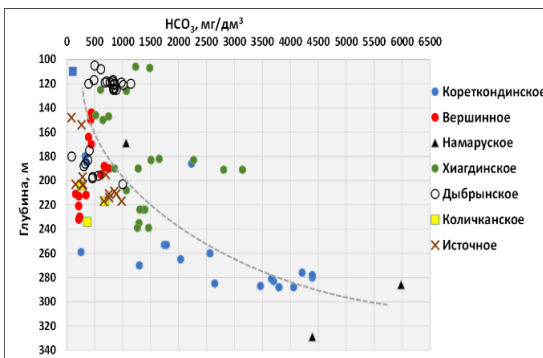
1.1.

Углекислые гидрокарбонатно-магниевые подземные воды (новый критерий)

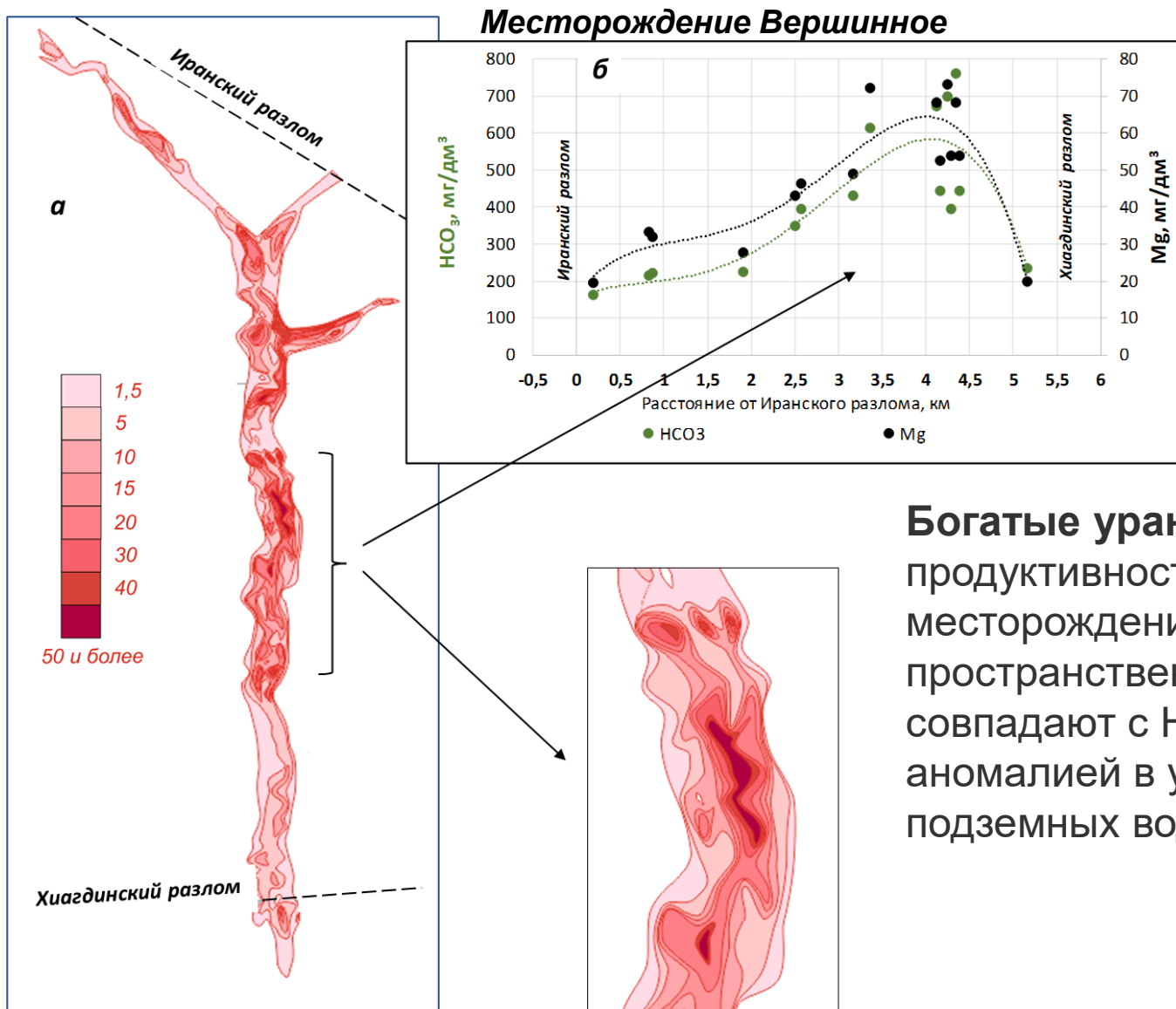
Распространенность углекислых подземных вод в Хиагдинском рудном поле



- ❑ Байсыханское поднятие – часть Забайкальской провинции холодных углекислых подземных вод
- ❑ Углекислые подземные воды содержат восстановители урана – сероводород и органическое вещество нефтяного ряда?
- ❑ Содержание CO₂ и HCO₃ закономерно возрастают с увеличением глубины залегания подземных вод
- ❑ Эксфильтрация подтверждена идеальной прямой зависимости Mg от HCO₃



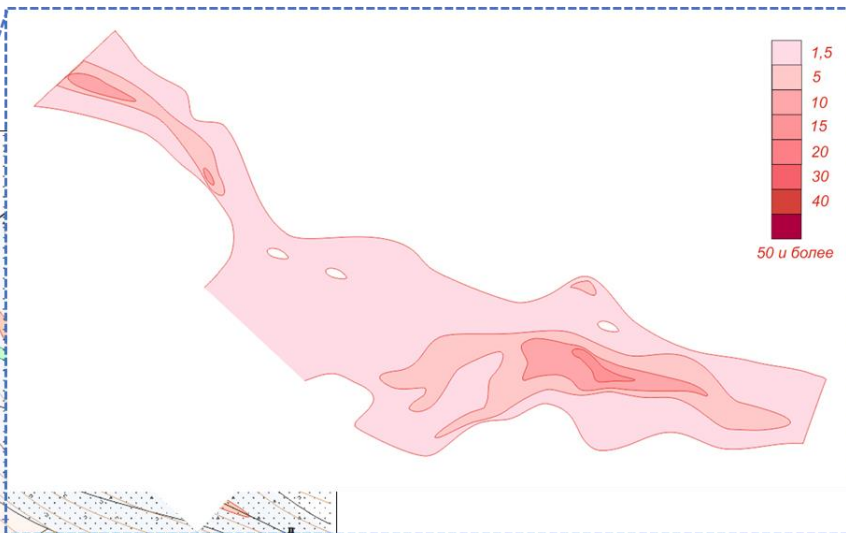
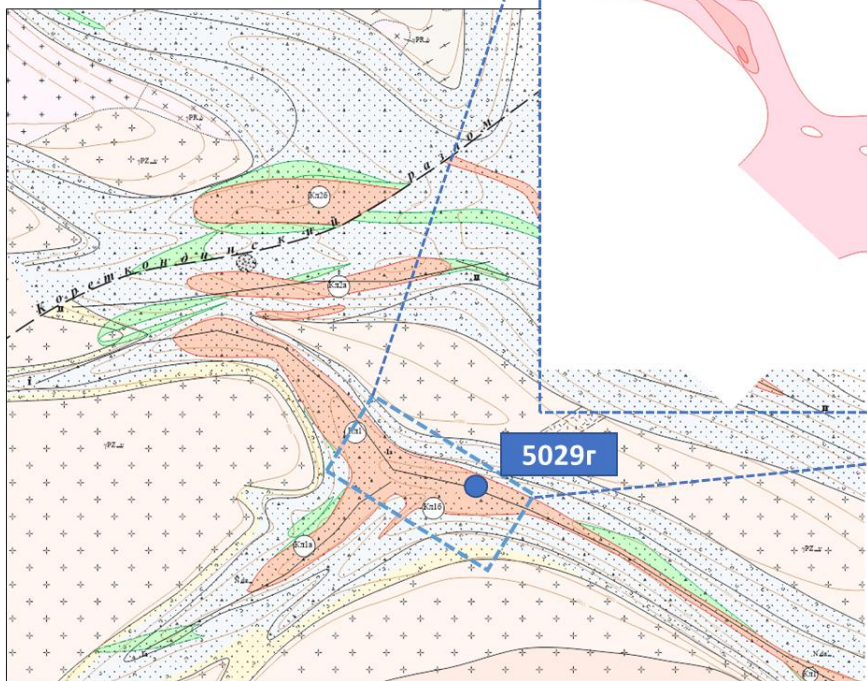
Связь богатых урановых руд с углекислыми HCO_3 – Mg подземными водами



Бедные урановые руды при отсутствии углекислых HCO_3^- – Mg подземных вод



Месторождение Количканское



В отсутствие углекислых гидрокарбонатных магниевых подземных вод – **руды бедные**

Залежь	Скважина	Глубина скважины, м	Форма выражения анализа	Анионы					Катионы				pH	Минерализация, мг/дм ³
				HCO_3^-	CO_3^{2-}	SO_4^{2-}	Cl	Итого	Ca^{2+}	Mg^{2+}	(Na+K) ⁺	Итого		
Кл1	5029г	234	мг/дм ³	366	0,0	0,0	5,7	372	19,0	38	49	108	7,9	478
			%-ЭКВ	97	0,0	0,0	3,0	100	16,0	51	33	100		



APM3
РОСАТОМ

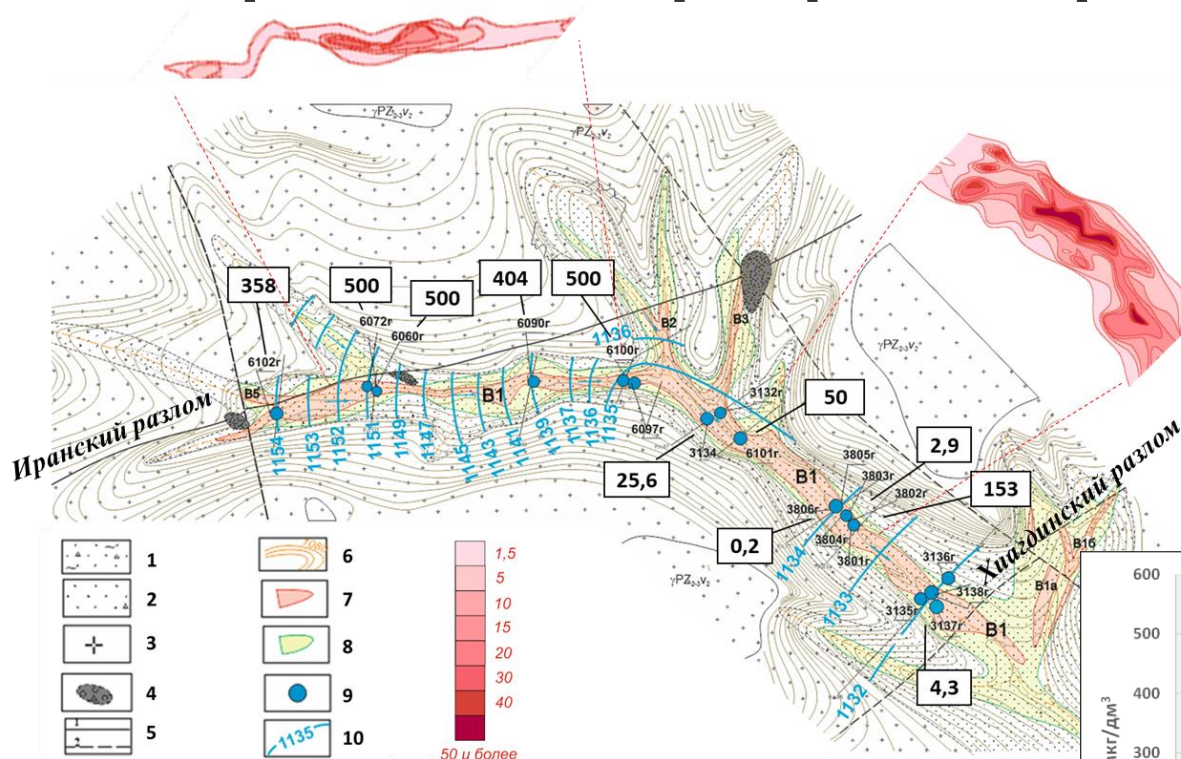
1.2.

Современный восстановительный геохимический барьер

Контрастный барьер на Вершинном

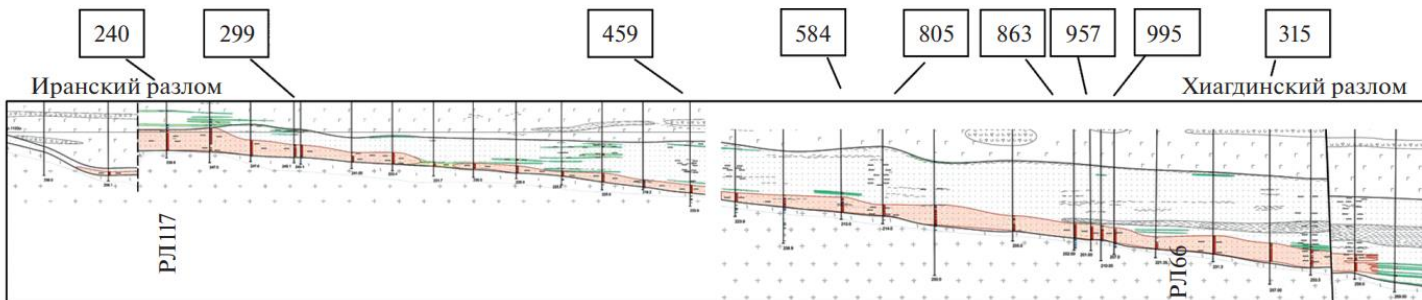
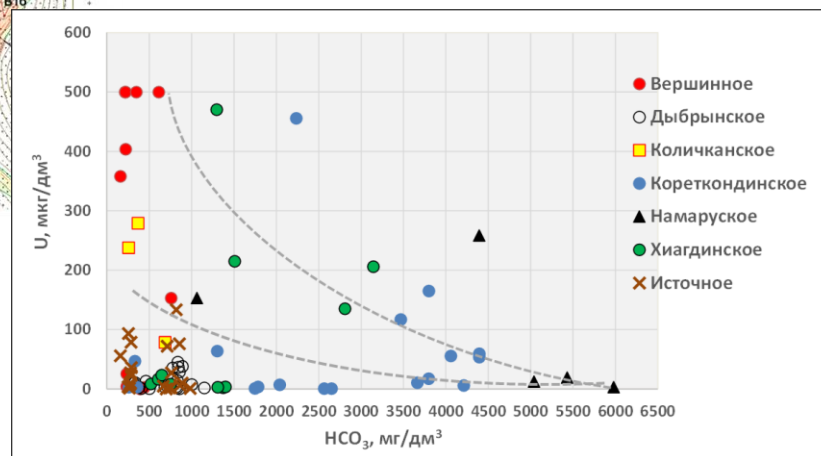


APM3
РОСАТОМ

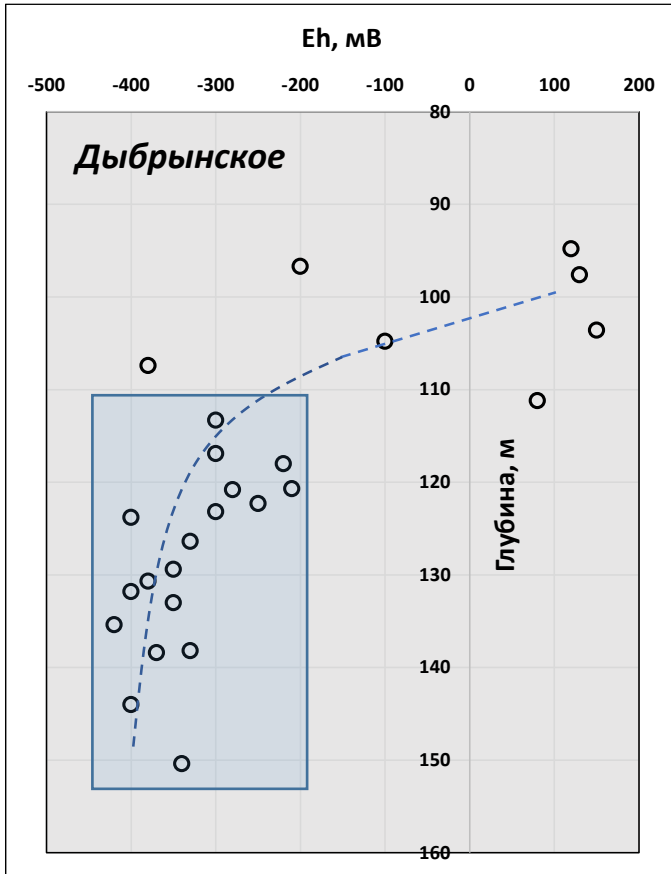


- Кислородсодержание метеорные воды проникают через базальты и мерзлоту, при этом окислительного разрушения урановых руд не происходит

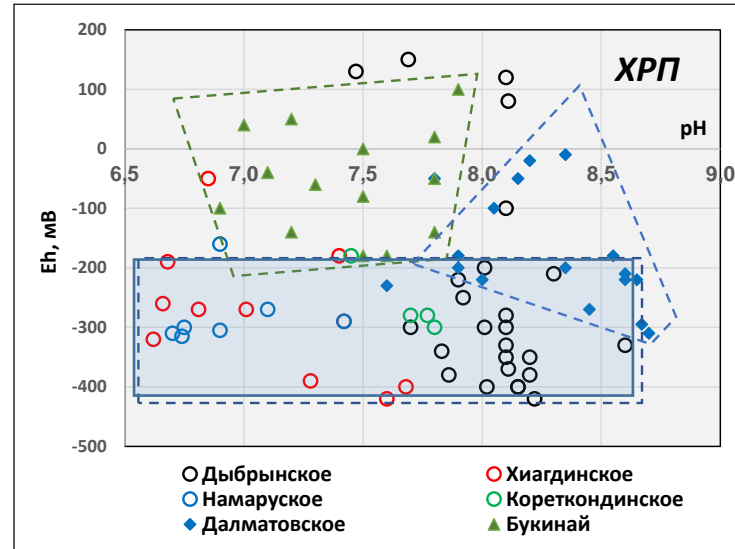
- В зоне современного восстановительного геохимического барьера содержание урана в подземных водах снижается с 500 до 39 мкг/дм³.
- Тоже самое наблюдается на всех месторождениях ХРП



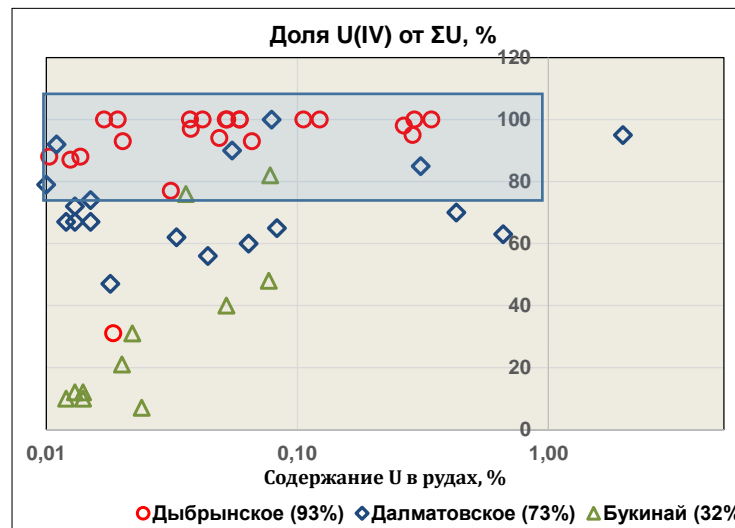
Высокая степень восстановленности литологической среды и урана в рудах



- Какими восстановителями обусловлен столь низкий Eh -420...-300 мВ?



- Высокая степень восстановленности литологической среды (Eh -420...-200 мВ) и урана в рудах (UIV от ΣU – 93%)



- Таких значений Eh нет на урановых месторождениях Узбекистана, Южного Казахстана и даже на древнем месторождении Далматовское в Зауралье (-200 ... -250 мВ)

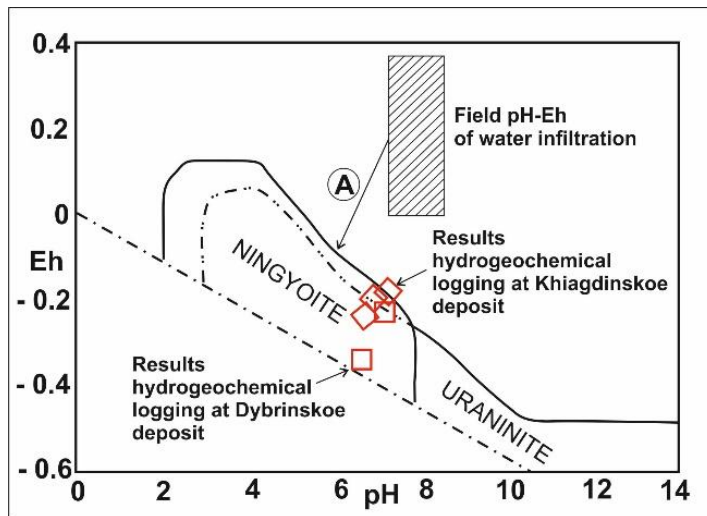
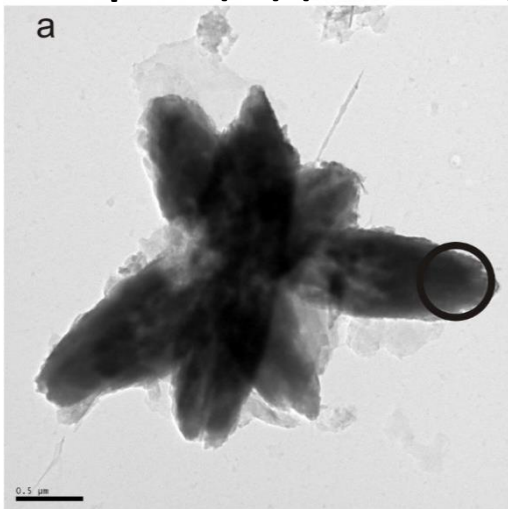
○Дыбринское (93%) ◆Далматовское (73%) ▲Букинай (32%)

Минералогическое подтверждение высокой восстановленности среды



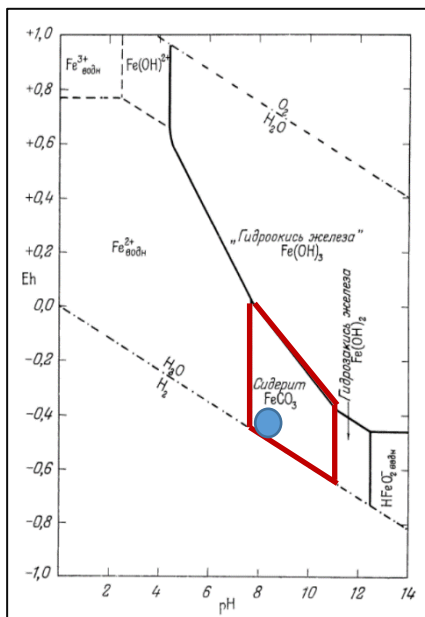
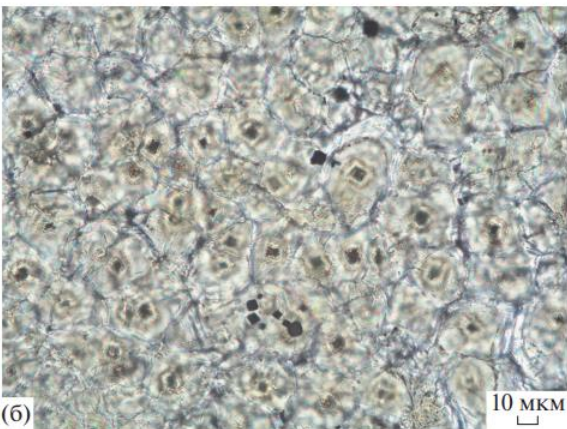
АРМЗ
РОСАТОМ

Фосфат U(IV) (нингиоит)



- **Нингиоит** образуется в сильно восстановительной обстановке. Измеренный окислительный потенциал на pH-Eh диаграмме Kajitani – Eh -400 ... -200 мВ

Сидерит



- **Сидерит** образуется в сильно восстановительной обстановке. Измеренный окислительный потенциал на pH-Eh диаграмме Гаррелса – Eh -400 ... -300 мВ

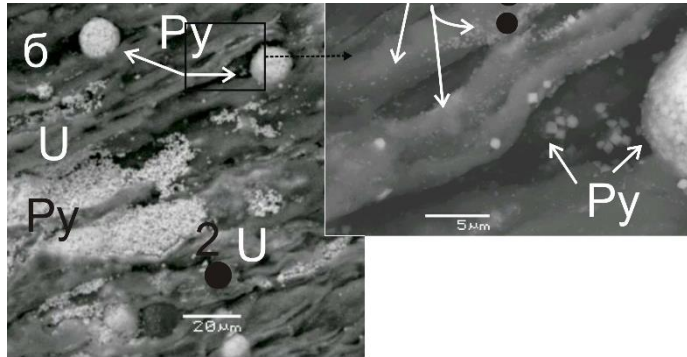


APM3
РОСАТОМ

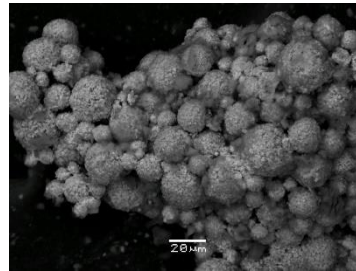
1.3.

Вероятные восстановители

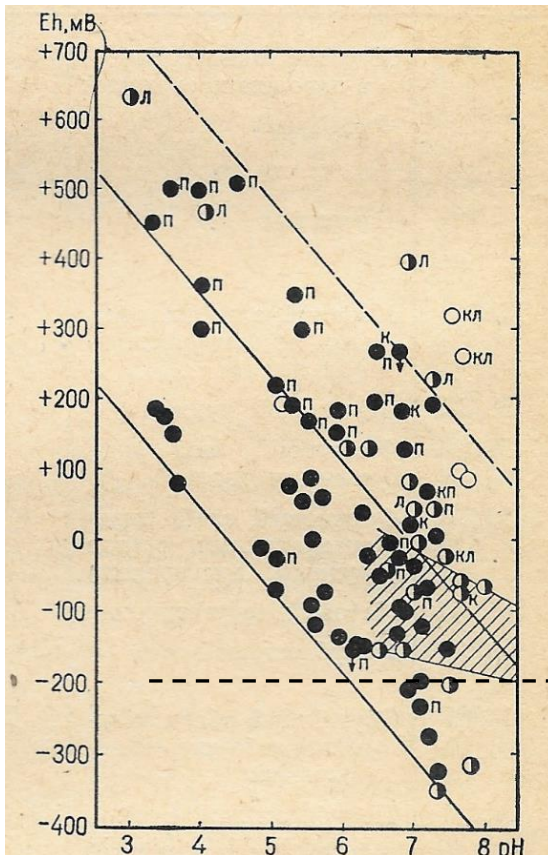
Углистые растительные остатки, растительный детрит



□ Уран в ассоциации с углистым веществом и пиритом



□ Биогенный пирит-марказит (продукт сульфатредукции)



□ Углистое рассеянное вещество в ассоциации с пиритом по А.К.Лисицину создают минимальный окислительный потенциал

Eh -200 мВ

Органическое вещество крайне неравномерно распределено в рудоносной терригенной пачке:

- болотные фации - преимущественно тонкообломочные отложения с растительным детритом, фрагментами растений и торфом ($C_{орг}$ до 20-30%);
- пойменные, старичные фации - пески, алевриты и глины ($C_{орг}$ от 2-3 до 21-25%);
- в краевых частях палеодолин преобладают делювиально-пролювиальные комплексы ($C_{орг}$ 0,5-5,0%);
- пойменными глинисто-алевритовыми пески ($C_{орг}$ 1 - 4%) и
- стрежневые пески с гравием и галькой ($C_{орг}$ 0,8-1,5%);
- **Важно:** наиболее богатые урановые руды локализованы в песках с гравием и галькой стрежневой фации, в которых углефицированное вещество содержится в наименьшем количестве – $C_{орг} \sim 1\%$.

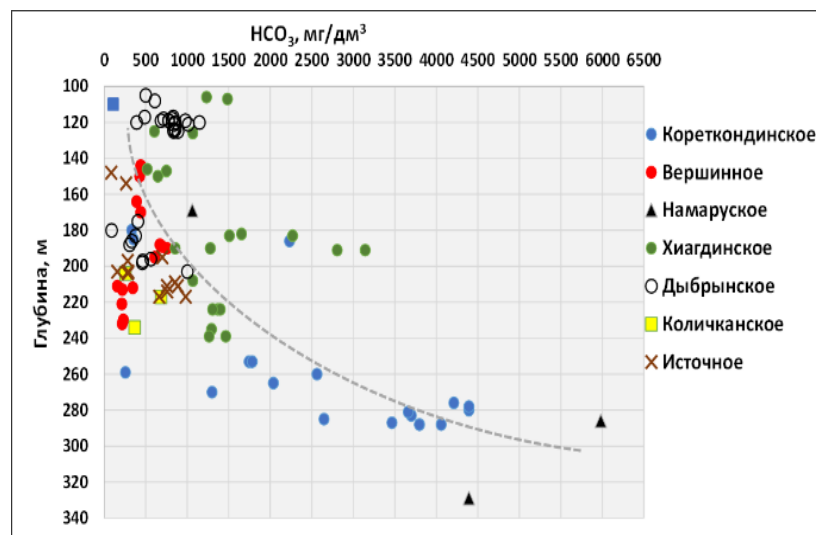
Fe(II) – слабый восстановитель



- ✓ Еще одним восстановителем может быть растворенное Fe(II).
- ✓ Все углекислые воды на месторождениях ХРП железистые. **Содержание в них железа изменяется в широком диапазоне почти пропорционально содержанию гидрокарбоната.**

- ✓ На месторождениях максимальные концентрации ΣFe в мг/дм³:

- Количканское – 0,2
- Источное – 1,2
- Хиагдинское – 5,7
- Тетрахское – 150
- Дыбрынское – 166
- Вершинное – 240
- Намаруское – 255
- Кореткондинское – 780

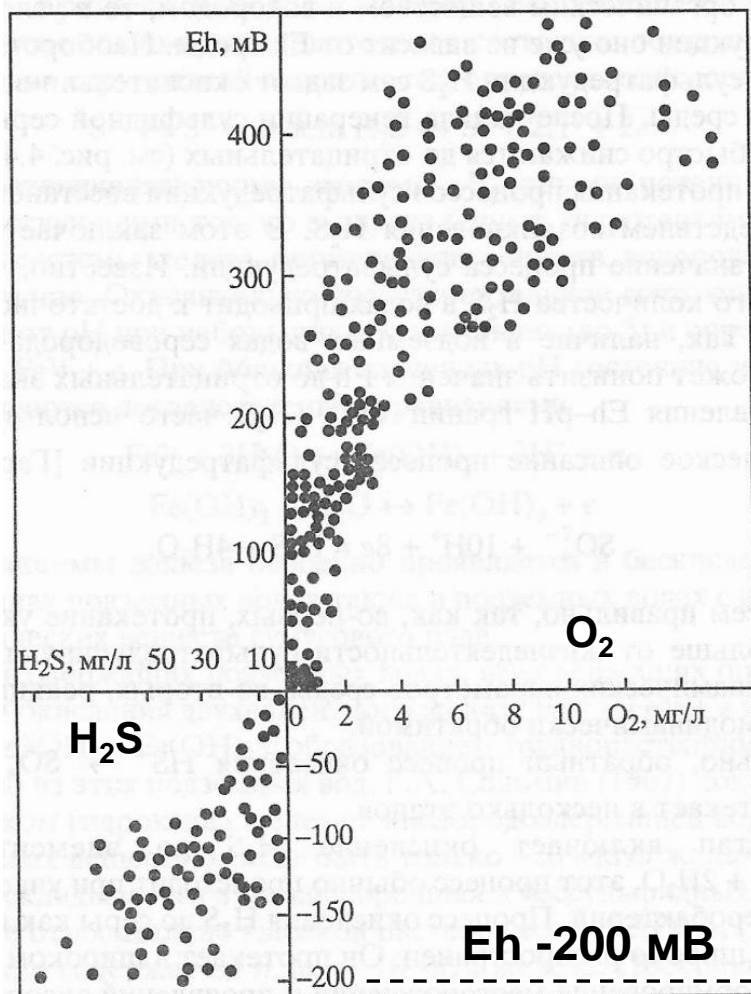


- ✓ В бескислородной и бессульфидной среде Eh находится в области **положительных значений 100÷200 мВ**

Сероводород



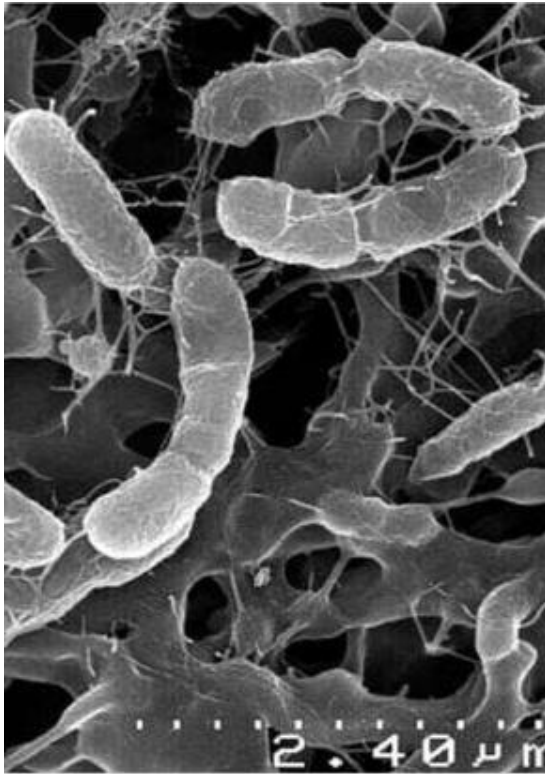
АРМЗ
РОСАТОМ



- Сероводород максимально снижает окислительный потенциал до **-200 мВ** [Щека, Закутин]

- ❖ Углекислые подземные воды на месторождениях Вершинное, Тетрахское, Хиагдинское, Кореткондинское и Намаруское **содержат H_2S**
- ❖ **Наиболее высокие содержания H_2S определены в углекислых подземных водах на месторождениях Намаруское и Кореткондинское – 12,0 и 16,5 мг/дм³**, где обнаружены самые высокие содержания свободного CO_2 и HCO_3 – 3,6 и 6,0 г/дм³, соответственно
- ❖ Источник сероводорода в подземных водах ХРП – **полигенный.**
- ❖ H_2S в составе восходящих из фундамента углекислых вод и как продукт метаболизма сульфатредуцирующих бактерий
- ❖ **Биогенная сульфатредукция очень слабая**, т.к. подземные воды в области Eh - 400... - 200 мВ бессульфатные и в целом холодные (1,5-4,7°C). Это подтверждают результаты микробиологических исследований, согласно которым активность этих бактерий всего лишь **0,17 балла при 3-х бальной** оценке.
- ❖ **Глубинный источник H_2S - преобладающий**

Водородные бактерии



- Теоретически низкие значения E_h -400 мВ могут быть связаны с жизнедеятельностью *водородобразующих бактерий (водородные бактерии)*, продуктами метаболизма которых является сильный восстановитель – атомарный водород (протон).
- Измерения E_h в системе биомасса - подземные воды - горные породы, подтверждающие снижение E_h под действием исключительно водородных бактерий в научной литературе не найдены.
- **Известен единственный эксперимент в искусственной среде снижения E_h до -430 мВ при рН 7,3 под действием этого вида бактерий при их развитии на мясопептонном агаре с глюкозой [Лисицин А.К.]**
- Водородные бактерии более широко распространены в зоне восстановительного геохимического барьера на гидрогенных месторождениях урана, чем бактерии-сульфатредукторы.
- При этом на всех гидрогенных месторождениях в Узбекистане (Бешкак, Букинай, Кенимех), Южном Казахстане (Северный Карамурун, Канжуган, Уванас) и России (Далматовское, Хохловское), в рудоносных отложениях которых обнаружены оба вида бактерий, самые низкие значения E_h находились на уровне -250... -200 мВ, редко -300 мВ.
- Как объясняют микробиологи это связано с тем, что образующийся атомарный биогенный водород мгновенно усваивается автотрофными сульфатредуцирующими и метанобразующими бактериями и не влияет на E_h .
- **На месторождениях ХРП водородные бактерии более жизнеспособны по сравнению с сульфатредуцирующими. Их средний балл активности 1,68.**

➤ **Возможно, дисбаланс, а именно низкая интенсивность сульфатредукции (балл 0,17) и более интенсивное образование атомарного водорода (балл 1,68), обуславливают низкие значения E_h -420...-300 мВ.**

Углеводороды (1/2)



1. В юной части Витимского плоскогорья в составе углекислых вод источников Аршан и Муксун обнаружены эпигенетические газы восстановители (H_2S , H_2 , CH_4 , углеводороды нефтяного ряда), растворенное органическое вещество (1,44 - 6,25 мг/дм³), в составе которого определены кислые смолы, асфальтиты и кислые битумы [Макаров]. Это не единственный пример.
2. Наиболее хорошо изучены условия формирования химического состава и растворенных органических веществ источников углекислых минеральных вод **Молоковка, Шиванда, Дарасун и Кука** [Украинцев].
3. Этими исследованиями показано, что перечисленные источники гидрокарбонатно-магниевого состава **связаны с гранитными интрузиями.**
4. Помимо CO_2 в газовой фазе присутствуют **метан и предельные углеводороды**
5. Все четыре месторождения приурочены к зонам тектонических разрывных нарушений СЗ простирания, также как и углекислые воды на урановых месторождениях Хиагдинского рудного поля.
6. На протяжении 30 лет сотрудниками Иркутского госуниверситета проводилось изучение химического состава минеральных вод Забайкалья, Прибайкалья, Монголии и Китая. За период исследований опробовано более **2000** месторождений минеральных вод. Определены растворённые органические вещества.
7. Результаты сведены в таблицу.
8. Эти данные также подтверждают **повсеместное присутствие в холодных углекислых водах Забайкалья битумоидов.**

Основные характеристики минеральных вод	Холодные углекислые воды	
	Забайкалье	Монголия
Преобладающий компонентный и газовый состав, г/дм ³ , (%)	HCO_3 , Ca, Mg, $\text{CO}_2 > 90$	HCO_3 , Ca, Mg, Na, $\text{CO}_2 > 59-98$, N_2 до 33
Минерализация, г/дм ³	0,3 – 3,3	0,19 – 13,0
$\text{C}_{\text{орг}}$, мг/дм ³	2,5-65,5	4,9-47,9
Нейтральный битум, мг/дм³	0,1-0,9	0,1-1,1
Кислый битум, мг/дм³	0,1-1,2	0,1-1,0
Гумусовые (спирторастворимые) вещества, мг/дм ³	0,6-5,5	0,4-5,5

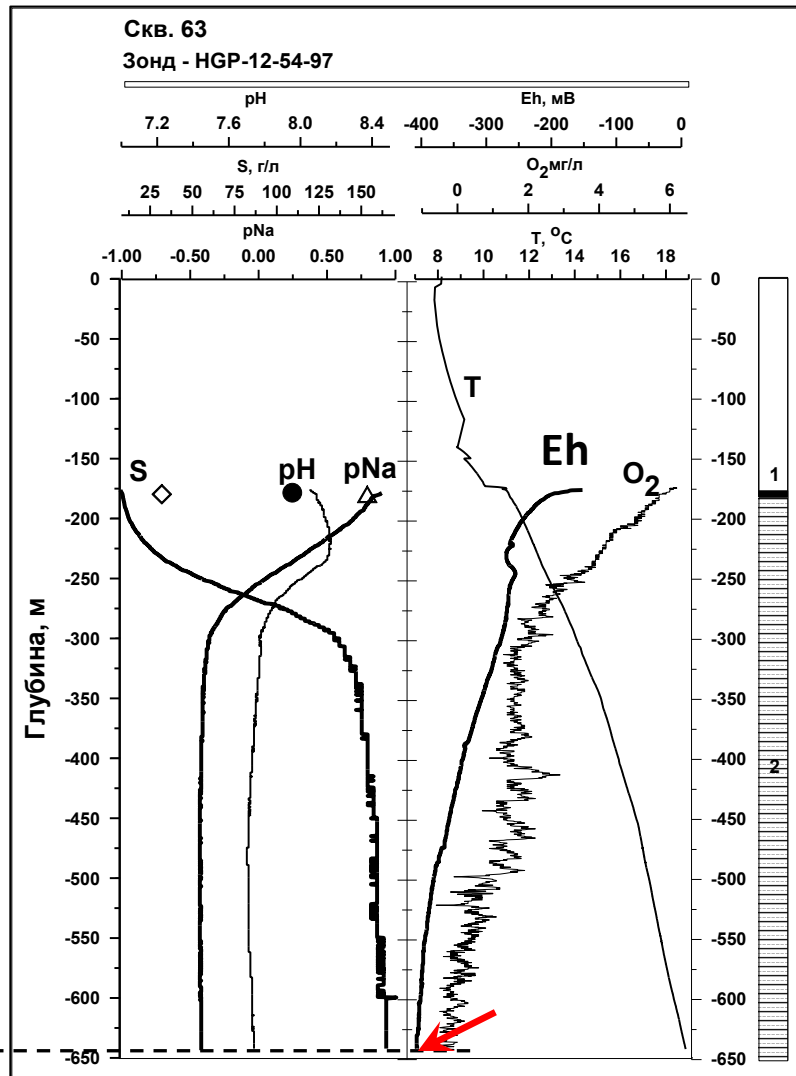
Углеводороды (2/2)



АРМЗ
РОСАТОМ



Eh -400 мВ



1. На месторождении **Хиагдинское** присутствие углеводородов в подземных водах обнаружено в пробе углекислого газа в виде примесей **H₂S, CH₄ и C_nH_{2n+2}**.
2. Присутствие **метана** в большом количестве установлено в некоторых случаях возгорания газовой-жидких фонтанов углекислых вод на буровых установках в ходе ГРП.
3. Методом гидрогеохимического каротажа Eh измерен **Pt** и **Ti** стеклянными электродами в бывшей нефетедобывающей скважине в Сергиевском нефтеносном районе Самарского Поволжья.
4. В скважине, заполненной сопутствующим **нефтедобычу** хлоридно-натриевым рассолом без жидкой нефти, но содержащим **водорастворимые углеводороды**, на глубине 650 м значение Eh = -400 мВ.

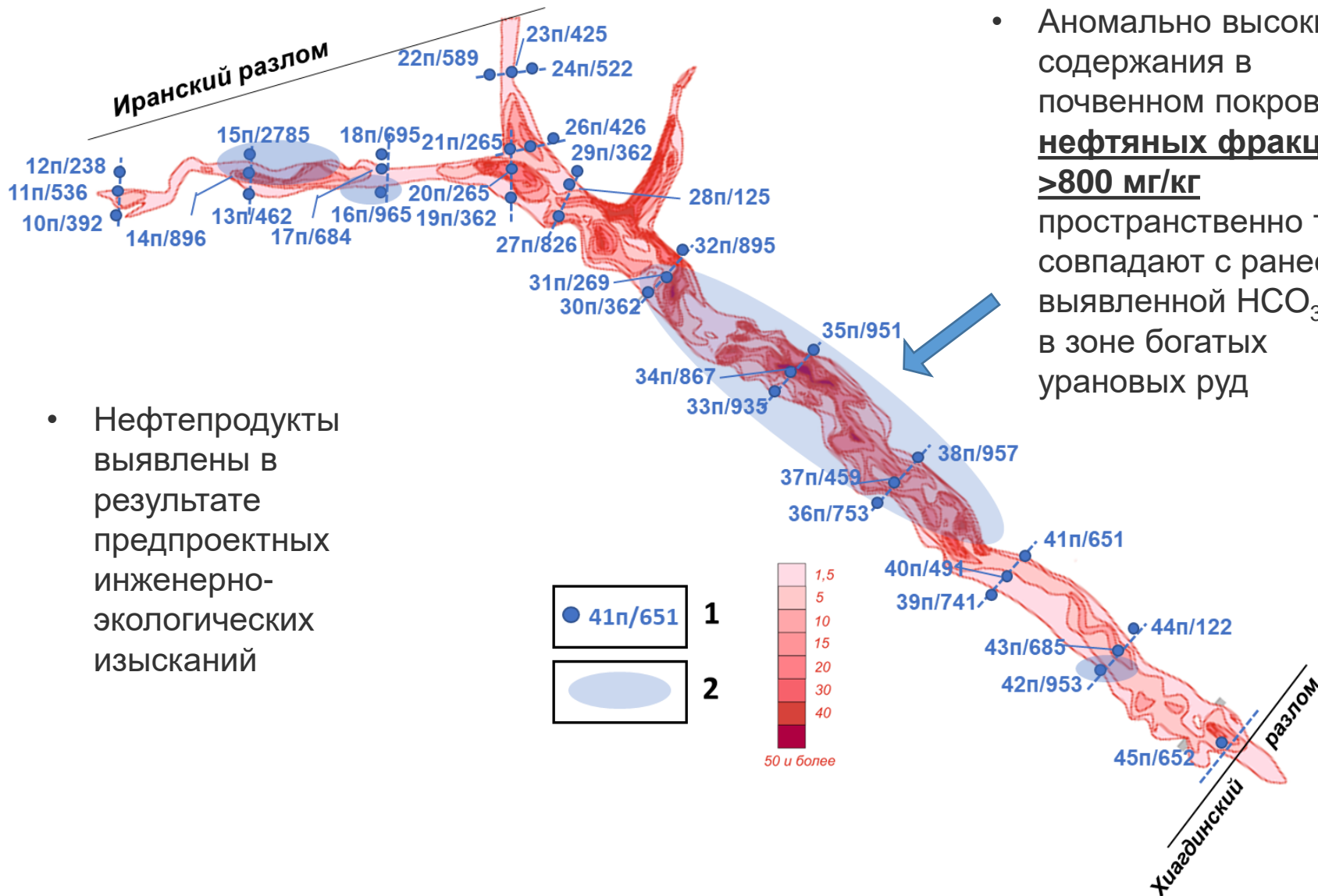


АРМЗ
РОСАТОМ

1.4.

Распространение углеводородов по площади месторождений (новый критерий)

Вершинное (нефть в почвах)



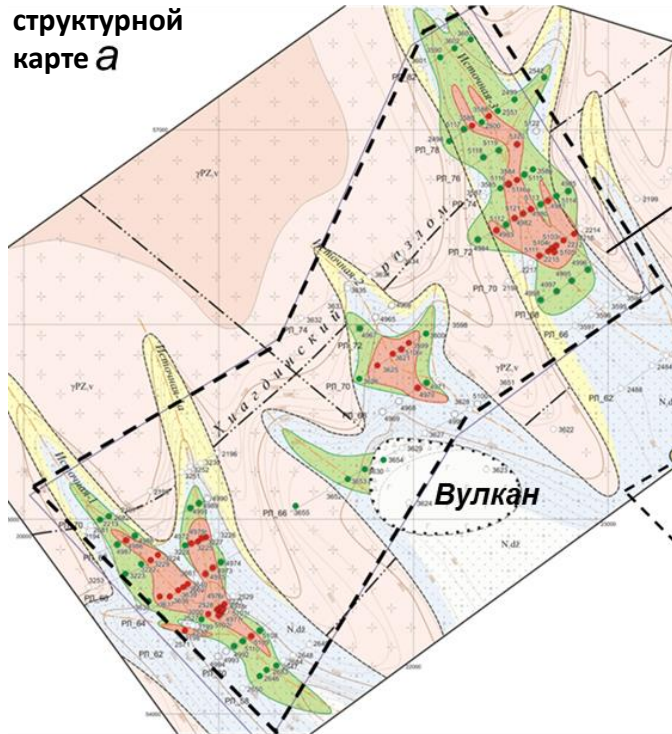
- Нефтепродукты выявлены в результате предпроектных инженерно-экологических изысканий

- Аномально высокие содержания в почвенном покрове **нефтяных фракций >800 мг/кг** пространственно точно совпадают с ранее выявленной $\text{HCO}_3 - \text{Mg}$ в зоне богатых урановых руд

Источное (нефть в почвенном покрове)



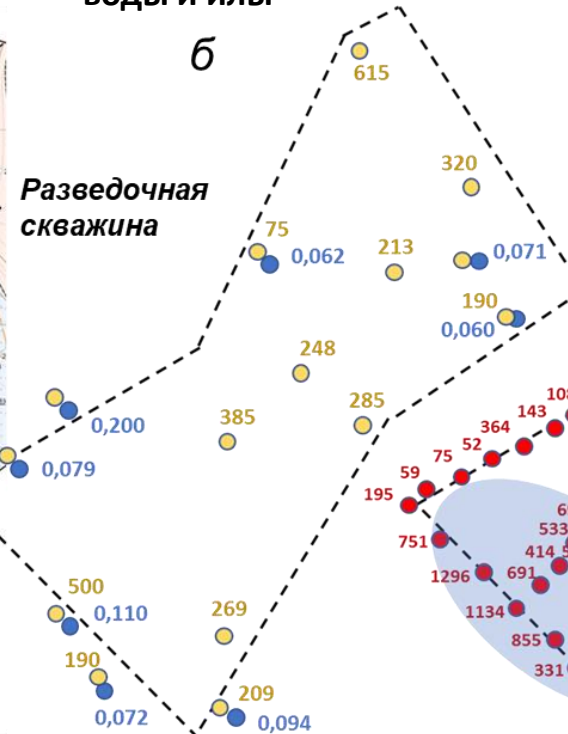
Рудоносность
на геолого-
структурной
карте *а*



Поверхностные
воды и илы

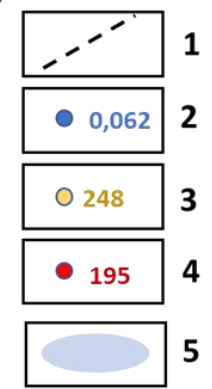
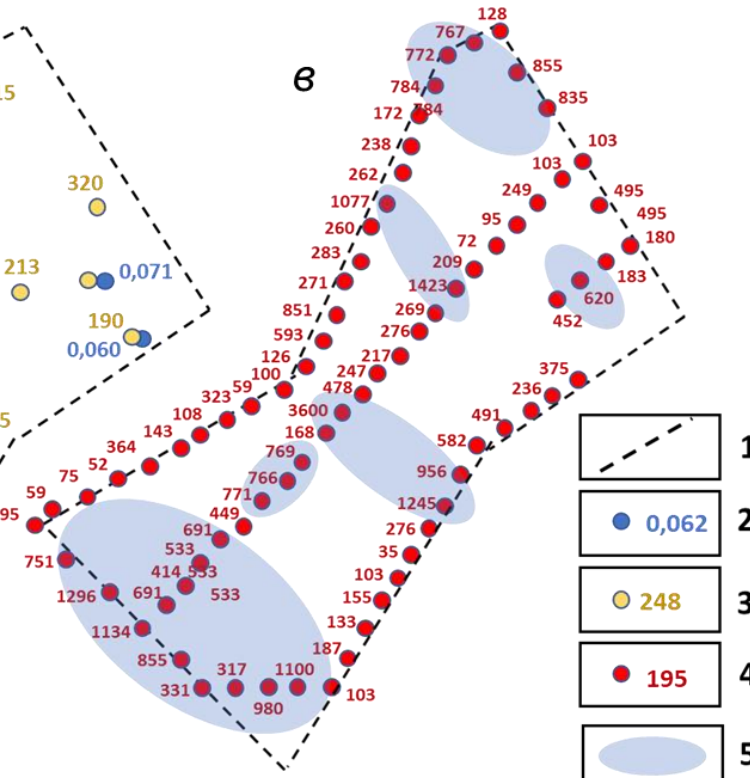
б

Разведочная
скважина



Почвы

в

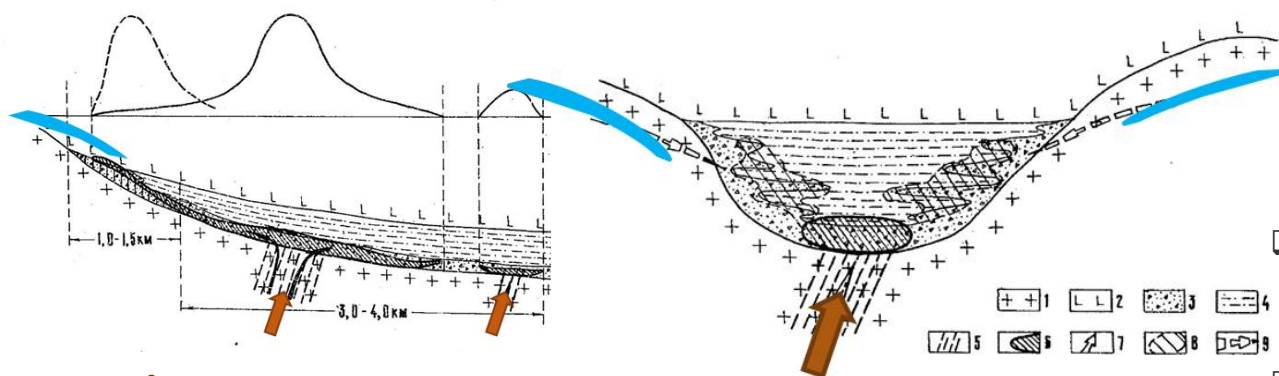
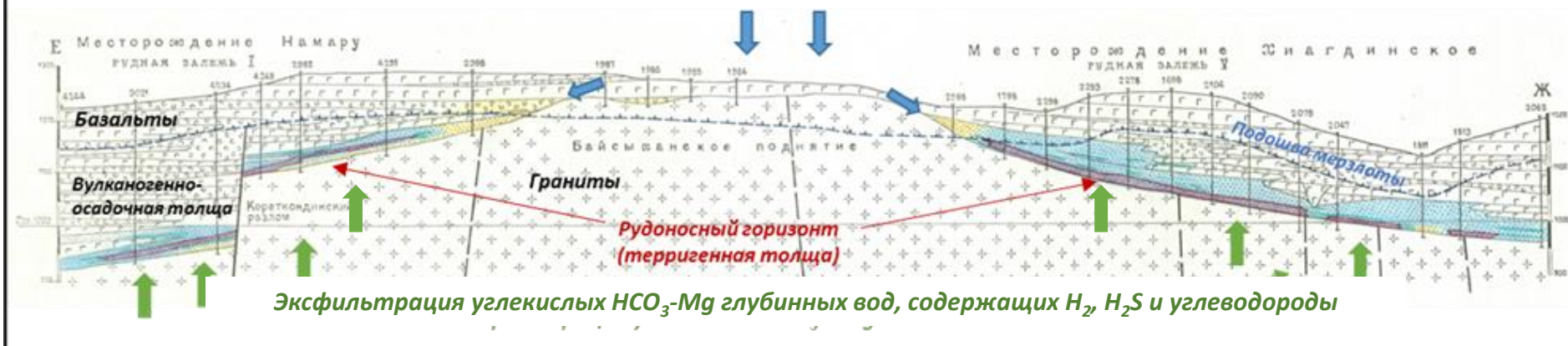


- Нефть обнаружена во всех 75 пробах почв, т.ч. за пределами участка буровых работ и, вероятно, имеет природное, а не техногенное происхождение
- Аномальные содержания нефти >500 мг/кг также как рудные залежи ориентированы в СЗ направлении и почти совпадают с их проекциями на дневную поверхность

Концептуальная модель рудосохранения



Инфильтрация O_2 -содержащих метеорных вод через сезонные сквозные талики



Эксфильтрация – CO_2 , H_2S , CH_4 , углеводороды

- ❑ Концентраторами урана в рудах являются сингенетические (углисто-органическое вещество) и эпигенетические (углеводороды) осадочным отложениям восстановители
- ❑ Эпигенетические восстановители значительно преобладают над сингенетическими
- ❑ Рудопроявления в зонах трещиноватости базальтов и гранитов – пути миграции летучих углеводородов



Заключение

1. Подтверждено существование современного контрастного восстановительного геохимического барьера с Eh в его зоне -420...-200 мВ. Такие весьма низкие значения окислительного потенциала не могут создаваться потенциалзадающими системами: углистое вещество, сероводород и Fe(II). Eh в этих системах не опускаются ниже -200 мВ.
2. Предполагается, что Eh -420... -200 мВ может быть обусловлен действием сингенетических и эпигенетических восстановителей – атомарный водород, генерируемый водородными бактериями, и восходящие из фундамента по проницаемым зонам разломов углекислые подземные воды, содержащие углеводороды. Второй источник более масштабный.
3. Присутствием эпигенетических восстановителей может быть объяснено наличие необычных урановых рудопроявлений в зонах трещиноватости базальтового покрова и гранитов скального основания, где сингенетические восстановители отсутствуют.
4. **Углекислые гидрокарбонатные магниевые подземные воды еще один новый критерий выявления месторождений витимского типа**
5. **Пространственная ассоциация углеводородных аномалий в почвенном покрове с проекциями рудных тел на дневную поверхность может оказаться дополнительным поисковым признаком урановых месторождений витимского типа.**
6. Полученные результаты – это основа для дальнейших более детальных и разносторонних исследований.
7. Особенное внимание следует сфокусировать на установлении источника и путей миграции углеводородов, особенно летучих углеводородов.
8. **При поиске урановых месторождений витимского типа весьма эффективным может быть метод атмогеохимии**



АРМЗ
РОСАТОМ

Спасибо за внимание

Солодов Игорь Николаевич

Доктор г.-м. наук

Директор программ инновационного и
технологического развития АО

«Атомредметзолото»

Карамушка Владимир Петрович

Главный специалист НИЛ геомеханики и
недропользования (НИЛ-37) ВНИПИПТ

22.11.2022