



ВНИПИ
ПРОМТЕХНОЛОГИИ
РОСАТОМ

Оценка проявления химической кольматации рудоносных отложений методом геохимического моделирования на примере залежи Х4 Хиагдинского месторождения Витимского урановорудного района (Забайкалье)

Дедюлин Илья Николаевич¹,
Василевский П.Ю.¹, Солодов И.Н.²

^{*1} АО ВНИПИпромтехнологии,

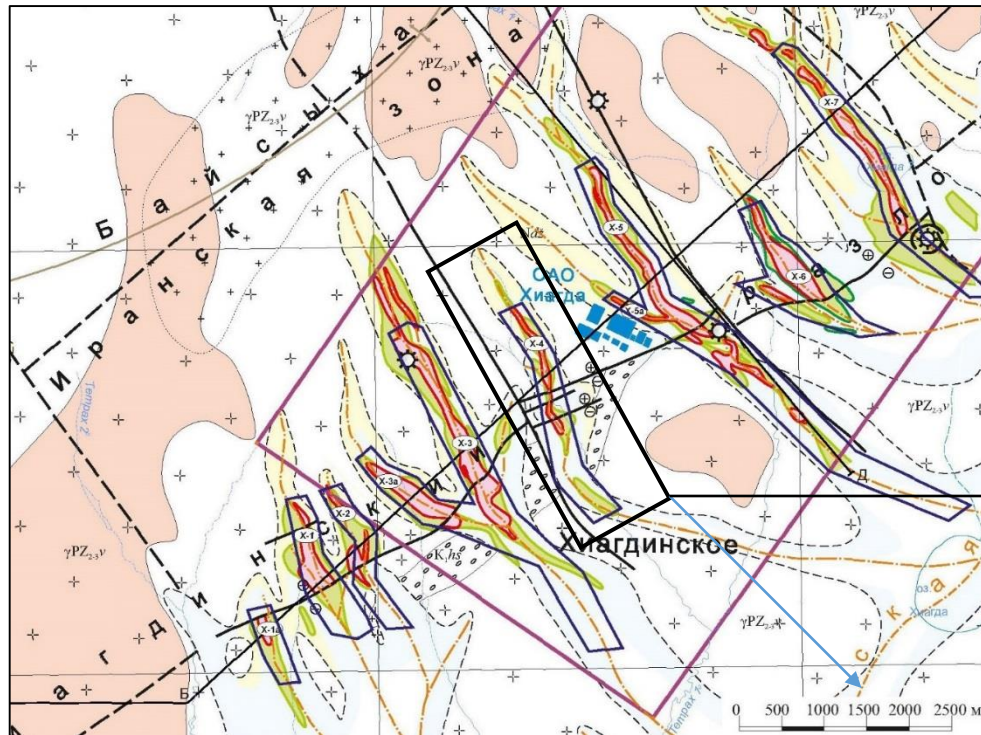
^{*2} АО «РОСАТОМ НЕДРА»

Москва, 2025

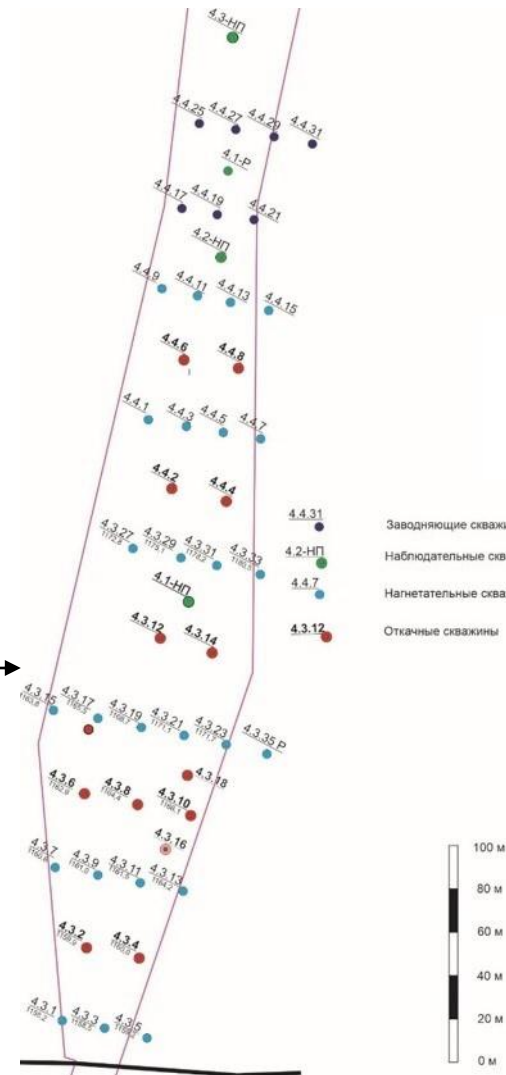
Хиагдинское месторождение. Залежь Х4



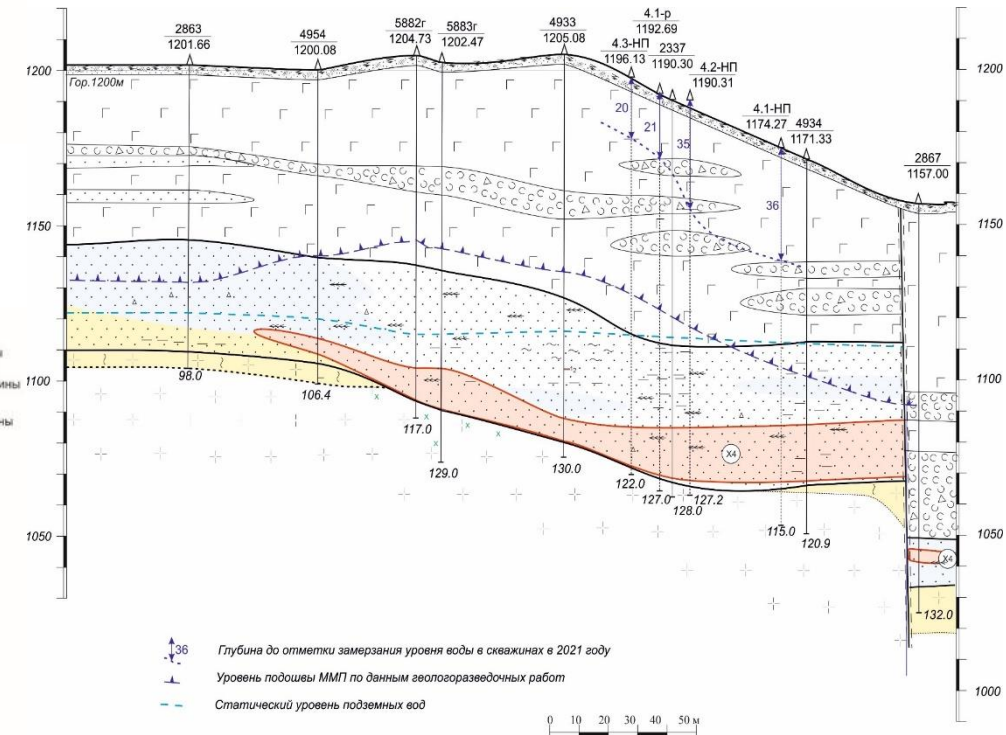
ВНИПИ
ПРОМТЕХНОЛОГИИ
РОСАТОМ



Фрагмент геологической карты ХРП



Залежь Х4

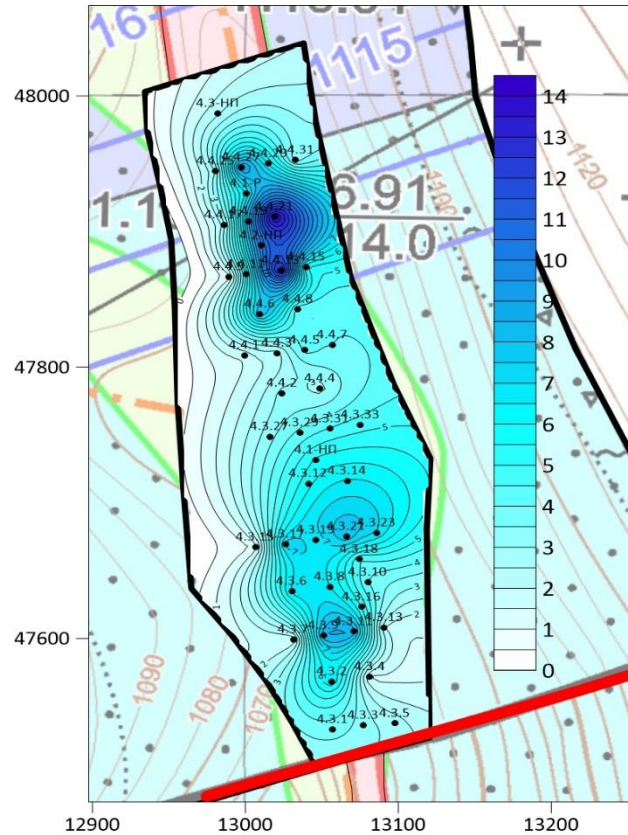


Продольный разрез по залежи Х4

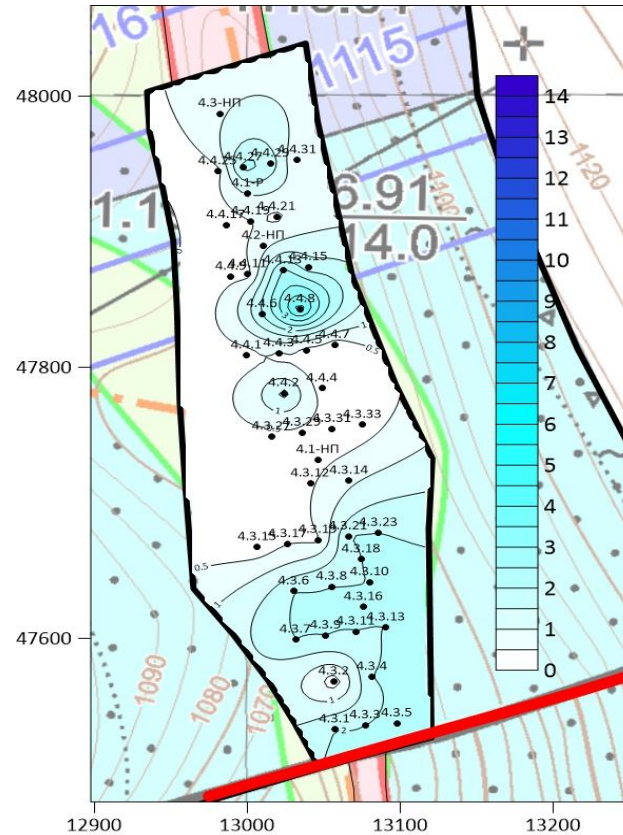
Залежь Х4. Проблема снижения проницаемости



ВНИПИ
ПРОМТЕХНОЛОГИИ
РОСАТОМ



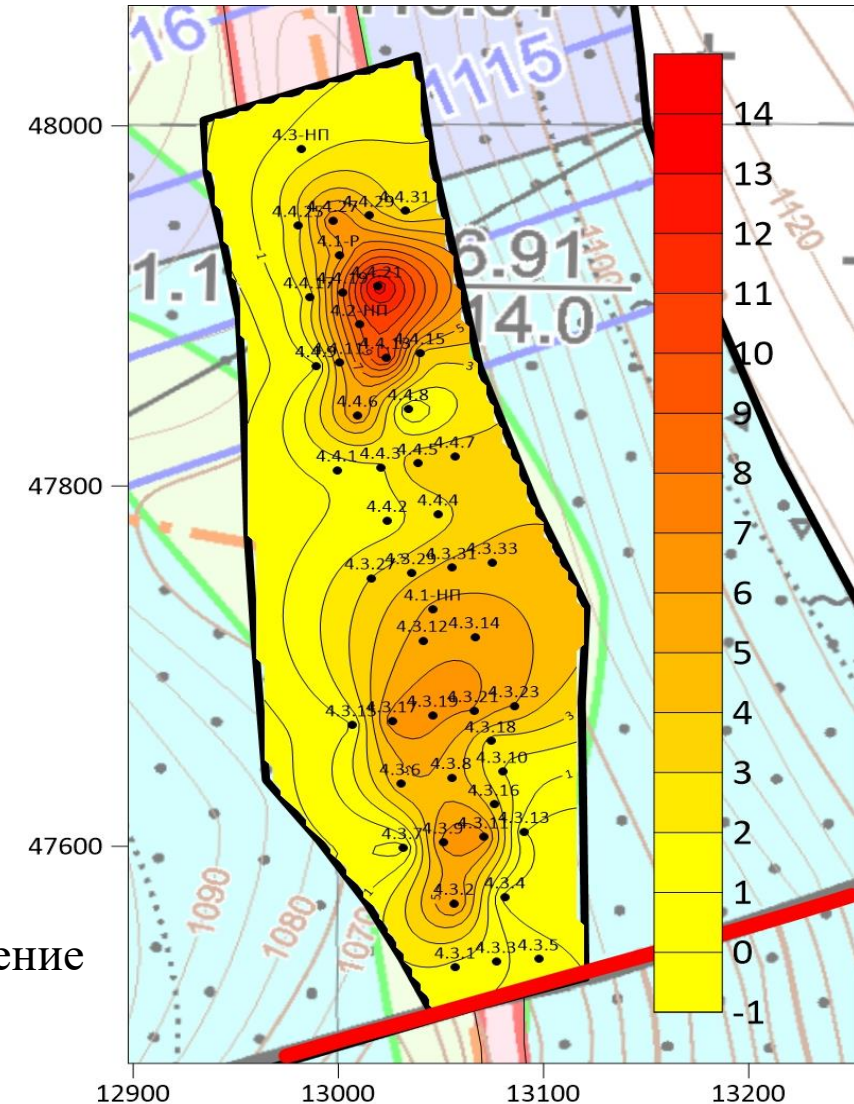
Дебит налива при освоении, м³/ч



Дебит налива в марте 2024 г, м³/ч

- По результатам опытных работ отмечается резкое снижение проницаемости рудоносного горизонта

	Коэффициент фильтрации, м/сут
Предварительная разведка	1-2
Опытный налив 2022	0.16
Кустовые откачки 2024	0.27

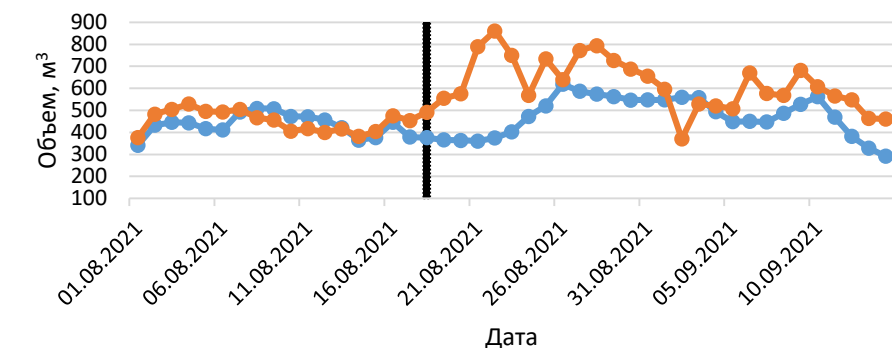


Разница дебитов налива при освоении и в марте 2024 г, м³/ч

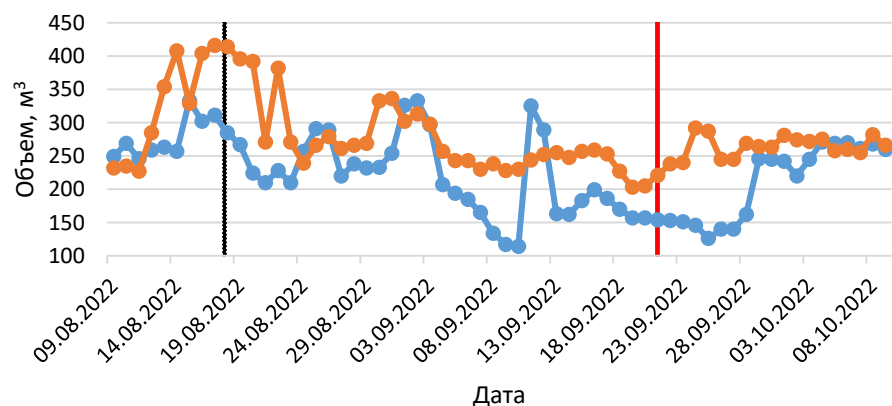
Залежь Х4. Возможные причины снижения проницаемости

Основными причинами снижения проницаемости являются:

- **химическая коьматация** порового пространства за счет образования кальцита, гипса, соединений Fe, Al, Mg;
- **коьматация фильтрационной зоны скважины** тонкими взвесями как при сооружении скважин, так и при их эксплуатации.



■ РВП — объем ПР — подача ВР



■ РВП ■ подключение узла подкисления — объем ПР — подача ВР

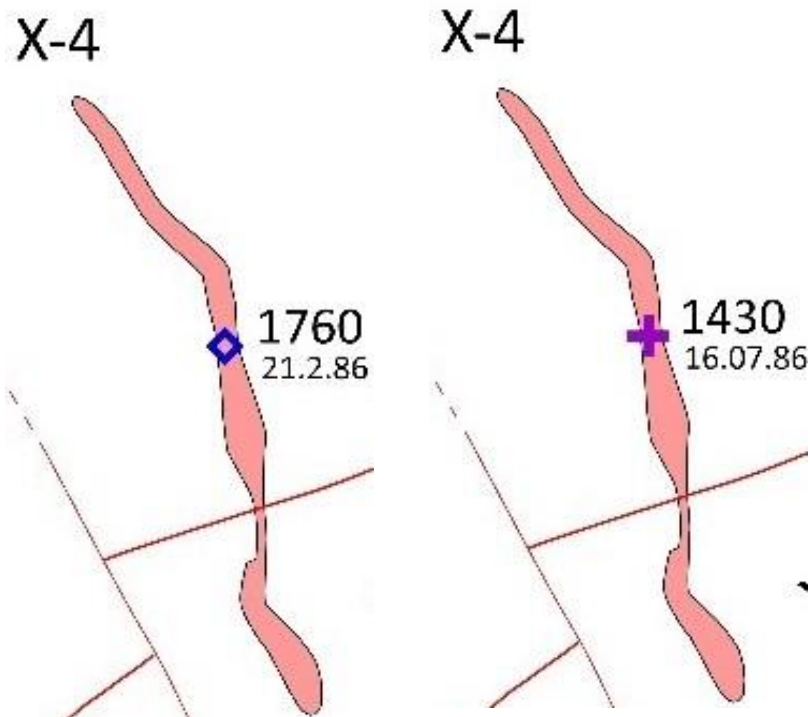
- В пользу механической коьматации говорит кратковременное увеличение приемистости закачных скважин а также увеличение дебита откачных после проведения прокачек
- О химической коьматации можно судить по увеличению приемистости и впоследствии дебита откачных скважин после увеличения кислотности ВР до 10 г/л

Подземные воды залежи Х4

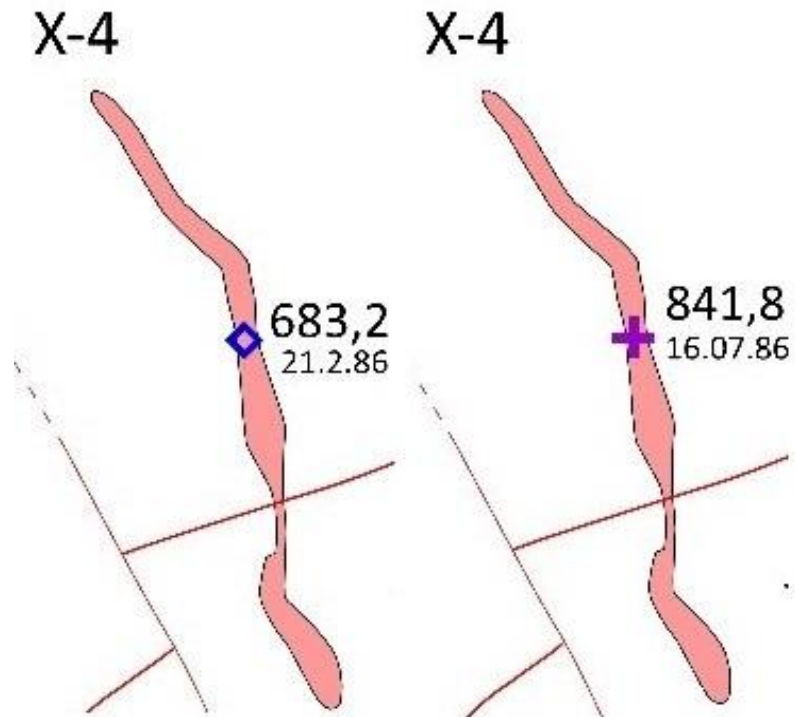


ВНИПИ
ПРОМТЕХНОЛОГИИ
РОСАТОМ

Залежь Х4 Хиагдинского месторождения отличается высокой карбонатностью рудовмещающих пород



Значения CO_2 (в мг/л) для скважин Х4 в 1986 г.



Значения HCO_3^- (в мг/л) для скважин Х4 в 1986 г.

- На текущий момент гидрокарбонат в отбираемых водах не обнаруживается

Для оценки возможных процессов, происходящих в системе пластовые воды – ВР – пласт необходимо проведение гидрогеохимического моделирования. Для этого необходимо определение химического состава подземных вод, технологических растворов и минеральной составляющей вмещающих пород.

- Гидрогеохимическое моделирование позволит определить механизм формирования подземных вод, термодинамическое равновесие пород с подземными водами продуктивного горизонта
- Расчет равновесия системы ВР-пластовые воды-вмещающие породы позволяет определить минералы, которые могут выпадать в осадок и когельматировать пласт, и определить возможные пути декогельматации или состав ВР для меньшей когельматации пласта
- Термодинамическое моделирование проводилось в программном комплексе PHREEQC. Для оценки степени недонасыщения или перенасыщения подземных вод к минералам используется индекс насыщения (SI – Saturation Index).

$$SI = \lg \frac{IAP}{L}$$

Подземные воды и техногенные растворы



ВНИПИ
ПРОМТЕХНОЛОГИИ
РОСАТОМ

Компонент	Показатель	Величина
Подземные воды, фон	Температура	3
	pH, ед	7,35
	Eh, мВ	-280
	HCO ₃ , мг/дм ³	1262
	SO ₄ , мг/дм ³	30,7
	Cl, мг/дм ³	9
	Ca, мг/дм ³	104,2
	K, мг/дм ³	8,9
	Mg, мг/дм ³	157,2
	Na, мг/дм ³	68,7
	Fe, мг/дм ³	0,6
	Al, мг/дм ³	0,5
	Ni, мг/дм ³	0,5
	P, мг/дм ³	0,5
	Si, мг/дм ³	0,5
	Mn, мг/дм ³	0,5
	U, мг/дм ³	0,005

Компонент	Показатель	Величина
ВР	Температура	3
	pH, ед	1,5
	Eh, мВ	350
	HCO ₃ , мг/дм ³	1262
	SO ₄ , мг/дм ³	30,7/2,9/1,6
	Cl, мг/дм ³	15
	Ca, мг/дм ³	540
	K, мг/дм ³	69
	Mg, мг/дм ³	729
	Na, мг/дм ³	347
	NO ₃ , мг/дм ³	500
	NH ₄ , мг/дм ³	150
	Fe, мг/дм ³	815
	Al, мг/дм ³	1613
	Zn, мг/дм ³	79
	P, мг/дм ³	71
	Si, мг/дм ³	105
	Mn, мг/дм ³	18

Были рассмотрены следующие системы:

- Природные воды в равновесии с минералами
- Смешение природных вод с ВР в соотношении от 90:10 до 10:90 с шагом 10%
- Равновесие полученных растворов с минералами
- Для состава ВР использовались данные с залежи X5, а также дополнительно 2 состава на основании редких (по 2 измерения за весь период времени) с содержанием SO₄, определенных прямым способом и пересчитанных из содержания H₂SO₄

Вмещающие породы



ВНИПИ
ПРОМТЕХНОЛОГИИ
РОСАТОМ

	Содержание, %	Формула	М, г/моль	т, г	п, моль
Кварц	28-80	SiO_2	60	1260	21
Калиевые полевые шпаты (микроклин, ортоклаз)	20-40	KAlSi_3O_8	277	700	2.53
Плаггиоклаз	3,0-21	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{-CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	262-278	280	1.01
Биотит	0,4	$\text{K (Mg, Fe)}_3[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}] [\text{OH, F}]_2$	416-512	9.33	
Хлорит	0.002	$(\text{Mg, Fe})_3(\text{Si, Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot (\text{Mg, Fe})_3(\text{OH})_6$	474	0.05	0.00010
Амфибол	0,002	$(\text{Mg, Fe, Ca, Al, Na, K, Li})(\text{Si, Al})_8\text{O}_{22}$	548	0.05	0.00009
Пироксен (авгит)	0,007	$(\text{Ca, Na})(\text{Mg, Fe, Al, Ti})(\text{Si, Al})_2\text{O}_6$	215	0.16	0.00076
Гипс	ед.зн.	$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	172	23.33	0.14
Каолинит		$\text{Al}_2[\text{Si}_2\text{O}_5](\text{OH})_4$	258	204.17	0.79
Галлуазит, метagalлуазит	Сумма глинистых минералов от 5 до 33-35	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	258	29.17	0.11
Оливин	0,001	$(\text{Mg, Fe})_2[\text{SiO}_4]$	204	0.02	0.00011
Пирит кристаллический	0.45	FeS_2	120	10.50	0.09
Марказит	0.22	FeS_2	120	5.13	0.04
Настуран	0.01-1.5	От UO_2 до U_3O_8	270-842	11.74	0.01
Урановые черни		UO_2	270	11.74	0.04
Коффинит		$\text{U}(\text{SiO}_4)_{1-x}(\text{OH})_{4x}$	398	11.74	0.03
Нингиоит	редкий	$\text{CaU}(\text{PO}_4)_2 \cdot 1\text{-}2\text{H}_2\text{O}$	504		
Пирит (глобулярный)	0.5-2.0	FeS_2	120	46.67	0.39
Марказит	0.5-3.0	FeS_2	120	81.67	0.68
Гидрогетит	0.3-2.0	$3\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	552	53.67	0.10

Результаты расчетов

рН, ед	7,13
Eh, мВ	-260
Минерал	SI
Арагонит	0,31
Кальцит	0,45
Магнезит	0,15
Fe(OH) ₃	0,15
Сидерит	0,16

- Система природные воды – вмещающие породы имеет хорошую корреляцию с наблюдаемыми данными по основным показателям рН и Eh.
- Также в системе возможно выпадение карбонатов – кальцита, арагонита, магнезита и сидерита, что согласуется с данными разведки, по которым отмечается кальцитизация и сидеритизация рудоносных отложений
- В системе природные воды – ВР – вмещающие породы на различных стадиях смешения растворов возможно выпадение различных минералов - аморфный кремнезем, гипс, гидрогетит, гематит; алунит, аморфный гидроксид Fe III, ярозит, гиббсит.
- При этом данные расчетов совпадают с теоретическими данными и результатами опытных определений на других месторождениях

Результаты расчетов

	Соотношение фон:ВР								
	1:9	2:8	3:7	4:6	5:5	6:4	7:3	8:2	9:1
рН, ед	1,54	1,58	1,63	1,7	1,8	1,9	2,1	2,55	4,3
Минерал	SI								
SiO ₂ at	0.09	0.05	0.01	-0.04	-0.1	-0.18	-0.28	-0.44	-0.72
Гипс	0.04	0	-0.04	-0.09	-0.15	-0.22	-0.3	-0.41	-0.58
Гетит	0.59	0.64	0.72	0.82	0.97	1.21	1.61	2.57	5.55
Гематит	2.12	2.23	2.37	2.58	2.88	3.34	4.15	6.07	12.01
Алунит	-7.64	-7.69	-7.71	-7.67	-7.55	-7.25	-6.59	-4.57	4.51
Fe(OH) ₃	-4.68	-4.64	-4.59	-4.5	-4.36	-4.15	-3.76	-2.82	0.14
Ярозит	-0.23	-0.12	0.01	0.19	0.43	0.8	1.42	2.91	6.32
Гиббсит	-6.86	-6.84	-6.78	-6.69	-6.55	-6.31	-5.86	-4.68	0.22
Каолинит	-10.18	-10.18	-10.15	-10.06	-9.88	-9.54	-8.85	-6.8	2.45

- Стоит отметить, что режим отработки залежи непостоянный. За время простоя минералы, по которым раствор пересыщен могут выпасть в осадок. Также имеет место смена режима работы откачных и закачных скважин. Как следствие происходит образование геохимического барьера между откачными и закачными скважинами
- Для корректного задания системы необходимо проведение гидрогеохимического опробования ВР и природных вод *in situ* и в лабораторных условиях
- Также необходимо проведение отбора керна и минералогический анализ пород
- Моделирование позволит управлять физико-химическим процессом СПВ, выбрать оптимальный режим закисления
- На основании уточненных данных по составу ВР и минеральному составу с помощью моделирования можно будет подобрать декольматирующий раствор
- В дальнейшем необходимо рассмотреть влияние углекислых вод на отработку ХРП. Залежь Х4 отличалась повышенными содержаниями HCO_3 и CO_2 . На основе этих данных возможно оценить влияние CO_2 на отработку и регулировать содержание SO_4 в подаваемых ВР



ВНИПИ
ПРОМТЕХНОЛОГИИ
РОСАТОМ

Спасибо за внимание

Дедюлин Илья Николаевич

Dedyulin.I.N@vnipt.ru

23.04.2025