



РОСАТОМ
НЕДРА

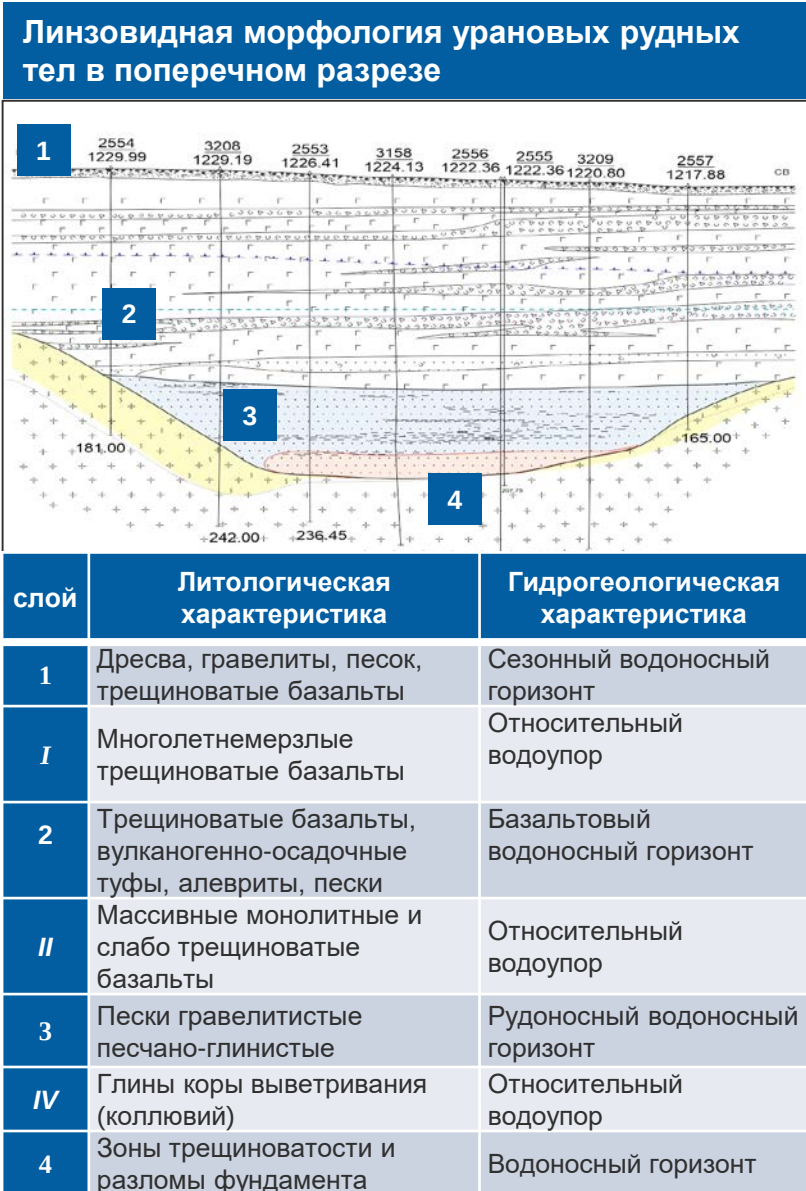
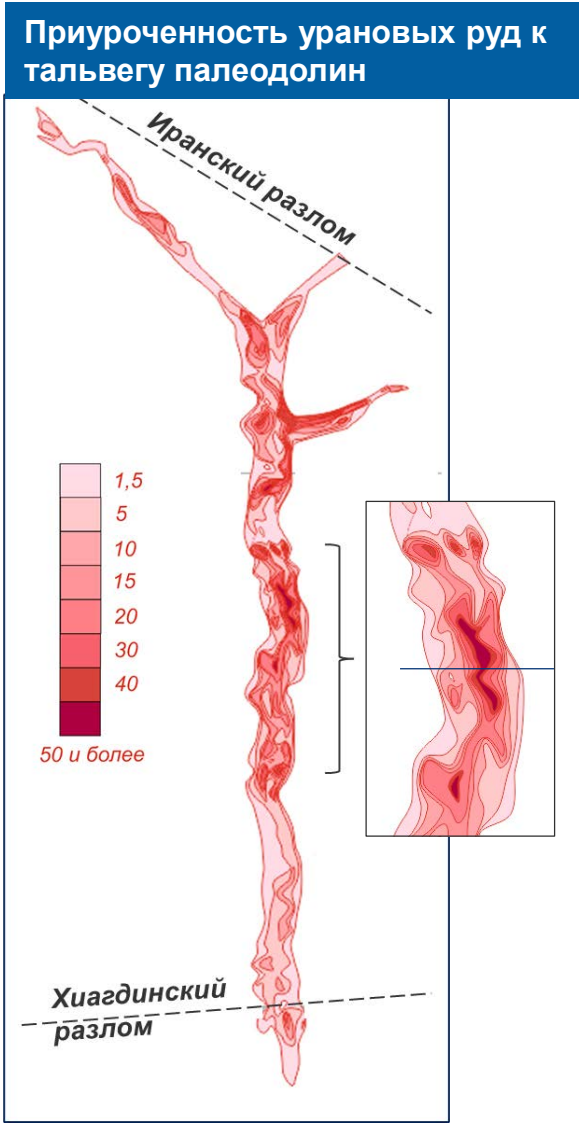
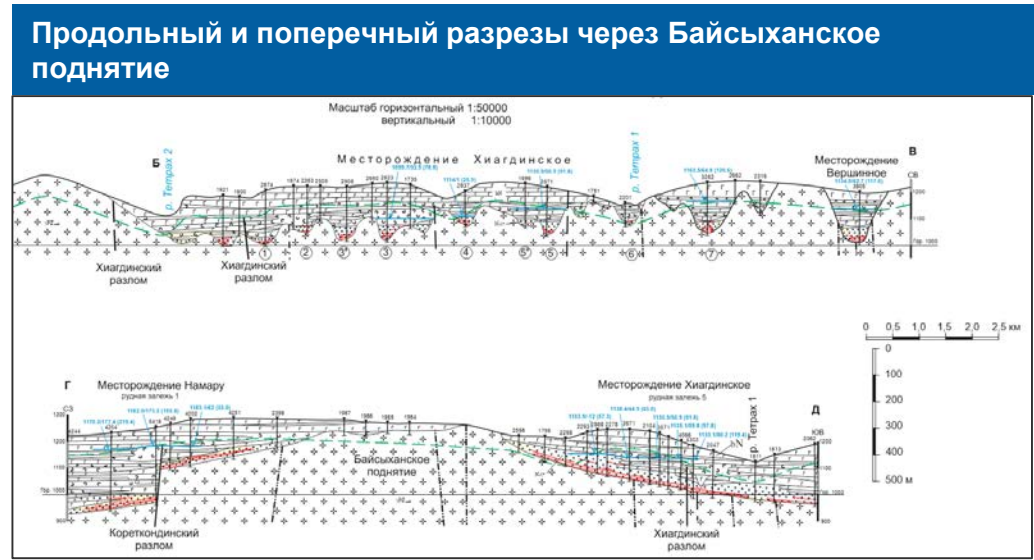
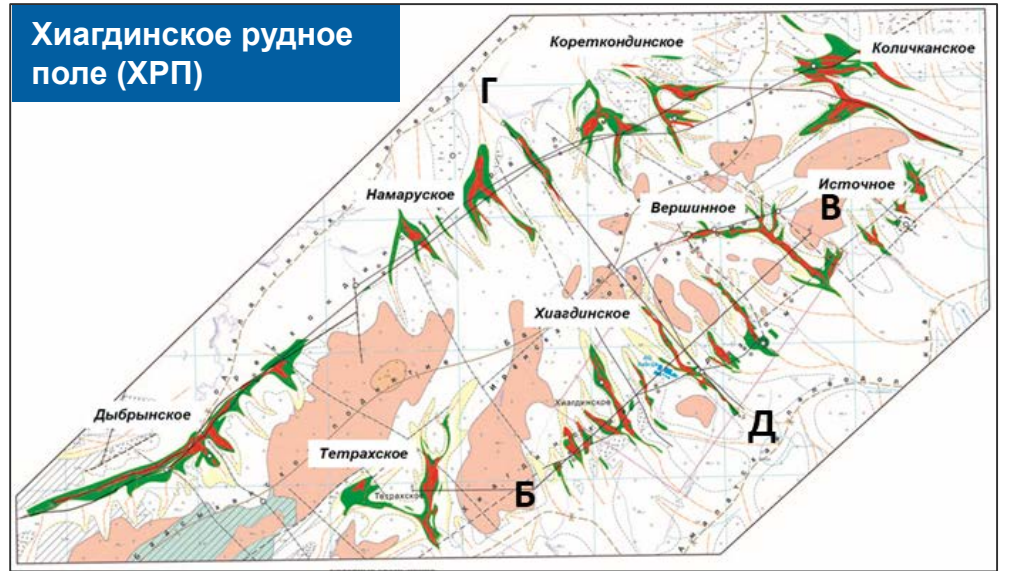
ПРИМЕНЕНИЕ КАРОТАЖА МГНОВЕННЫХ НЕЙТРОНОВ ДЕЛЕНИЯ (КНД-М) НА ОСНОВНЫХ СТАДИЯХ ОСВОЕНИЯ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ХИАГДИНСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ (РЕСПУБЛИКА БУРЯТИЯ)

Гладышев Андрей Владимирович

Генеральный директор АО «ВНИПИпромтехнологии»

Апрель 2025

Геолого-гидрогеологические условия залегания урановых руд на месторождениях ХРП



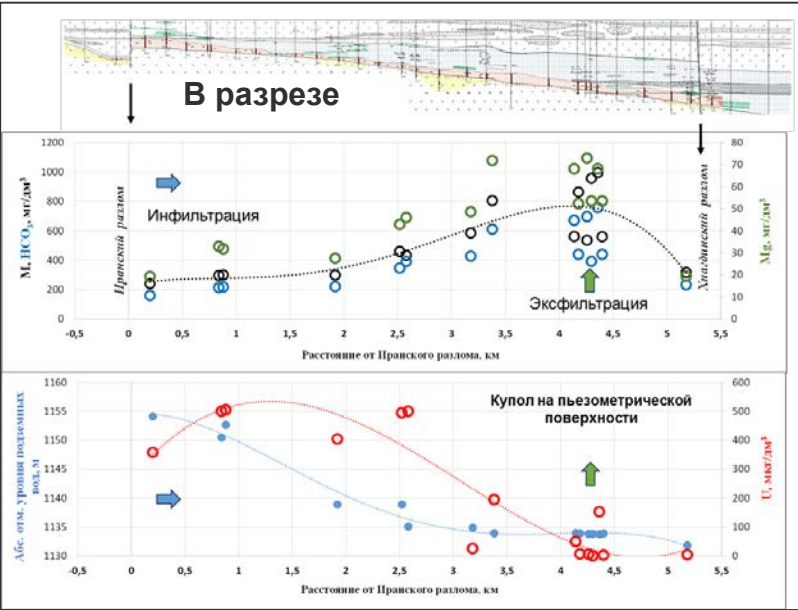
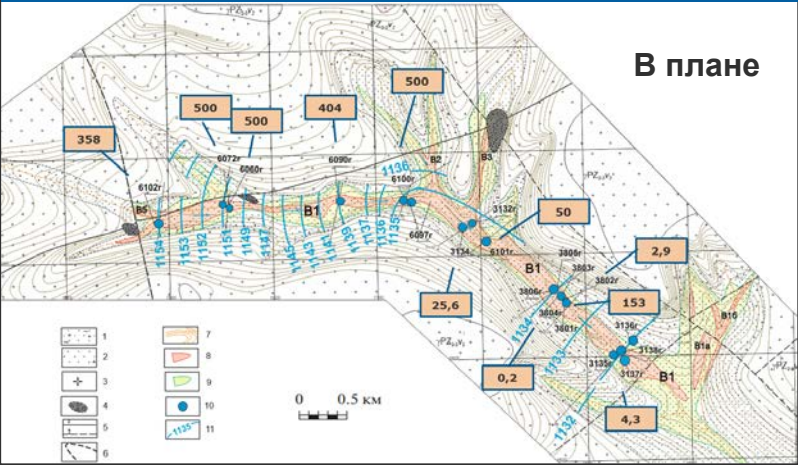


РОСАТОМ
НЕДРА

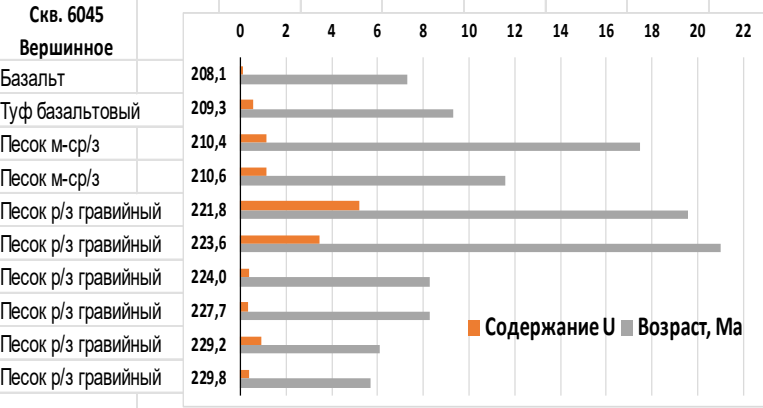
- 1. Близсовременный возраст урановых руд месторождений
Хиагдинского рудного поля, безсульфатный и безкарбонатный
характер минерализации подземных вод и нерудный радон,
поступающий в рудоносный горизонт по тектоническим нарушениям
из гранитного фундамента, вносят погрешности на локальных участках
рудных залежей при оценке вскрытых технологическими скважинами
запасов методом гамма-каротажа. Для повышения достоверности
оценки и учета запасов промышленной категории необходимо
использовать метод прямого определения урана на месте залегания
урановых руд – КНД-М.**

1.1. Близсовременный возраст урановых руд

Современное накопление урана в неподвижном восстановительном геохимическом барьере на месторождении Вершинное



Возраст урановых руд на месторождении Вершинное по U-Pb датированию 5,7 – 21 млн.лет

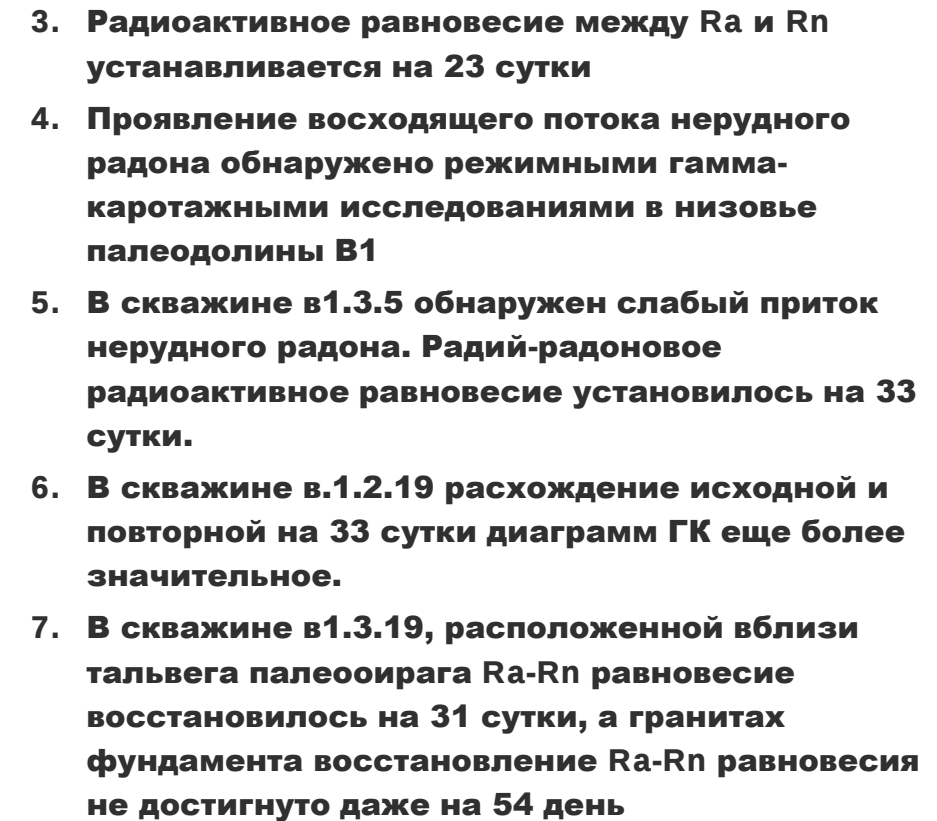
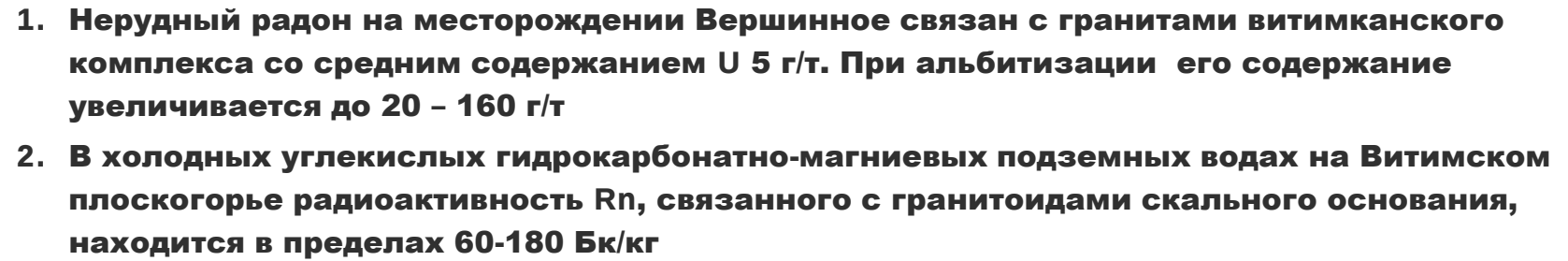


Возраст урановых руд на месторождении Намаруское по U-Pb датированию 6,6 – 22 млн.лет

Таблица 3. Результаты изотопного U-Pb датирования проб из скважин 5455, 5461 и 5468 месторождения Намару								
№ п/п	Глубина отбора образцов, м	$^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$	$\delta^{238}\text{U}$, ‰	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ($\times 10^5$)	$K_{234/238}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$T(^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U})$, млн лет	$T(^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U})$, млн лет
Скважина 5455								
1	306.5	137.649	-1.36	6.68	1.215	21.85	8.0	(8.8)
2	308.3	137.683	-1.12	5.53	1.006	18.99	26.1	(7.6)
3	310.0	137.691	-1.06	5.48	0.997	19.21	22.4	(72.3)
4	314.0	137.699	-1.00	3.85	0.700	19.17	19.8	(10.5)
5	315.0	137.799	-0.28	7.55	1.373	19.38	8.1	(9.6)
Скважина 5461								
6	300.9	137.651	-1.35	5.80	1.056	18.82	12.4	(6.9)
7	303.9	137.598	-1.73	6.82	1.241	19.53	21.5	(18.5)
8	308.0	137.592	-1.78	4.62	0.840	19.10	17.3	(21.0)
9	310.8	137.484	-2.56	7.32	1.332	21.54	6.7	(5.9)
10	311.8	137.514	-2.34	5.01	0.911	19.06	9.3	(9.0)
11	314.5	137.523	-2.28	5.37	0.977	19.18	18.4	(22.9)
12	315.2	137.707	-0.94	6.06	1.103	25.79	13.4	(10.6)
13	316.4	137.688	-1.08	5.78	1.051	31.32	8.0	(8.1)
14	318.3	137.797	-0.29	7.00	1.273	20.59	12.1	(6.6)
15	318.7	137.742	-0.69	8.41	1.529	21.37	10.5	(7.8)
16	320.5	137.778	-0.43	2.62	0.477	19.25	6.6	(3.2)
Скважина 5468								
17	321.8	137.770	-0.49	4.82	0.877	21.97	12.7	(13.3)
18	322.1	137.730	-0.78	5.08	0.924	23.44	10.8	(11.1)
19	322.5	137.786	-0.37	5.70	1.037	22.52	19.6	(20.7)
20	323.2	137.836	-0.01	3.61	0.657	20.61	10.4	(12.0)
21	324.0	137.851	0.10	5.29	0.963	20.12	13.2	(8.5)
22	324.9	137.833	-0.03	8.19	1.489	20.26	7.1	(4.9)

1. Изучение U-Pb изотопного возраста на месторождениях Вершинное, Дыбынское и Намаруское в ИГЕМ РАН показало, что возраст урановых руд изменяется в широком диапазоне – 5,5 – 22 млн.лет, охватывая весь миоценовый период.
2. Такой большой диапазон геохронологии объясняется постоянным привносом в рудную зону современного урана и подвижностью ^{234}U в слабокислой углекислой среде.
3. Отклонения отношений $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ от равновесных, которые для отдельных проб превышают 50%, наряду с существенными вариациями изотопного возраста, свидетельствуют о том, что не было консервации урановых руд с образованием базальтового покрова и ММП и на месторождениях имела место миграция U, в том числе в течение четвертичного периода.
4. Обоеднение легким изотопом ^{235}U нижней зоны залежи может быть связано с воздействием восходящих из фундамента углекислых вод. Воздействие таких вод на урансодержащие породы приводит к преимущественному выщелачиванию легкого ^{235}U .
5. Все это указывает на большую сложность интерпретации результатов изотопных исследований, а, с другой стороны, объясняет неравновесный характер в системе U-Ra

РОСАТОМ
НЕДРА

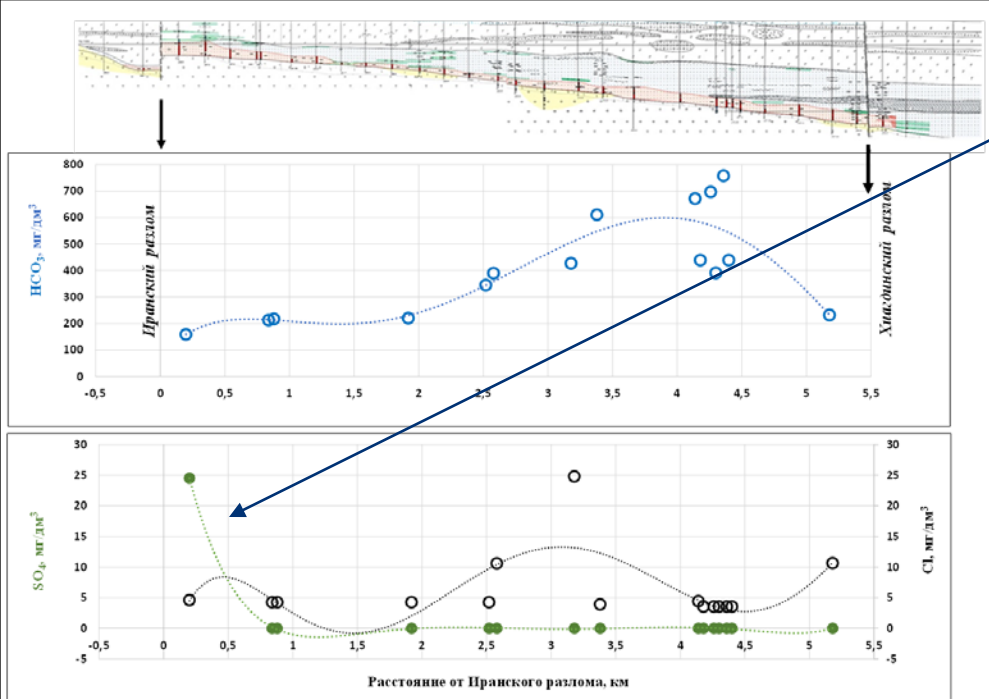


1.3. Безсульфатный и безкарбонатный характер минерализации подземных вод



РОСАТОМ
НЕБРА

Изменение анионного состава в продольном разрезе месторождения Вершинное



1. Уран и радий по разному ведут себя в гидрогеохимической среде.
2. Миграционная способность U зависит от окислительного потенциала (Eh). В сильно восстановительной среде (Eh - 400...-200 мВ0 на месторождениях ХРП он практически неподвижен
3. Миграционная способность Ra зависит от анионного состава подземных вод

4. С сульфатом и карбонатом подземных вод радий образует труднорастворимые соединения. $\text{PP}(\text{RaSO}_4) - 4,25 \cdot 10^{-11}$. $\text{PP}(\text{RaCO}_3) - 5,1 \cdot 10^{-9}$
5. Гидрокарбонатно-магниевые подземные воды на месторождении Вершинное содержат сульфат только в самом верховье палеодолины В1. На всей остальной площади залежи В1 сульфаты отсутствуют.
6. Карбонат-ион также встречается спорадически только на локальных участках залежи
7. Радий хорошо растворим в хлоридной среде. Cl встречен во всех частях залежи в небольшом количестве 3,0 – 14,2 mg/dm^3
8. В гидрогеохимических условиях месторождения Вершинное U неподвижен и только накапливается в восстановительном геохимическом барьере, а Ra в безсульфатной и безкарбонатной среде способен мигрировать в слабо хлоридной обстановке. Это должно отражаться на изменчивости Kpp

Химический состав подземных вод на месторождении Вершинное

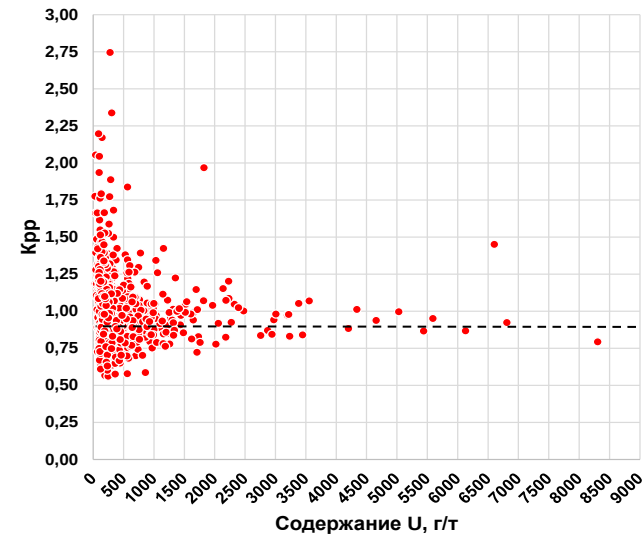
Поло- жение в палеодо- лине В1	Гидро- геологи- ческая сква- жина	Глубина до середины фильт- ра, м	Дата отбора пробы	Форма выра- жения анализа	pH	Анионы					Катионы				U, мк- г/л	Мине- рализа- ция, мг/ дм³
						HCO_3^-	CO_3^{2-}	SO_4^{2-}	Cl^-	Итого	Ca^{2+}	Mg^{2+}	(Na+K) ⁺	Итого		
Верховье	6102	211	2012	мг/дм³	7,2	158,6	0	24,5	4,6	187,8	16,4	19,2	17,0	52,7	358	240
				%-экв		80,0	0	16	4,0	100,0	27	52	21,0	100,0		
	6072	221	2012	мг/дм³	7,3	213,6	6,0	0	4,3	223,8	11,6	32,9	26,5	71,0	500	295
				%-экв		92,0	5,0	0	3,0	100,0	14	63	23,0	100,0		
Централь- ная часть	3803	189	1987	мг/дм³	7,6	695,6	36,0	0	6,0	737,6	60,12	72,92	86,7	219,7	26	957
				%-экв		89,0	9,4	0	1,3	100,0	23	47	30,0	100,0		
	3801	190	1987	мг/дм³	6,8	756,6	0	0	14,2	770,8	64,13	68,05	92,0	224,1	153	995
				%-экв		97,0	0	0	3,1	100,0	25	44	31,0	100,0		
Низовье	3137	230	1987	мг/дм³	7,8	231,9	0	0	10,6	242,5	20,04	19,44	34,5	74,0	4,3	316
				%-экв		93,0	0	0	7,3	100,0	24	39	37,0	100,0		

1.4. Изменчивость коэффициента U-Ra радиоактивного равновесия (K_{рр}) на месторождении Вершинное

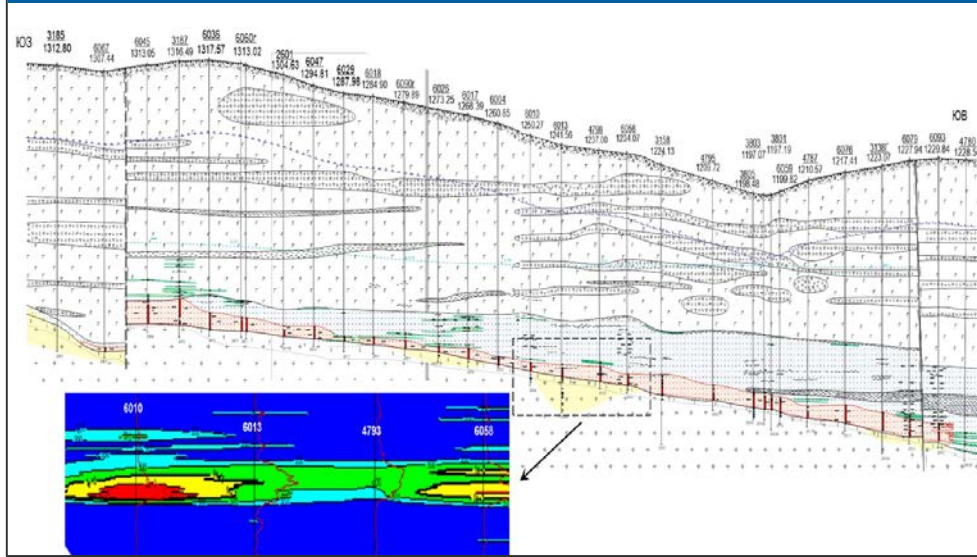


РОСАТОМ
НЕДРА

Изменчивость K_{рр}

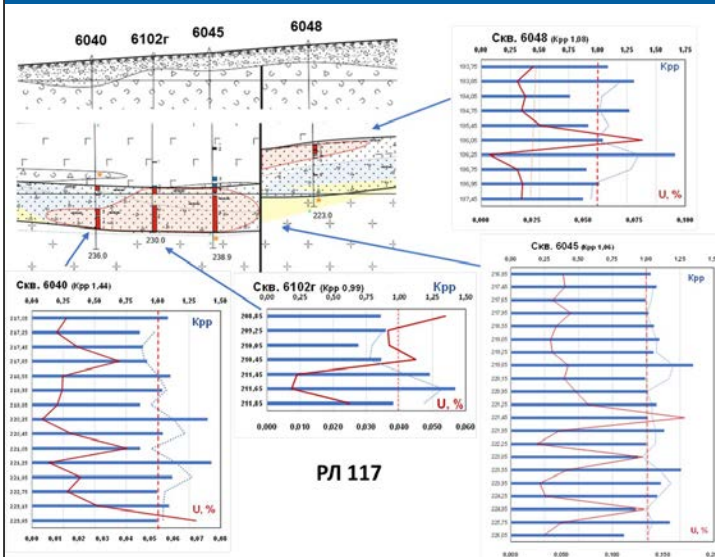


Изменчивость K_{рр} в центре палеодолины В1

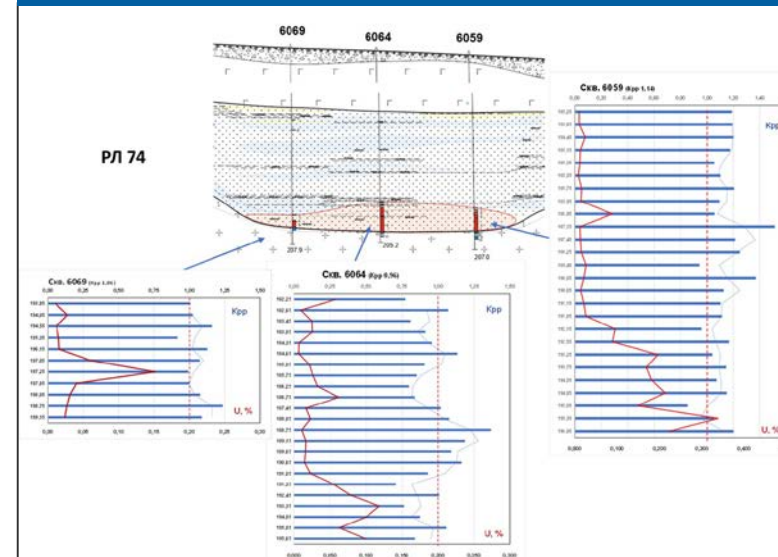


1. Приведенные выше факторы в совокупности влияют на изменчивость K_{рр}, которое изменяется в широком диапазоне – 0,55-2,75.
2. Эти факторы также влияют на поправку за отжатие R_n буровым раствором
3. Соответственно, это влияет на точность подсчета вскрытых технологическими скважинами запасов

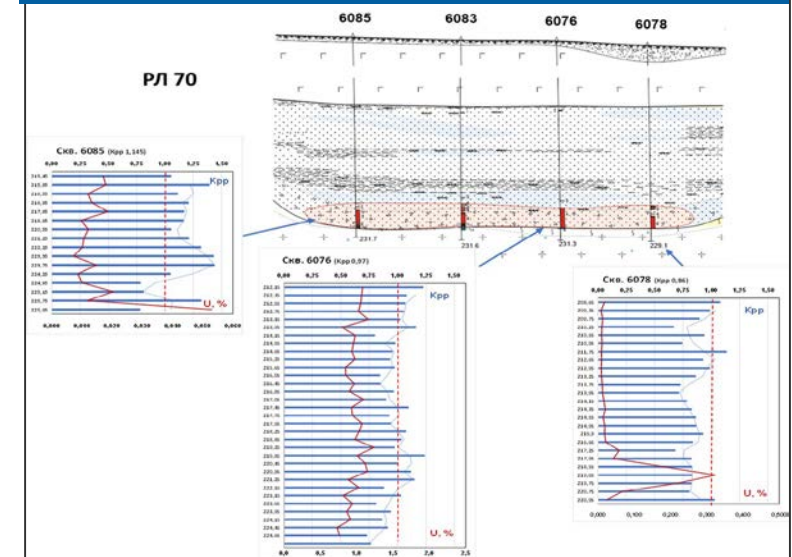
Изменчивость K_{рр} в зоне Иранского разлома



Изменчивость K_{рр} в центре палеодолины В1



Изменчивость K_{рр} в зоне Хиагдинского разлома



1.5. Аппаратурно-методический комплекс для прямого определения урана в рудах методом КНД-М и результаты метрологии



РОСАТОМ
НЕДРА

Генератор ИНГ-12-50-100БТ и нейтронные трубки ВНТЗ-32



Сопоставление параметров аттестуемого сечения по урану с результатами геологического пробования с КНД-М по скважине КПС-1

Скважина	КНД-М					Геологическое опробование				
	от	до	г, м	Cu, %	гС, м.г	от	до	г, м	Cu, %	гС, м.г
6.4.27-К	167,65	175,85	8,2	0,0404	0,3311	167,65	175,15	7,5	0,0633	0,4745
6.1.12-К	127,85	134,65	6,8	0,0131	0,0892	127,95	134,65	6,7	0,0122	0,0819
6.1.12-К	146,95	147,25	0,3	0,0161	0,0048	147,05	147,35	0,3	0,0208	0,0062
6.1.12-К	151,45	152,45	1	0,1096	0,1096	151,25	152,35	1,1	0,1117	0,1228
6.1.12-К	153,55	154,45	0,9	0,0138	0,0124	153,35	154,45	1,1	0,0106	0,0117
6.1.12-К	157,05	158,55	1,5	0,0194	0,0290	157,45	158,95	1,5	0,0144	0,0215
6.2.15-К	120,25	121,65	1,3	0,0133	0,0174	120,15	121,65	1,5	0,0169	0,0254
6.2.15-К	122,05	123,85	1,8	0,0281	0,0506	122,05	123,85	1,8	0,0367	0,0660
6.2.15-К	123,85	124,85	1	0,1327	0,1327	123,85	124,85	1	0,1094	0,1094
6.2.15-К	124,85	130,35	5,5	0,2221	1,2217	124,85	130,35	5,5	0,1975	1,0860
Сумма			28,3		1,9986			28,0		2,0056
Среднее			2,83	0,0706	0,1999			2,80	0,0716	0,2006
Среднеквадратическая погрешность определения г (м), Cu (%) и гС (% отн.)								0,17	0,0095	15,8 %
t – статистика				t _{кр.} ⁽¹⁾ = 2,26 для P = 0,95; t _{кр.} ⁽²⁾ = 3,25 для P = 0,99				0,33	0,30	0,42
Относительное расхождение средних значений по отношению к ГО, %								1,1	–1,4	–0,3

Сопоставление параметров аттестуемого сечения по урану с результатами геологического пробования с КНД-М по скважине КПС-1

Дата и номер измерения	КНД-М (КПС-1)			Геологическое опробование (КПС-1)		
	г, м	С _U , %	гС _U , м.г	г, м	С _U , %	гС _U , м.г
Сопоставление для сечения						
20.04.2021-1	4	0,0423	0,1694	3,9	0,0422	0,1646
20.04.2021-2	4	0,0401	0,1605	3,9	0,0422	0,1646
28.06.2021-1	4	0,0415	0,1661	3,9	0,0422	0,1646
28.06.2021-2	4	0,0397	0,1587	3,9	0,0422	0,1646
04.08.2021-1	3,9	0,0436	0,1700	3,9	0,0422	0,1646
13.09.2021-1	3,9	0,0407	0,1588	3,9	0,0422	0,1646
13.09.2021-2	3,9	0,0423	0,1651	3,9	0,0422	0,1646
Сумма	27,70		1,1485	27,30		1,1522
Среднее	3,96	0,0415	0,1641	3,90	0,0422	0,1646
Среднеквадратическое расхождение в определении г (г), С _U (%) и гС _U (г отн.)				±0,05	±0,001	±1,93 %

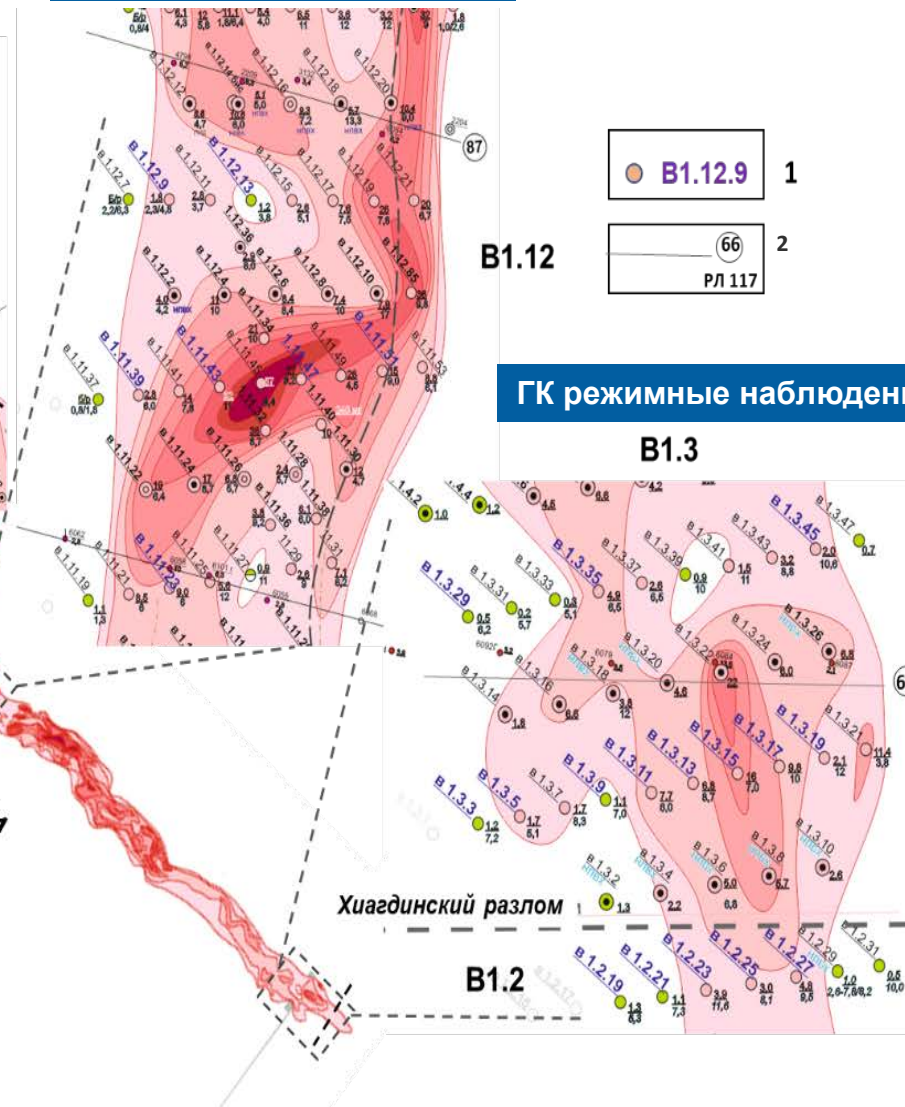
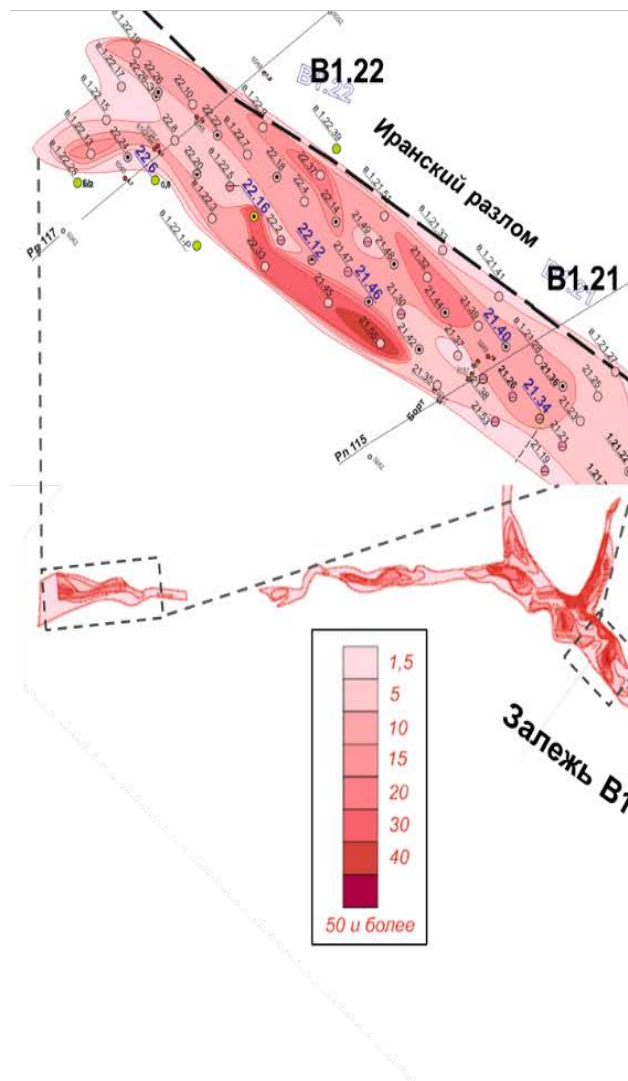
Сравнение технических характеристик аппаратурных комплексов

Компания (институт)	Разраб отчик	Прибор	Ресурс работы ИГН, ч	Диаметр скважинного прибора, мм	Скорость каротажа, м/ч	Определяемые параметры
Los Alamos National Laboratory	США	PFN	250	76	30	U (КНД)
ВНИИГИС	Россия	КНД-53	30	53	30	U (КНД) Экв. - Ra (ГК)
ВНИИА	Россия	АИНК-60	30	60	45	U (КНД) Экв. - Ra (ГК)
ВНИИА	Россия	АМК – АИНК-49	250	49	60	U (КНД) Экв. - Ra (ГК) (ИННК)

Эксплуатационные блоки, на которых проведены исследования на разных стадиях отработки залежи В1 месторождения Вершинное

КНД-М при вскрытии участка залежи

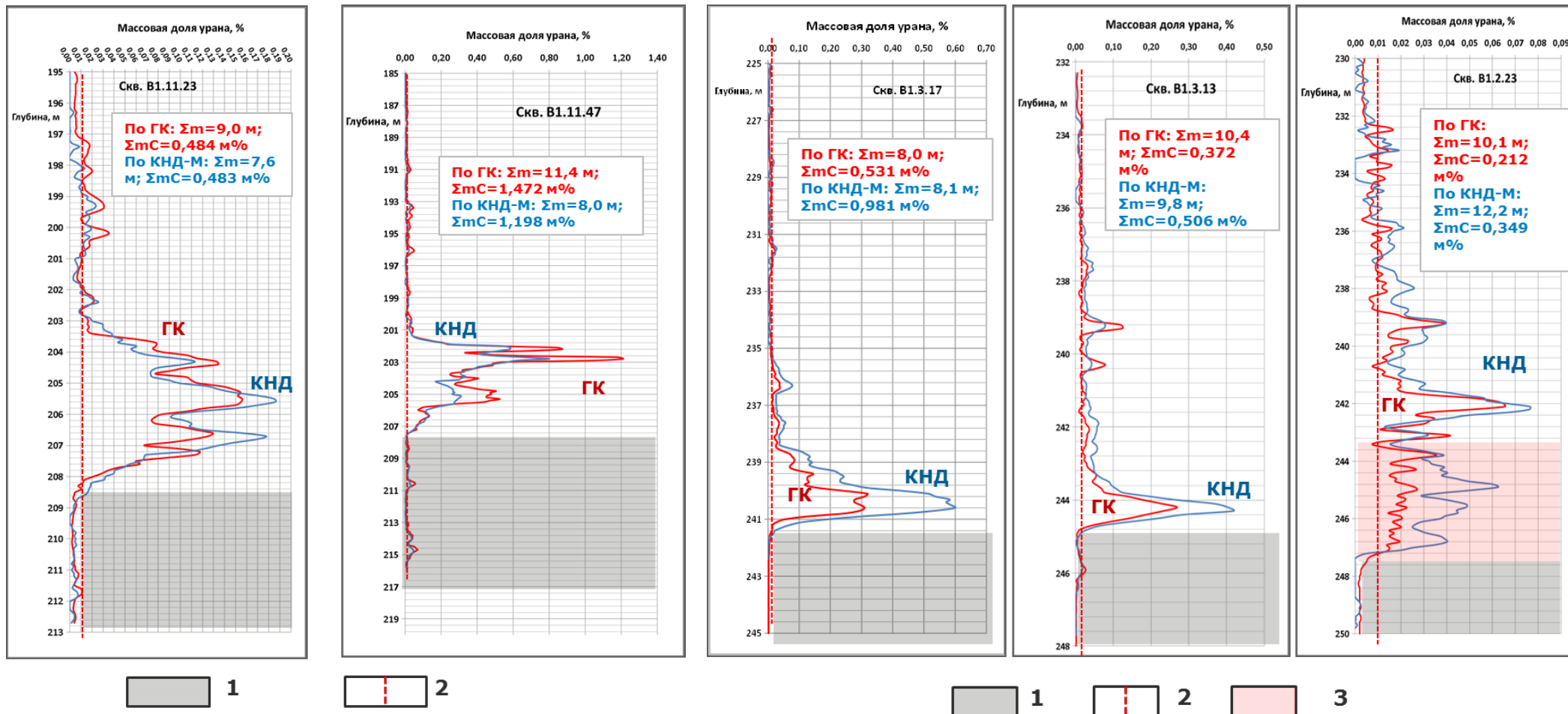
КНД-М при сгущении сети



ГК режимные наблюдения

Выполнены комплексные геофизические исследования в скважинах – ГК + КНД-М

Незначительные расхождения рудных параметров в верхней и нижней частях Залежи В1 и значительные отклонения данных ГК от КНД-М в ее нижней части в области восстановительного геохимического барьера и проявления нерудного радона





РОСАТОМ
НЕДРА

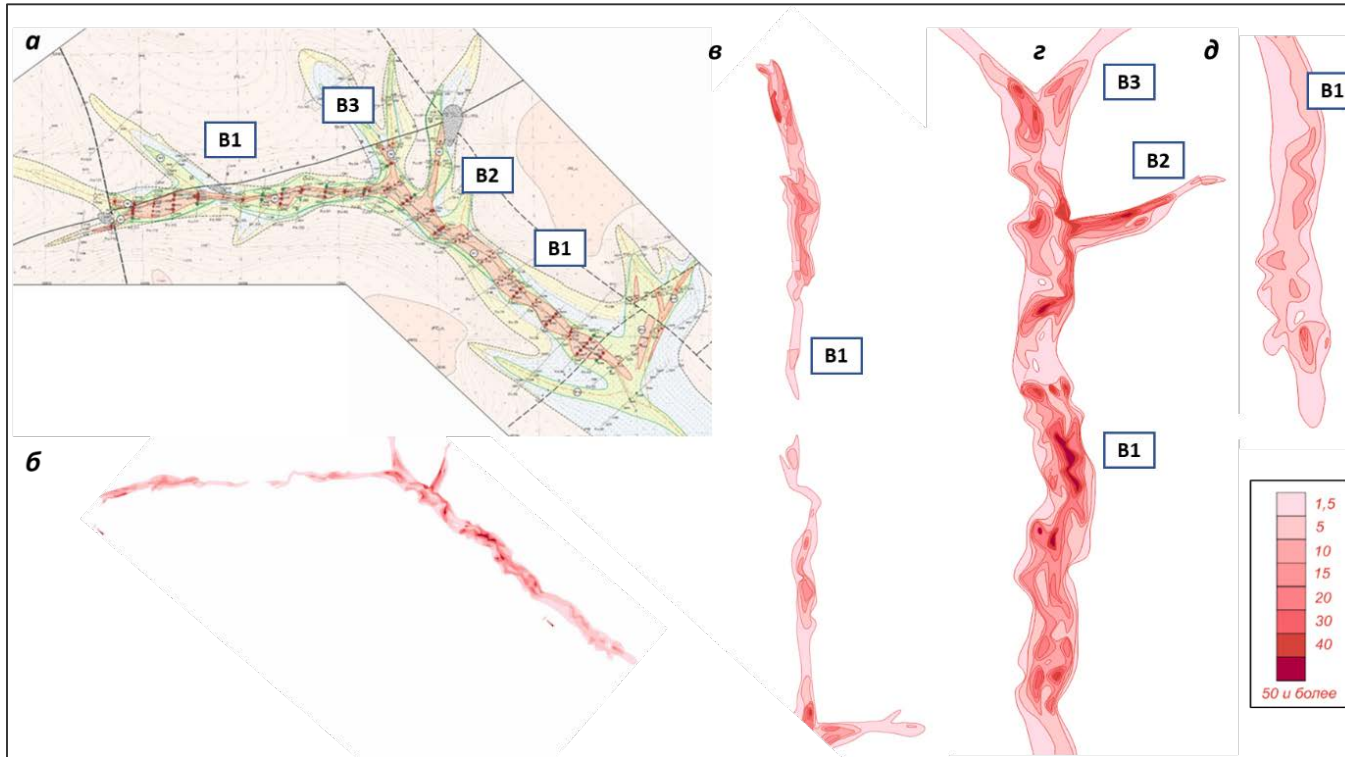
2. КНД-М на стадии отработки урановых рудных залежей СПВ позволяет уточнять внутреннее строение урановых рудных залежей, выявлять зоны выщелоченного из руд и техногенно переотложенного урана, эффективно применять способы интенсификации извлечения урана из недр методом сгущения сети технологических скважин. Метод КНД-М на этой стадии эффективен для контроля отработки урановых рудных залежей СПВ.

Контрастное и однородное распределение урана в рудах

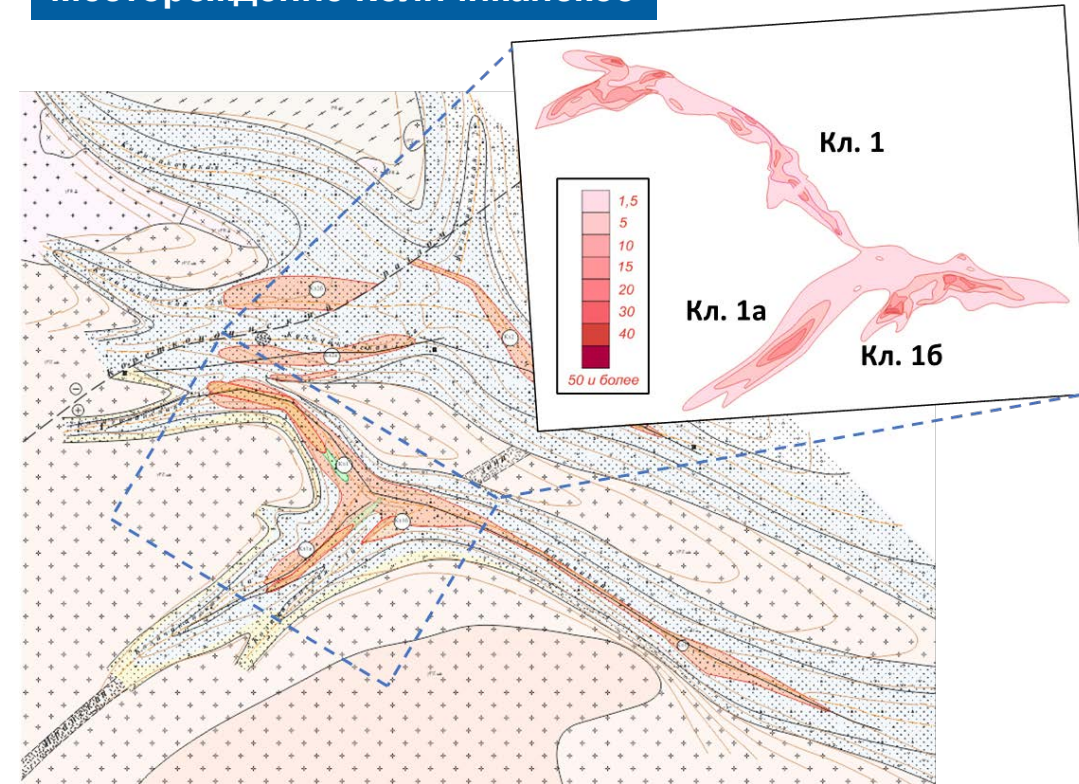


РОСАТОМ
НЕДРА

Месторождение Вершинное



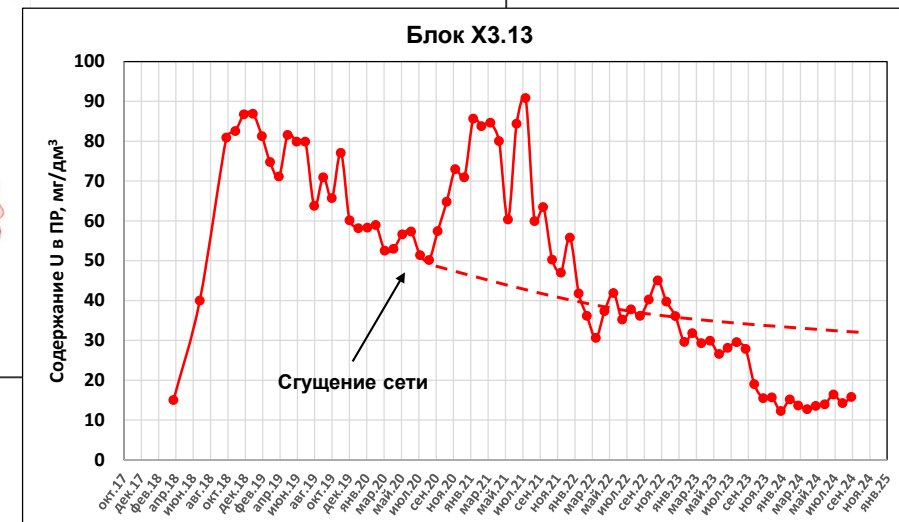
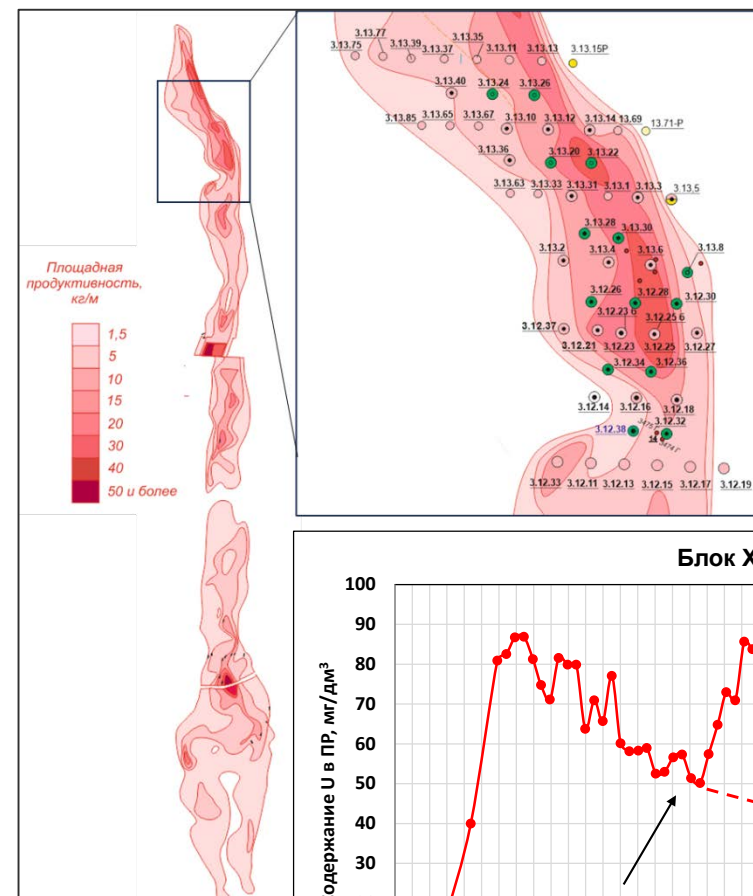
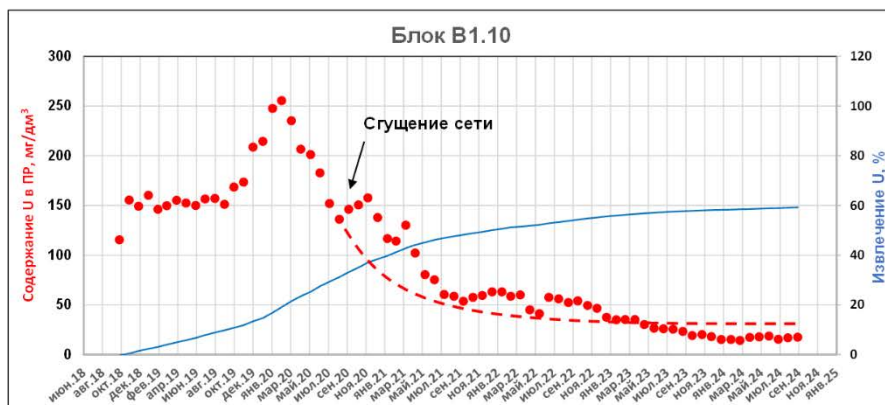
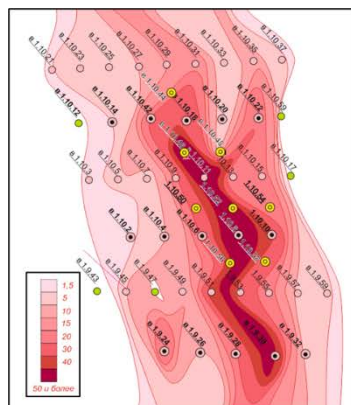
Месторождение Количиканское



1. При контрастном распределении урана в рудах целесообразно проводить сгущение сети технологических скважин
2. Это позволяет бедные и богатые руды отрабатывать почти одновременно

РОСАТОМ
НЕДРА

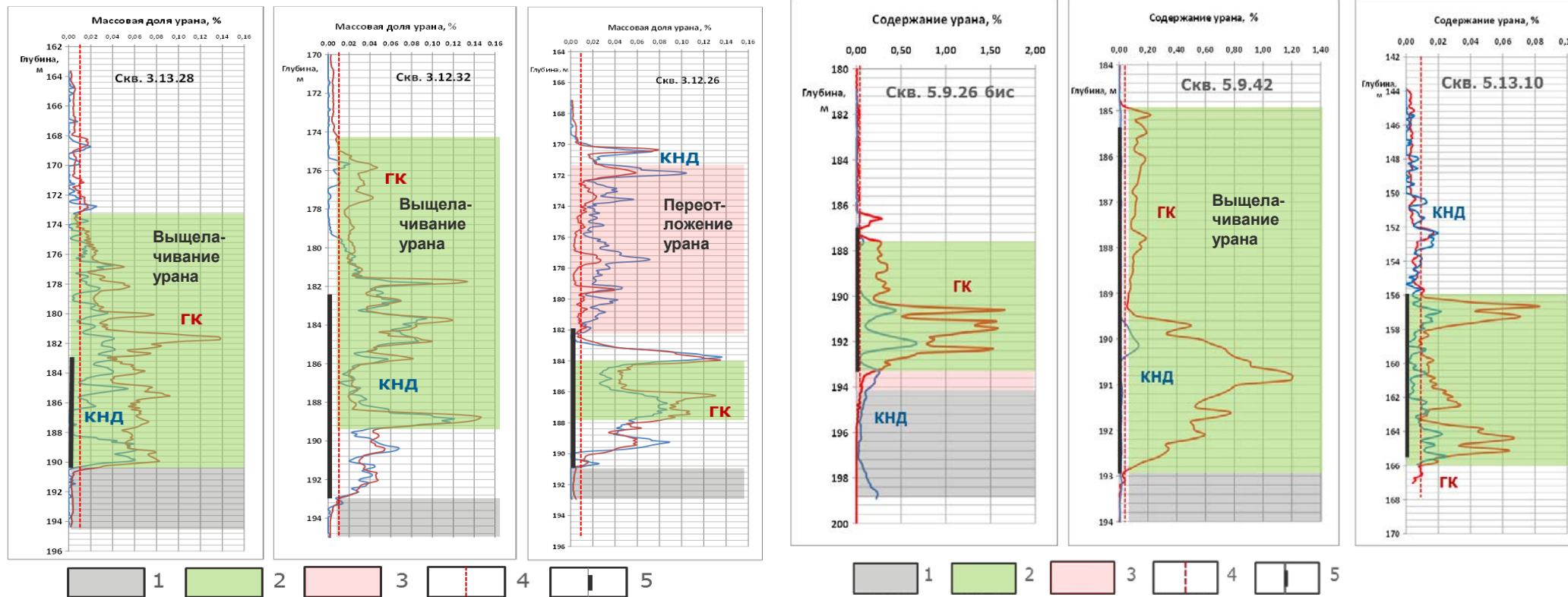
Месторождение Хиагдинское



Результаты КНД-М во время сгущения сети технологических скважин



РОСАТОМ
НЕДРА



1. Во время сгущения сети в технологических скважинах выполняется КНД-М для заверки отработываемых запасов урана, выявления зон извлечения и техногенного переотложения урана;
2. Реконструкция исходных содержаний урана по ГК на стадии отработки урановых рудных залежей СПВ в сравнении с остаточными содержаниями урана методом КНД-М позволяет оценивать степень извлечения урана из недр и выявлять участки техногенного переотложения урана



РОСАТОМ
НЕДРА

3. Применение на завершающей стадии СПВ

геотехнологического математического моделирования (ГТММ) позволяет выявлять и локализовать поиски целиков остаточных урановых руд, минимизировать объемы бурения контрольных скважин и применять эффективные технологии доработки запасов. Верификация математических моделей методом КНД-М повышает достоверность ГТММ. КНД-М на этой стадии дает возможность количественно оценивать остаточные содержания и степень извлечения урана из руд. В целом, комплекс разработанных методов повышает полноту освоения недр.

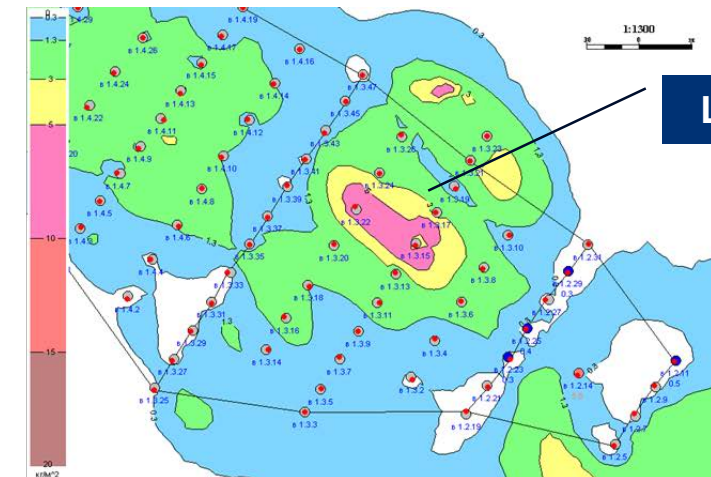
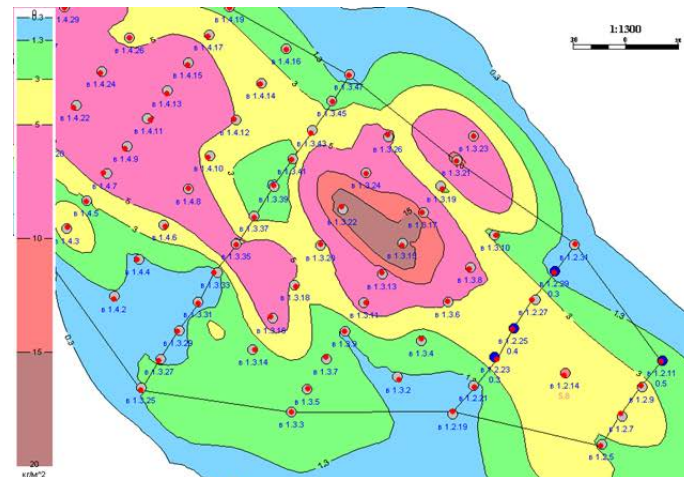
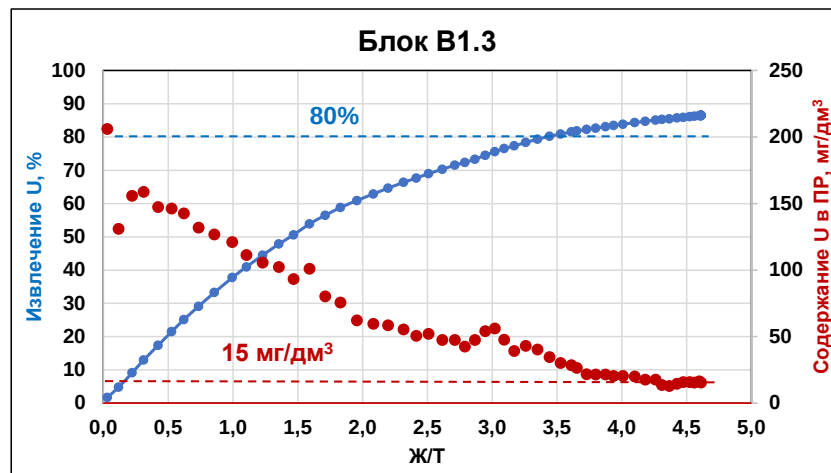
Геотехнологическое математическое моделирование (ГТММ) (Комплекс компьютерных программ СТИ НИЯУ МИФИ)



РОСАТОМ
НЕБРА



- ✓ ГТММ на завершающей стадии СПВ урана позволяет выявлять и локализовать поиски целиков неотработанных урановых руд
- ✓ Сокращать объемы контрольного бурения
- ✓ Но обладает большими погрешностями из-за недостатка знаний о свойствах геологической среды



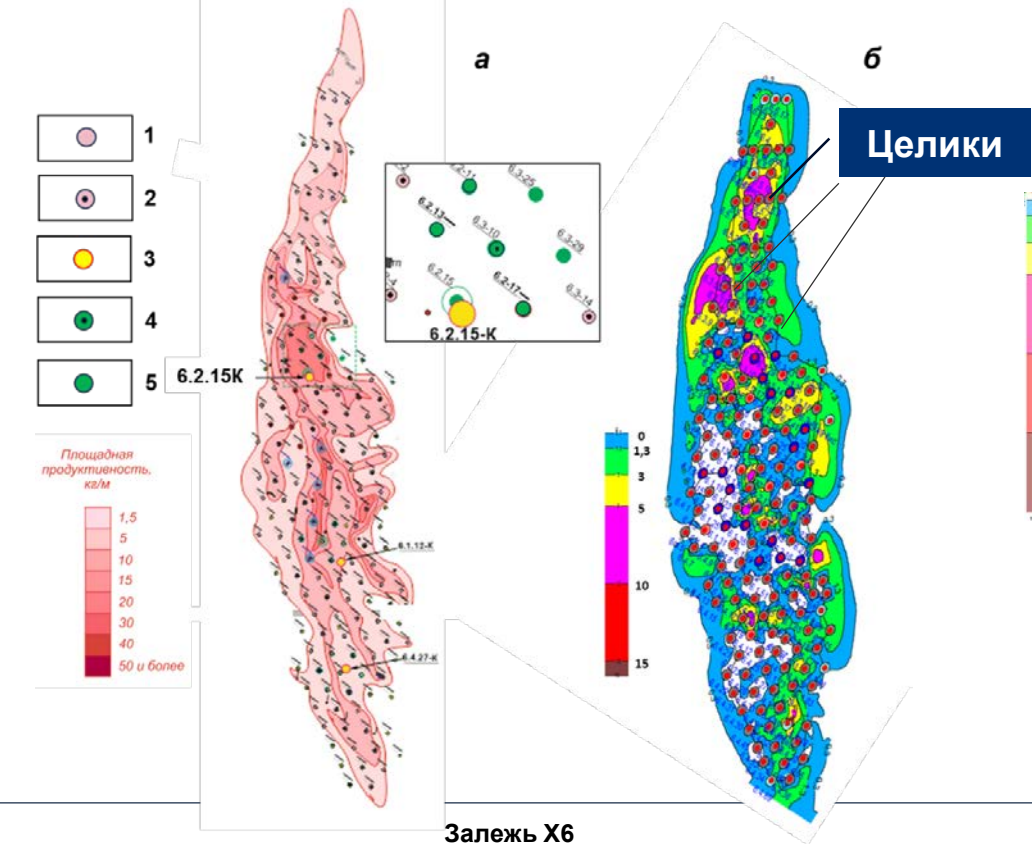
Целик

Доработка запасов урана Залежи Х6 месторождения Хиагдинское

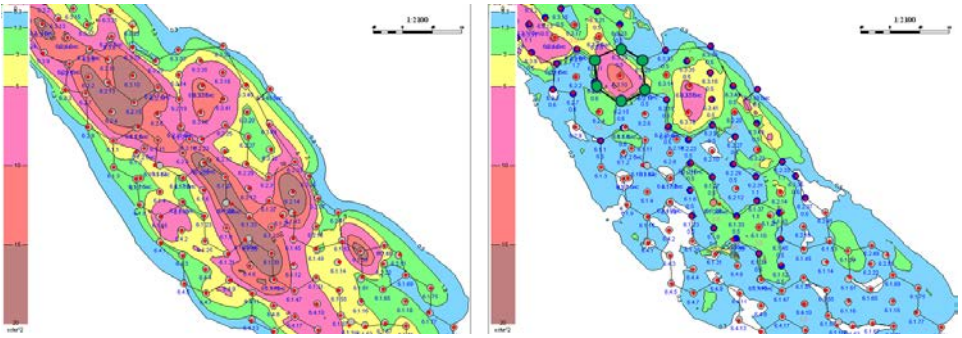


РОСАТОМ
НЕБРА

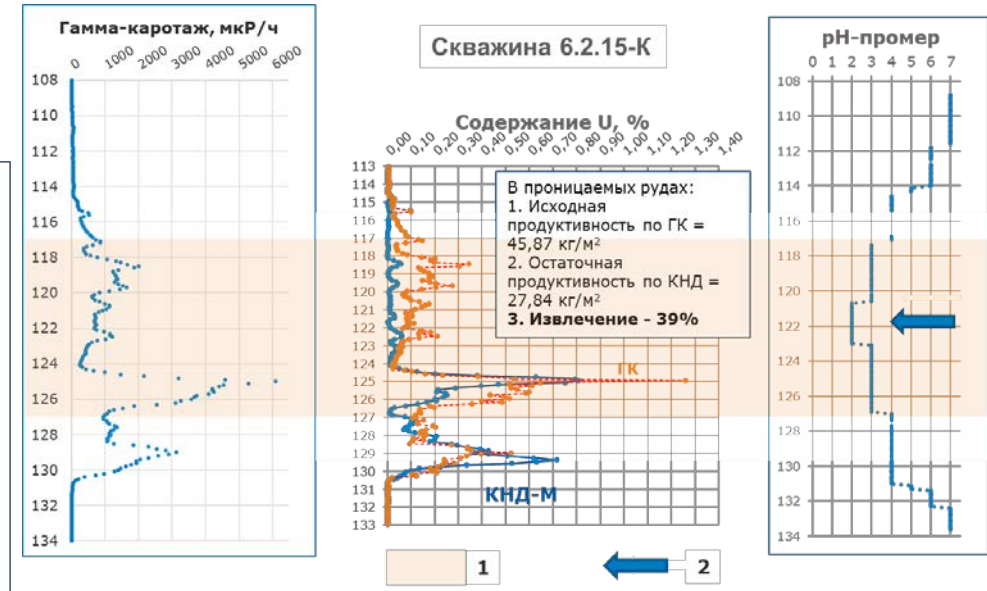
Залежь Х6 месторождения Хиагдинское



Мероприятия по доработке запасов



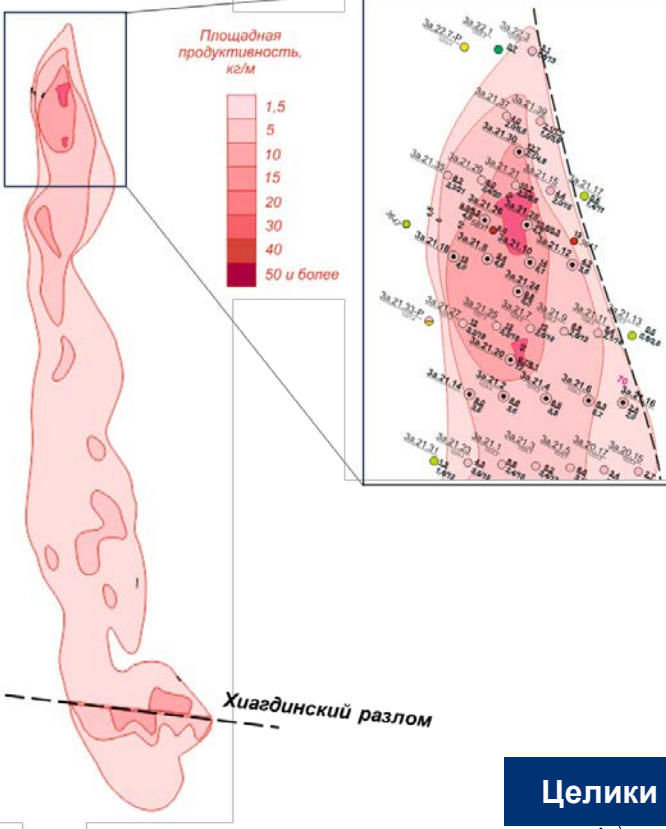
Верификация ГТММ методом контрольного бурения



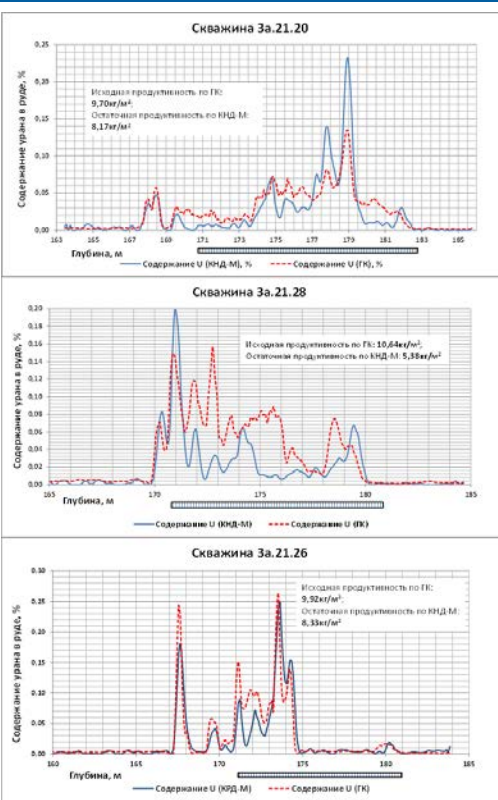
- ✓ Методом ГТММ выявляются целики неотработанных урановых руд
- ✓ Методом КНД-М в контрольных скважинах выполняется заверка модели ГТММ
- ✓ Разрабатываются мероприятия отработки целиков
- ✓ В рассматриваемом примере объем дополнительно добытого урана – 37,7 т

Доработка запасов урана Блока Х3а.21 Залежи Х3а месторождения Хиагдинское

Исходная продуктивность Залежи Х3а

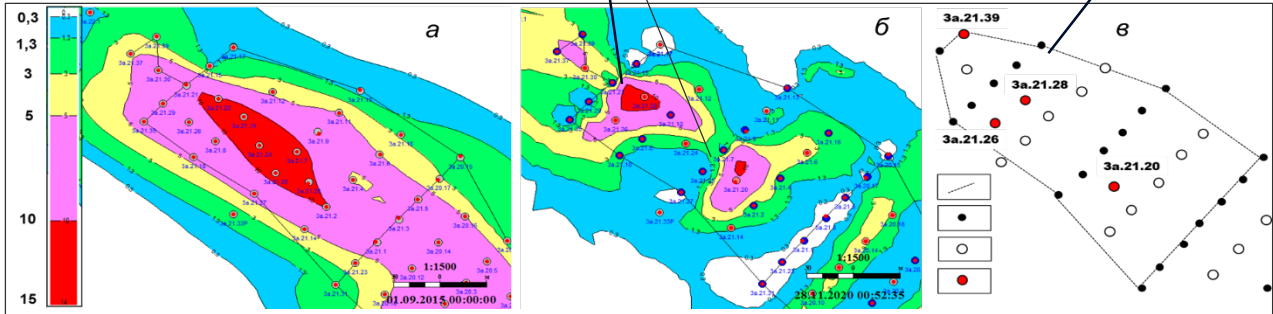


Верификация ГТММ

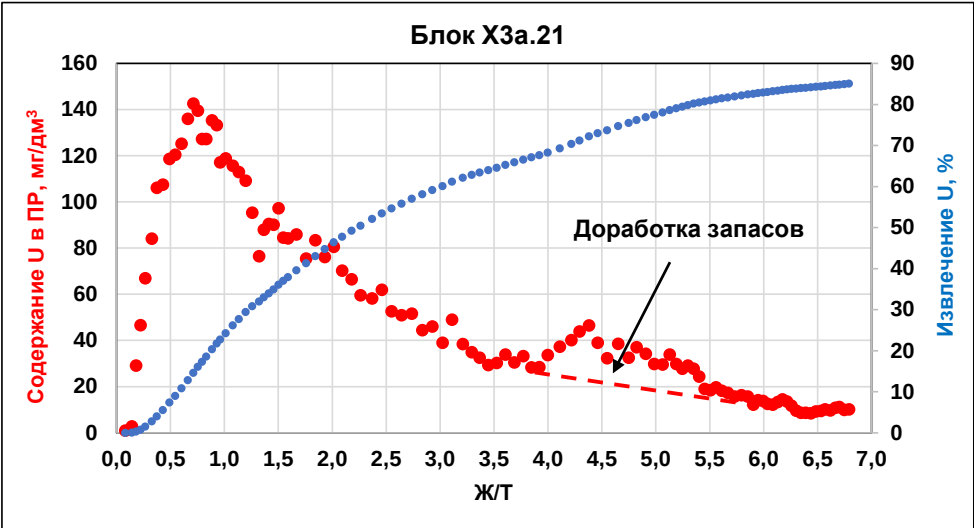


Целики

Дополнительно пробуренные скважины



- ✓ Методом ГТММ выявляются целики неотработанных урановых руд
- ✓ Методом КНД-М в дополнительно пробуренных скважинах выполняется заверка модели ГТММ
- ✓ Используется метод сгущения сети технологических скважин для отработки целиков
- ✓ В рассматриваемом примере объем дополнительно добытого урана – 17,6 т



1. В радиологических условиях урановых месторождений Хиагдинского рудного поля надежным методом прямого определения содержаний урана в рудах является каротаж нейтронов мгновенного деления (КНД-М)
2. Реконструкция исходных содержаний урана по данным гамма каротажа (ГК) в сочетании с КНД-М позволяет оценивать степень извлечения урана из недр
3. Геотехнологическое математическое моделирование (ГТММ) позволяет выявлять и локализовать поиски целиков урановых руд
4. КНД-М используется для верификации результатов ГТММ
5. Использование комплекса методов – ГТММ + ГК + КНД-М – на основной и заключительной стадиях отработки урановых рудных залежей СПВ позволяет применять методы интенсификации СПВ и дорабатывать остаточные запасы урана в целиках

Спасибо за внимание

Гладышев Андрей Владимирович

Генеральный директор АО «ВНИПИпромтехнологии»

22.04.2025

