

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Федеральное бюджетное учреждение науки Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи

**АРТАМОНОВА Светлана Юрьевна**

**ГЕОТЕХНОГЕННЫЕ СИСТЕМЫ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ НА  
ТЕРРИТОРИИ ЯКУТИИ (1974-1987 гг.): геоэкологические модели и особенности  
переноса радионуклидов и сопутствующих элементов**

**25.00.36 – Геоэкология**

Диссертация на соискание ученой степени доктора  
геолого-минералогических наук

Томск -2015 г.

<b>ОГЛАВЛЕНИЕ</b>		Стр.
	Введение.	3
Глава 1.	Методика исследований.	31
Глава 2.	Особенности геологической среды объектов ПЯВ	48
2.1.	Район ПЯВ «Кристалл» и «Кратон-3».	49
2.2.	Район группы ПЯВ на Среднеботуобинском нефтегазоконденсатном месторождении	65
2.3.	Район ПЯВ «Кратон-4»	77
2.4.	Выводы. Влияние особенностей геологической среды на развитие геотехногенных систем ПЯВ.	86
Глава 3.	Фоновые содержания радионуклидов и микроэлементов в компонентах природной среды районов исследования	90
3.1.	Естественные радионуклиды U, Th, K и микроэлементы	90
3.1.1.	На южном склоне Анабарской антеклизы в районе ПЯВ «Кристалл» и «Кратон-3»	90
3.1.2.	Район группы ПЯВ на Среднеботуобинском нефтегазоконденсатном месторождении на северной части Непско-Ботуобинской антеклизы	102
3.1.3.	Район ПЯВ «Кратон-4»	107
3.2.	Фоновые уровни содержания техногенных радионуклидов	110
3.3.	Выводы	115
Глава 4.	Основные характеристики объектов ПЯВ и расчетные модели механического разрушения вмещающей геологической среды	117
4.1.	Классификация ПЯВ.	117
4.2.	Аварийный ПЯВ «Кристалл» и расчетная модель механического воздействия на геологическую среду.	120
4.3.	Аварийный ПЯВ «Кратон-3» и расчетная модель механического воздействия на геологическую среду.	125
4.4.	Камуфлетный ПЯВ «Кратон-4» и расчетная модель механического воздействия на геологическую среду.	131
4.5.	Группа ПЯВ на территории Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения	133
4.6.	Выводы	135
Глава 5.	Техногенная флюидопроницаемая геоструктура «ослабленная зона вокруг боевой скважины ПЯВ», как основной проводник радионуклидов на поверхность земли	137
5.1.	Проявление ослабленной зоны вокруг боевой скважины на поверхности земли и состояние многолетней мерзлоты	137
5.2.	Ослабленная зона вокруг боевой скважины на примере ПЯВ «Кристалл» по данным геофизического зондирования методом переходных процессов	145
5.3.	Радиогеохимические индикаторы переноса подземных флюидов по системе «полость взрыва - ослабленная зона вокруг боевой скважины – поверхность земли»	156

5.3.1.	Площадка ПЯВ «Кристалл»	156
5.3.2.	Площадка ПЯВ «Кратон-3»	168
5.3.3.	Площадки 7-ми ПЯВ на территории Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения	175
5.4.	Выводы	187
Глава 6.	Естественные флюидопроницаемые геоструктуры: тектонические разломы, водоносные горизонты, контактные зоны магматических тел, как проводники подземной радиоактивности.	189
6.1.	Флюидопроницаемая геоструктура тектонического разлома на примере района ПЯВ «Кратон-3» по данным геофизического зондирования методом переходных процессов	189
6.2.	Поверхностное радиоактивное загрязнение ландшафтов. Доказательства просачивания техногенных радионуклидов из недр по зоне тектонического разлома в районе ПЯВ «Кратон-3» (результаты радиоэкогехимического изучения)	203
6.3.	Флюидопроницаемая геоструктура подземных водоносных горизонтов как проводник подземной радиоактивности при взаимодействии двух геотехногенных систем: объекта ПЯВ «Кристалл» и сверхглубокого карьера кимберлитовой трубки «Удачная»	222
6.4.	Естественные флюидопроницаемые геоструктуры на Среднеботуобинском нефтегазоконденсатном месторождении	225
6.5.	Радиоэкогехимические индикаторы выхода подземных радиоактивных флюидов в районе ПЯВ «Кратон-4»	231
6.6.	Выводы	247
Глава 7.	Геоэкологические модели геотехногенных систем ПЯВ на территории Якутии	250
Глава 8.	Геоэкологический мониторинг и пути снижения рисков радиоактивного загрязнения в районах ПЯВ	263
	Заключение	275
	Список литературы	278
	ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Письмо Министерства охраны природы Республики Саха (Якутия) в диссертационный совет о практическом применении результатов исследований соискателя Артамоновой С.Ю.	
	ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Результаты жидкостно-сцинтилляционной спектрометрии поверхностных вод района ПЯВ «Кратон-3»	
	ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Результаты интерпретации данных электромагнитных зондирований методом ЗМПП (кривые кажущегося сопротивления и геоэлектрические модели).	

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность исследований.** Одной из важных проблем геоэкологии является распространение радиоактивных элементов в среде обитания человека [Осипов, 1993, Рихванов, 2009]. В ходе выполнения Государственной программы СССР №7 «Ядерные взрывы для народного хозяйства» с 15.01.1965 г. по 06.09.1988 г. было произведено 124 ПЯВ с подрывом 135 зарядов ядерных взрывных устройств (ЯВУ) [Андрюшин др., 2000, Мирные..., 2001, с. 35Б, ] общей мощностью 1783.69 кт в тротиловом эквиваленте (ТЭ) «Мирный» - этот термин был предложен в связи с народнохозяйственным (невоенным) назначением взрывов.

Поиск путей полезного приложения ядерно-взрывных технологий в народном хозяйстве был начат вместе со становлением атомной эпохи как в США, так и СССР. Мощь и силу ядерных взрывов хотелось применить не только для разрушения, но и для созидания. В 1966 г. были изложены идеи использования энергии ядерных взрывов для народнохозяйственных и исследовательских целей [Из поколения побелителей, 2008], а именно:

- 1) ПЯВ может продуцировать мощные магнитные поля напряженностью в сотни млн. эрстед в объемах  $1 \text{ м}^3$ , что можно использовать для индукционного ускорения элементарных частиц (как ускорители);
- 2) ПЯВ для плутониевого и тритиевого бридинга (производства)
- 3) для повышения нефтеотдачи месторождений, для создания искусственных месторождений алмазов и других сверхтвердых соединений;
- 4) строительство каналов, плотин и т.п.
- 5) при запуске ракет за счет энергии ПЯВ (взрыволет)
- 6) как сигналы для установления контакта с внеземными цивилизациями и т.д. и т.п..

которые легли в основу Программы №7.

Большая часть мирных ПЯВ - 85 общей мощностью 758,7 кт в ТЭ была произведена на территории России (табл.1), из них 51 взрыв – в пределах криолитозоны на севере и северо-востоке России в условиях таежных и тундровых ландшафтов криолитозоны.

Всего 39 взрывов были проведены в качестве источников волн для глубинного сейсмозондирования по заказу Министерства геологии СССР; 41 – для создания подземных емкостей и хранилищ; 21 – для интенсификации добычи нефти и газа; 6 – для экскавационных экспериментов; 5 – для ликвидации аварийных газовых фонтанов; 4 – для образования провальных воронок; 4 – для захоронения вредных промышленных стоков и радиоактивных отходов; 2 – для дробления руды при ее подземной добыче; 1 – для

Таблица 1. Распределение по регионам СССР количества ПЯВ народно-хозяйственного назначения, проведенных за пределами спецполигонов [Мирные..., 2001]

Регион	Число испытаний
Европейская часть РСФСР	48
Азиатская часть РСФСР	37
Казахская ССР	15
Украинская ССР	2
Узбекская ССР	2
Туркменская ССР	1

предупреждения внезапных выбросов угольной пыли и метана на угольных шахтах; 1 – для создания плотины хвостохранилища путем рыхления породы (рис.1,2). По другому подсчету: было произведено 116 мирных ПЯВ с использованием 124-х ядерных зарядов общей мощностью 1700 кТ в тротиловом эквиваленте (ТЭ) [Адамский и др., 2002]. Согласно Яблокову А.В. [Яблоков, 2003] было произведено вообще 169 мирных ПЯВ, в ходе которых было взорвано 173 ЯВУ (табл.2). Расхождение данных о количестве ПЯВ – это одно из следствий былой секретности программы и разных способов подсчета (по количеству ЯВУ или по количеству взрыва -события).

Таблица 2. Распределение ПЯВ по реализованной мощности ядерного заряда, кт в ТЭ [Яблоков, 2003]

	Мощность заряда, кт в ТЭ							Всего количество ПЯВ
	0.01-0.1	0.2-0.9	1-10	11-20	21-49	50-100	>100	
США	1	0	8	7	7	4	2	29
СССР	4	7	106	29	9	13	5	173
Всего	5	7	114	36	16	17	7	202

Согласно этих данных наиболее часто проводили ПЯВ вне зоны спецполигонов в начале 1980-х годов – до 11 ПЯВ в 1984 г. Среди мирных ПЯВ преобладали взрывы мощностью до 10 кт в ТЭ, на втором месте взрывы мощностью примерно 20 кт в ТЭ.

Первый в СССР ПЯВ «Чаган» мощностью 140 кт в ТЭ был произведен в 15 января 1965 г. для создания водохранилища, последний «Рубин-1» мощностью 8.5 кт в ТЭ для сейсмозондирования Земли – 6 сентября 1988 г.

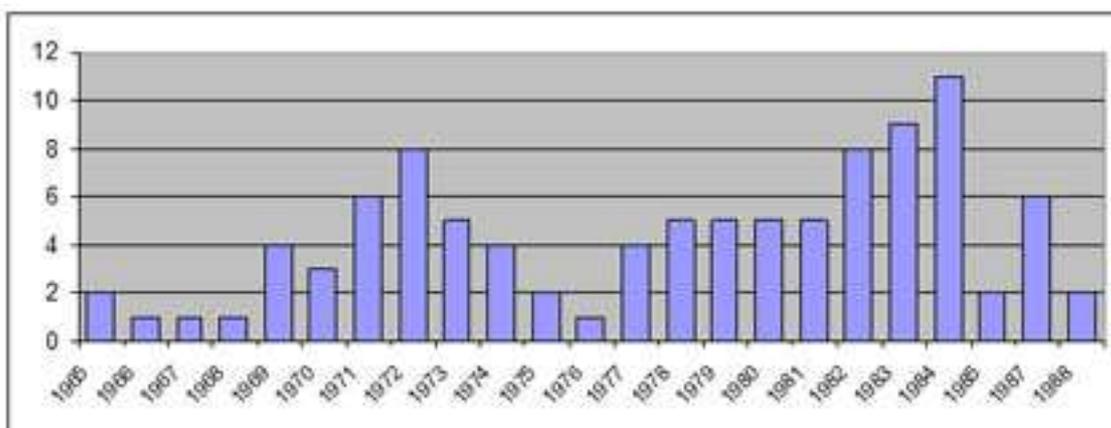


Рис.1. Распределение ПЯВ народно-хозяйственного назначения по годам, проведенных в бывшем СССР [Мирные..., 2001].

В США программа ПЯВ народно-хозяйственного назначения была названа «Плаушер» (Плуг по англ., название взято из библии «сменим мечи на орала»), и была начата раньше, чем в СССР. Первый взрыв «Гном» был произведен 10 декабря 1961 г. Последний – «Рио Бланко» 17 мая 1973 г. Всего в США было проведено 23 мирных ПЯВ с использованием 27 ядерных зарядов, по данным Яблокова А.В. - 33 ПЯВ из 39 ядерных зарядов [Яблоков, 2003]. В США быстро свернули программу мирных ПЯВ, оценив низкую экономическую эффективность использования ядерно-взрывной технологии при решении народно-хозяйственных задач, или поняли масштабы зарождаемых взрывами экологических проблем, хотя продолжали взрывать на спецполигонах, например, Невада вплоть до сентября 1992 г.

Ядерное взрывное устройство (ЯВУ) состоит из собственно ядерного заряда и систем его подрыва и контроля, помещенных в металлический корпус [Мирные ядерные..., 2001]. Сжатые силой взрыва обычного взрывчатого вещества части из урана-235 или плутония-239 образуют *критическую массу* делящегося вещества. В результате возникает *цепная реакция* деления ядер, выделяется огромное количество энергии и происходит атомный взрыв. Известно, что обычно в боевых ЯВУ использовался шар из металлического Вe с  $^{238}\text{Pu}$  покрытием в качестве импульсного нейтронного инициатора (урчина) – первичного источника нейтронов для резкого снижения критической массы и ускорения начала реакции (сперва вместо  $^{238}\text{Pu}$  использовали  $^{209}\text{Po}$ ). Урчина срабатывает в момент перевода боевого ядра в сверхкритическое состояние (при сжатии происходит смешение  $^{238}\text{Pu}$  и бериллия с выбросом большого количества нейтронов). Осколки вынужденного деления тяжелых делящихся материалов, представлены первоначально 80-тью изотопами 35-ти химических элементов от Zn до Gd. Первые атомные взрывные устройства для ПЯВ были именно такими. Однако для большей части ПЯВ, в том числе для рассматриваемых в данной работе, использовались не просто ядерные, а термоядерные взрывные устройства. При

термоядерном взрыве энергия атомного взрыва урана-235 или плутония-239 служит «запалом» для начала термоядерной реакции синтеза (слияния) ядер изотопов водорода. Основная реакция здесь — превращение двух ядер тяжёлых изотопов водорода (дейтерия  $^2\text{H}$  и трития  $^3\text{H}$ ) в ядро гелия  $^4\text{He}$  и нейтрон. Реакция синтеза дает в сотню раз больше энергии, чем реакция ядерного деления. Гидрид лития поглощает нейтроны, возникшие в ходе ядерной реакции деления, в результате чего образуется тритий. Тритий вступает в реакцию с дейтерием (стабильный изотоп водорода), при этом снова выделяются нейтроны (происходит «зажигание»), которые затем вновь поглощаются гидридом лития с образованием трития, тритий реагирует с дейтерием и т.д. Все это происходит в миллионные доли секунды.

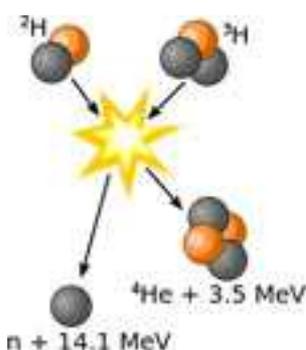


Рис.2. Схема термоядерной реакции [[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Deuterium-tritium\\_fusion.svg?uselang=ru](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Deuterium-tritium_fusion.svg?uselang=ru)]

Подземный ядерный взрыв является одним из самых сильных техногенных воздействий, когда-либо оказанных человеком на геологическую среду [Яблоков, 2003, Адушкин, Спивак, 2007]. Под геологической средой, согласно Е.М.Сергееву [1982] понимается верхняя часть литосферы, находящаяся под воздействием инженерной деятельности человека, которая, в свою очередь, в известной степени определяет эту деятельность. В дальнейшем понятие «геологической среды» получило развитие как динамическая геосистема верхней части литосферы, состоящая из тесной взаимосвязи компонентов: «горные породы - подземные воды (в т.ч. нефти и др. жидкие углеводороды) - природные газы - микроорганизмы (живая составляющая), на которые воздействует техногенная деятельность человека [Радченко, Матусевич, Курчиков, 2011]. Мощность или глубина геологической среды определяется глубиной техногенного воздействия и глубиной, где происходят вызванные техногенным воздействием изменения. Например, при бурении глубоких скважин, добычи нефти и газов, глубина геологической среды исчисляется от нескольких до 6-7 километров. За верхнюю границу геологической среды принимают дневную поверхность земли, где геологическая среда активно взаимодействует с атмосферой и гидросферой [Радченко и др., 2011].

Техногенное воздействие может оказываться как на геосистему в целом, так и избирательно на отдельные ее компоненты. При этом важны изменения не только в горных

породах, но и в подземных водоносных горизонтах, в движении подземных газов. В работах Шварцева С.Л. касательно зоны гипергенеза и гидрогеологических проблем также раскрывается понятие единой системы «горная порода - подземные воды - органическое вещество – газы», в которой подчеркивается сложная система взаимосвязей горных пород и флюидов (жидкой и газовой фаз), и тем самым близко к выделяемой нами «геологической среде» [Шварцев, 1998, 2010]. Таким образом, новые горизонты гидрогеологии связаны с расширением объекта ее исследований, а именно механизмов взаимодействия в системе вода-порода-газ-органическое вещество – техногенные продукты, т.е. взаимодействием с любыми косными, биокосными и живыми веществами. Именно такой подход к гидрогеологии наиболее полно соответствует подходам современной науки синергетики [Шварцев, 2010]. Границы геологической среды и зоны гипергенеза могут пересекаться и совпадать. Свежеполученные знания о выходе подземных газов, формирующих котлованы на Ямале, подтверждают большую роль газовой и органической составляющей геологической среды [<http://www.sbras.info/articles/science/dalnii-rodstvennik-bermudskogo-treugolnika>].

В работе термин геологической среды принят по Сергееву Е.М. [Сергеев, 1982, Радченко и др., 2011], как верхняя часть литосферы, состоящая из тесной взаимосвязи вмещающих пород и подземных флюидов (вод, газов), на которые действует ПЯВ. В центре ПЯВ вследствие расплавления и испарения пород формируется полость взрыва, которую нужно рассматривать как неконтролируемый подземный пункт размещения особых радиоактивных отходов, содержащий осколочные радионуклиды, остатки ЯВУ, наведенную радиоактивность, с практически безграничной продолжительностью существования (по периоду полураспада долгоживущих изотопов Pu). Вокруг полости взрыва формируются зоны механического разрушения. Этот радиоактивный механически измененный участок литосферы представляет собой геотехногенную систему со сложным внутренним строением и внешними связями [Гаджиев и др., 1992, Емлин, 1993] (рис.3). В силу разных геологических и технических условий каждого взрыва формируются уникальные геотехногенные системы со своей историей развития с момента сильного термобарического и радиационного воздействия на вмещающие породы и последовавшими процессами релаксации.

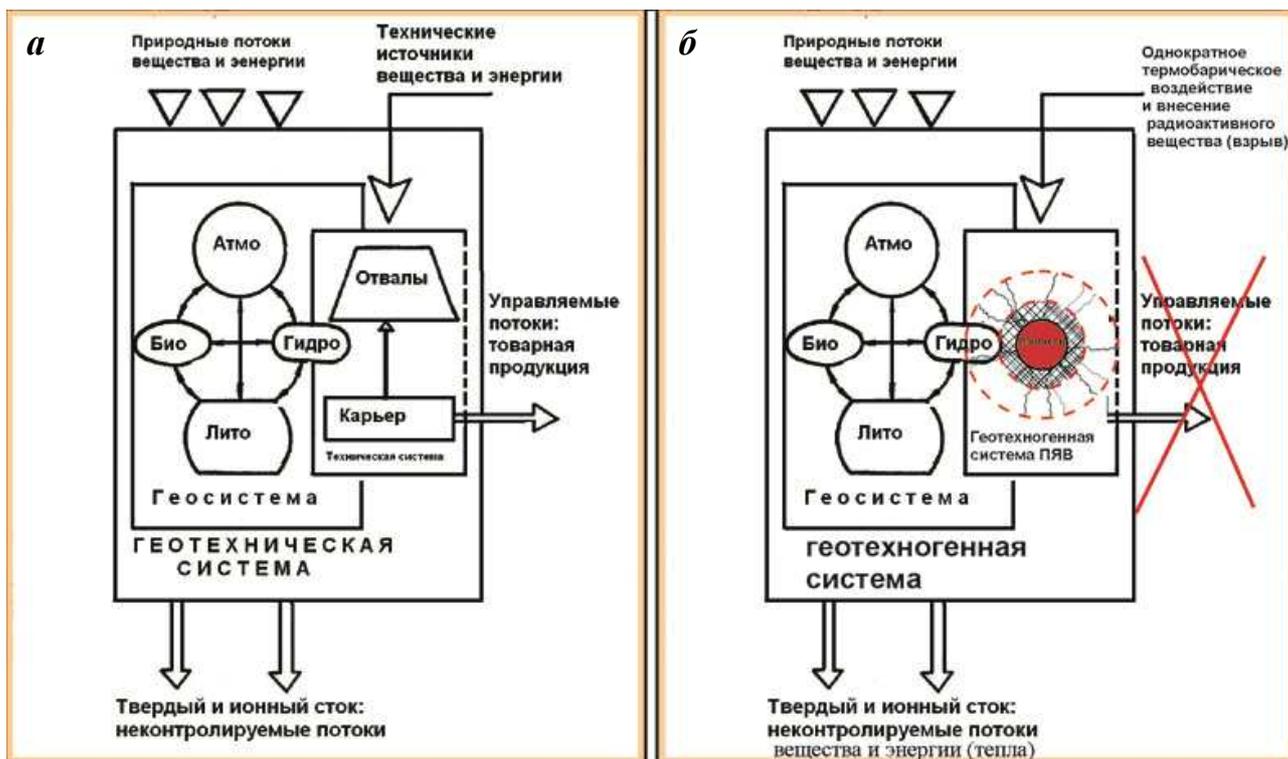


Рис.3. Схема геотехнической системы горнодобывающего предприятия по Емлину Э.Ф. [1993] (а) и ее адаптация под геотехногенную систему ПЯВ (изменения внесены автором) (б).

Геотехническая система – это система, поддерживаемая человеком в течение какого – то продолжительного времени в ходе хозяйственной деятельности для выработки энергии или вещества, то есть в системе постоянно действует технический фактор (сила). Тогда как геотехногенная система ПЯВ образовалась практически при одноактном приложении техногенной силы – ядерного взрыва, а далее уже система устаканивалась и развивалась под действием в основном только природных факторов при практическом отсутствии направленного человеческого вмешательства (до рекультивационных и других работ). На этом основании автором в этом случае изменен термин «геотехническая система» в термин «геотехногенная система». К термину «геоэкология» в его традиционном понимании автором добавляется также приставка «радио-» для подчеркивания доминирования роли радиоактивного фактора в геотехногенных системах ПЯВ.

В центре ПЯВ вследствие расплавления и испарения пород формируется полость взрыва, которую нужно рассматривать как неконтролируемый подземный пункт размещения особых радиоактивных отходов, содержащий осколочные радионуклиды, остатки ЯВУ, наведенную радиоактивность, с практически безграничной продолжительностью существования (по периоду полураспада долгоживущих изотопов Pu). По результатам экспериментального обследования в СССР и США получено, что практически вся радиоактивность (до 90%) находится в полости взрыва радиусом  $R_M=8,5-15 \text{ м/кт}^{1/3}$

[Андрюшин и др., 2000, Адушкин, Спивак, 2007]]. Радиохимическими методами было установлено, что радиоактивное вещество связано в основном со стекловатым материалом, образовавшимся при взрыве. Сделана оценка, что на каждую килотонну тротилового эквивалента приходится  $500 \pm 150$  т оплавленных пород [Андрюшин и др., 2000]. В этом материале сосредоточено от 60 до 90% всех активных продуктов, представленных широким спектром техногенных радиоактивных изотопов:

1) *осколки вынужденного деления* тяжелых делящихся материалов, представлены первоначально 80-тью изотопами 35-ти химических элементов от Zn до Gd;

2) *радионуклиды*, образовавшиеся в результате *взаимодействия нейтронов* с материалами вмещающей геологической среды и инженерных конструкций ( $^3\text{H}$ ,  $^{60}\text{Co}$  и др., т.н. наведенная активность);

3) *несгоревшие остатки делящихся* ( $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{235}\text{U}$ );

4) *несгоревшие остатки термоядерных* ( $^3\text{H}$ ) материалов;

5) *радионуклиды* ( $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{U}$ ), *используемые в конструкции ЯВУ*.

Вклад каждого радионуклида в общую активность, образовавшуюся при ядерном взрыве, зависит от многих факторов, среди которых фактор продолжительности времени, прошедшего после взрыва, и периода полураспада изотопов являются основными. В наиболее совершенных ЯВУ реакция деления составляла около 1 % от суммарного энерговыделения (уменьшено количество «осколков»). Для уменьшения радиоактивного загрязнения в термоядерный узел ЯВУ включался специальный слой, поглощающий нейтроны [Матущенко, Гильманов, 2002]. Для снижения радиационного загрязнения при взрывах рыхления и на выброс использовались эти специально разработанные более «чистые» ЯВУ с уменьшенной долей заряда из тяжелых изотопов, при взрыве которого доля продуктов осколочного деления снижалась с 5-6 % до 1 % [Мирные..., 2001]. А в пределах нефтегазовых месторождений, наоборот, при проведении ПЯВ, как правило, применяли ЯВУ с уменьшенной термоядерной частью (то есть увеличенной долей делящейся части) для снижения уровня тритиевого загрязнения углеводородов, поскольку тритий имеет высокую способность взаимодействия с органическими веществами из-за химического сродства с обычным стабильным водородом.

В течение первого года после взрыва основная масса короткоживущих изотопов наведенной и осколочной активности распадалась. Далее, в течение длительного периода времени (до 100 лет после взрыва) одним из основных вкладчиков общей активности является именно  $^3\text{H}$ , а осколочные радионуклиды  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и изотопы Pu составляют всего несколько % от общей активности.

Инвентаризация подземной активности в геологической среде спецполигона Невада (США), проведенная с учетом всех основных долгоживущих радиоизотопов на 23 сентября 1992 г. (сразу за последним взрывом на этом полигоне), подтверждает о резком преобладании активности трития в общей подземной активности. Рассчитано, что практически 92-93 % общей активности составляет тритий, затем в ряду по мере снижения долей активности следуют:  $^{137}\text{Cs}$  2.7 %,  $^{90}\text{Sr}$  - 1 %, затем остатки делящейся части ЯВУ и трансурановые элементы (ТУЭ) наведенной активности и распада (см. табл.3) [Smith et al, 2003]. На участке Pahute Mesa, где были произведены мощные ПЯВ, общая подземная активность составляла на 23.09.1992 г. примерно 711000 ТБк, что почти на 2 порядка превышала общую активность в 7030 ТБк на Frenchman Flat, где проводились менее мощные ПЯВ на меньшей площади [Smith et al, 2003]. По данным инвентаризации (см.табл.3) показано, что доли осколочных  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{93}\text{Zr}$  в несколько раз, а остатков ЯВУ и трансурановых элементов наведенной активности (преимущественно изотопа  $^{233}\text{U}$ , нежели изотопов Pu) в 10-1000n раз выше на участке Pahute Mesa по сравнению с Frenchman Flat. На основании этого можно предположить о различии составов малых и больших ЯВУ: для более мощных взрывов на Pahute Mesa в большей степени были увеличены делящиеся части ЯВУ, в том числе с большей урановой составляющей по сравнению с районом Frenchman Flat. Соотношения радиоизотопов в полостях ПЯВ на территории России – закрытая информация. По расчетам в полости взрыва «Кратон-3» мощностью в 22 кт в ТЭ и «Кристалл» в 1.7 кт в ТЭ через год после взрыва общая активность в полости взрыва составляла  $8880 \cdot 10^{12}$  и  $814 \cdot 10^{12}$  Бк или 8880 и 814 ТБк (рис.4).

По ФЗ РФ №190 от 11.07.2011 г.[2011], Постановления Правительства РФ №1069 от 19.10.2012 г. [2012] места ПЯВ отнесены к особым радиоактивных отходам. Таким образом, полости взрывов согласно ФЗ №190 от 11.07.2011 г. нужно рассматривать как неконтролируемые подземные пункты размещения особых радиоактивных отходов с практически безграничной продолжительностью существования (по периоду полураспада долгоживущих изотопов  $^{239}\text{Pu}$   $T_{1/2}=24390$  лет), поскольку мероприятия по изоляции объектов ПЯВ в геологической среде не рассматривались и не проводились, и перенос радионуклидов в геологическую среду как ряз является предметом исследования данной работы.

Вместе с тем активность в полостях ПЯВ неуклонно снижается за счет естественного распада. По расчетам общая подземная активность на рассмотренных двух участках полигона Невада за 500 лет снизятся в 1560 и 90 раз (с учетом естественных радионуклидов, содержащихся во вмещающих вулканических туфах и осадочных породах: содержание  $^{40}\text{K}$ ,

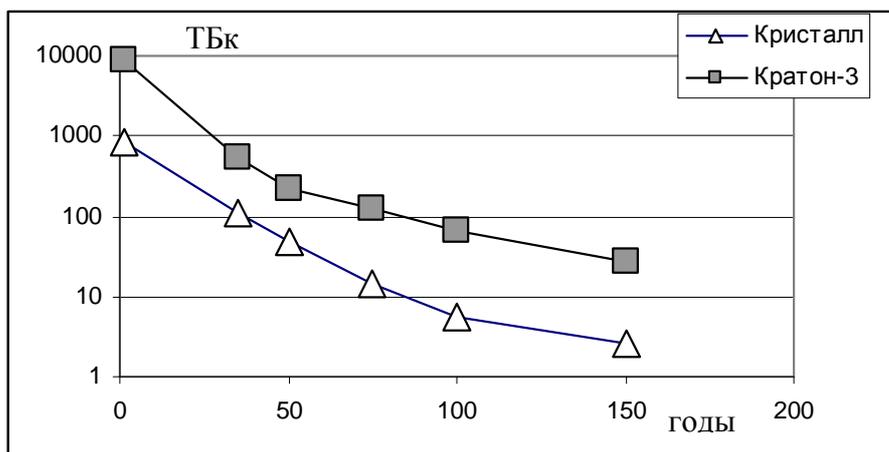


Рис.4. Кривые снижения общей активности в полостях взрывов «Кратон-3» и «Кристалл» со времени проведения взрыва, начиная с 1 года после взрывов (расчетные данные РФЯЦ, г. Саров, договор с ИГМ СО РАН № 2485-5-96/2009 от 01.07.2009 г.)

$^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  составляет 4 масс.%, 22 г/т, 3.7 г/т соответственно, и близко с кларкам в земной коре).

За истекший период в 40 лет со времени ПЯВ «Кристалл» в 1974 г. активность трития уменьшилась примерно в восемь раз по сравнению с начальной, а общая осколочная активность снизилась на несколько порядков. График снижения общей активностей в полостях взрывов за счет естественного распада приводится на рис.4. Со временем доля в общей радиоактивности несгоревших при взрыве делящихся материалов возрастает, это, главным образом, изотопы Pu и продуктов их естественного распада ( $^{241}\text{Am}$ ) с очень длительным периодом полураспада. Как видно из таблицы 3, через 500 лет, основная активность в 61-66 % будет связана с  $^{239}\text{Pu}$ , примерно 15 % – с  $^{240}\text{Pu}$ , а доля  $^{241}\text{Am}$  увеличивается неуклонно за счет его образования из  $\beta$ -распада  $^{241}\text{Pu}$ , и его доля через 500 лет после испытаний на полигоне Невада достигнет 4.7 – 10.7 % общей подземной активности. Необходимо подчеркнуть, что именно со временем плутониевая и америциевая опасность становится все более актуальной экологической проблемой [Рихванов, 2013] как в районах ПЯВ, так и в зонах загрязнения от былых испытаний ядерного оружия на спецполигонах.

Представление о том, что ПЯВ, произведенный в штатном режиме «при правильно составленных проектах и качественном их выполнении...представляет не большую потенциальную опасность, чем использование в народном хозяйстве изотопных проборов и

Таблица 3. Активность основных радиоактивных изотопов с большими периодами полураспада ( $T_{1/2}$ ) в геологической среде двух участков полигона Невада (США) [Smith et al., 2003]

Радионуклид		Вид происхождения Радионуклида	Френчман-флэт ( Frenchman Flat)				Пахут-Меса ( Pahute Mesa)			
			1992	1992	2492	2492	1992	1992	2492	2492
$T_{1/2}$ , лет			тБк	%	тБк	%	тБк	%	тБк	%
<sup>3</sup> H	12.32	ЯВУ. нав. акт.	6450	91.75	3.74E-09	4.78E-09	658000	92.55	3.81E-07	8.4E-08
<sup>14</sup> C	5715	нав. акт.	2.46	0.0350	2.32	2.96	8.11	0.0011	7.64	1.68
<sup>26</sup> Al	710000	нав. акт.	0.00026	0.0000	0.00026	0.000	0.0000332	0.0000	0.0000332	0.00
<sup>36</sup> Cl	301000	нав. акт.	0.33	0.0047	0.329	0.42	3.37	0.0005	3.37	0.74
<sup>39</sup> Ar	269	нав. акт.	0.228	0.0032	0.0629	0.080	23.7	0.0033	6.53	1.43
<sup>40</sup> K	1.27E+10	ЕРЭ	0.061	0.0009	0.061	0.078	5.88	0.0008	5.88	1.29
<sup>41</sup> K	103000	нав. акт.	2.42	0.034	2.41	3.078	18.7	0.0026	18.6	4.08
<sup>59</sup> Ni	76000	нав. акт.	0.0605	0.0009	0.0602	0.077	0.591	0.0001	0.588	0.13
<sup>63</sup> Ni	100	нав. акт.	6.21	0.088	0.194	0.25	63.8	0.009	1.99	0.44
<sup>85</sup> Kr	10.76	пр.распада. нав. акт.	4.75	0.068	4.08E-14	5.2107E-14	1840	0.26	1.58E-12	0.00
<sup>90</sup> Sr	28.78	пр.распада	69.5	0.99	0.000468	0.0006	21500	3.02	0.144	0.03
<sup>93</sup> Zr	1500000	пр.распада. нав. акт.	0.00414	0.0001	0.00414	0.0053	0.698	0.0001	0.698	0.15
<sup>93m</sup> Nb	16.1	нав. акт.	0	0.0000	0	0	110	0.0155	4.92E-08	0.00
<sup>94</sup> Nb	20000	пр.распада. нав. акт.	0.0258	0.0004	0.0253	0.032	2.94	0.0004	2.89	0.63
<sup>99</sup> Tc	213000	пр.распада. нав. акт.	0.0432	0.0006	0.0431	0.055	4.97	0.0007	4.96	1.09
<sup>107</sup> Pd	6500000	пр.распада. нав. акт.	0.000721	0.0000	0.000721	0.0009	0.022	0.0000	0.022	0.00
<sup>113m</sup> Cd	14.1	пр.распада	0.111	0.0016	2.34E-12	2.9885E-12	18.6	0.0026	3.92E-10	0.00
<sup>121m</sup> Sn	55	пр.распада. нав. акт.	0.609	0.0087	0.00112	0.0014	65.9	0.0093	0.121	0.03
<sup>126</sup> Sn	15700000	пр.распада	0.00303	0.0000	0.00302	0.0039	0.299	0.0000	0.298	0.07
<sup>129</sup> I	2300000	пр.распада. нав. акт.	0.000168	0.0000	0.000168	0.0002	0.0154	0.0000	0.0154	0.00
<sup>135</sup> Cs	30.07	пр.распада	0.00504	0.0001	0.00504	0.0064	0.515	0.0001	0.515	0.11
<sup>137</sup> Cs	90	пр.распада. нав. акт.	187	2.66	0.00191	0.0024	25800	3.63	0.265	0.06
<sup>151</sup> Sm	36	пр.распада. нав. акт.	10.9	0.1550	0.232	0.3	854	0.12	18.1	3.97
<sup>150</sup> Eu	36	нав. акт.	0.000365	0.0000	0.000000024	3.0651E-08	2.89	0.0004	0.00019	0.00
<sup>152</sup> Eu	13.54	нав. акт.	28	0.40	1.91E-10	2.4393E-10	426	0.06	2.91E-09	0.0000

Продолжение таблицы 3

Радионуклид		Вид происхождения Радионуклида	Френчман-флэт ( Frenchman Flat)				Пахут-Меса ( Pahute Mesa)			
	T <sub>1/2</sub> , лет		1992	1992	2492	2492	1992	1992	2492	2492
			тБк	%	тБк	%	тБк	%	тБк	%
<sup>3</sup> H	12.32									
<sup>154</sup> Eu	8.593	нав. акт.	9.7	0.14	2.92E-17	3.7292E-17	263	0.037	7.89E-16	0.0000
<sup>166m</sup> Ho	1200	пр.распада. нав. акт.	0.0749	0.0011	0.0561	0.072	1.14	0.0002	0.855	0.19
<sup>232</sup> Th	1.4 E+10	ЯВУ и ЕРЭ	0.00443	0.0001	0.00443	0.0057	0.424	0.0001	0.424	0.093
<sup>232</sup> U	69.8	ЯВУ нав. акт.	0.00038	0.0000	0.00000269	3.4355E-06	3.23	0.0005	0.0229	0.005
<sup>233</sup> U	159200	ЯВУ и ЕРЭ	0.0000494	0.0000	0.0000493	6.2963E-05	2.41	0.0003	2.4	0.53
<sup>234</sup> U	246000	ЯВУ и ЕРЭ	0.0102	0.0001	0.0102	0.013	2.84	0.0004	2.84	0.62
<sup>235</sup> U	7.04 E+8	ЯВУ и ЕРЭ	0.000317	0.0000	0.000317	0.0004	0.0478	0.0000	0.0478	0.01
<sup>236</sup> U	23420000	ЯВУ и ЕРЭ нав. акт.	0.000111	0.0000	0.000111	0.00014	0.0819	0.0000	0.0819	0.018
<sup>238</sup> U	4.47 E+9	ЯВУ и ЕРЭ	0.00352	0.0001	0.00352	0.0045	0.253	0.0000	0.253	0.056
<sup>237</sup> Np	2140000	пр. распада	0.000451	0.0000	0.00051	0.00065	0.443	0.0001	0.442	0.097
<sup>238</sup> Pu	87.7	ЯВУ нав. акт.	12	0.17	0.23	0.29	106	0.015	2.03	0.445
<sup>239</sup> Pu	24100	ЯВУ пр распада	52.4	0.75	51.6	65.9	284	0.04	280	61.4
<sup>240</sup> Pu	6560	ЯВУ пр распада нав. акт.	12.9	0.18	12.2	15.6	75.5	0.011	71.6	15.7
<sup>241</sup> Pu	14.4	ЯВУ пр распада нав. акт.	163	2.32	5.75E-09	7.3436E-09	1090	0.15	3.85E-08	0.0000
<sup>242</sup> Pu	375000	ЯВУ пр распада нав. акт.	0.00107	0.0000	0.00107	0.0014	0.0506	0.0000	0.0505	0.011
<sup>241</sup> Am	432.7	ЯВУ пр распада	18.6	0.27	8.34	10.7	48.1	0.0068	21.6	4.74
<sup>243</sup> Am	7370	ЯВУ	0	0.0000	0	0	0.000445	0.0000	0.000425	0.0001
<sup>244</sup> Cm	18.1		0	0.0000	0	0	44	0.0062	0.000000213	0.0000
Сумма		тераБеккерель	7030	100.0	78.3	99.87	711000	99.95	456	99.84

ЯВУ – остатки ядерного взрывного устройства, пр. распада – продукты распада, нав.акт. – наведенная активность, ЕРЭ – изотопы из рядов распада естественных радиоактивных элементов

деятельность атомных объектов – АЭС и заводов по регенерации топлива АЭС» [Кривохатский, 1982], как и представление о том, что «в условиях вечной мерзлоты вода в центральной зоне взрыва превращается в лед и надежно удерживает радионуклиды, включая тритий» [Мирные..., 2001] нуждается в верификации. Геотехногенная система «*полость взрыва – вмещающая геологическая среда*» имеет длительную историю развития с момента сильного термобарического и радиационного воздействия на вмещающие породы и последовавшими процессами релаксации в течение времени, прошедшего уже со времен взрыва (25-40 лет). Неоднородности геологической среды: естественные и вновь появившиеся техногенные, наличие проводящих геоструктур могут привести к распространению радионуклидов в геологической среде и выходу на поверхность земли.

ПЯВ является одним из самых сильных техногенных воздействий, когда-либо оказанных человеком на геологическую среду [Адушкин, Спивак, 2007], приводивших к изменению строения больших масс горной породы и подземных флюидоносных систем, при этом взрывы были проведены в совершенно разных геологических условиях по всей территории России (см. рис. 6) на разных глубинах и разной мощности. Только зная современное состояние этих геотехногенных систем «*полость взрыва – вмещающая геологическая среда*» можно делать прогнозы и предпринимать необходимые меры по снижению экологических рисков, связанных с этими опасными объектами, поэтому необходимость изучения состояния недр у объектов ПЯВ не подлежит сомнению.

#### ***Изученность проблемы.***

Появление возможности библиографической работы в Интернете на базе платформы сайта Web of Science позволило провести анализ публикаций по геоэкологическому изучению объектов ПЯВ на мировом уровне по состоянию на конец декабря 2014 г. Поиск публикаций проведен в корневой базе Core Base Web of Science. На ключевые слова «***Underground nuclear explosion***» найден список всего из 176-ти работ. Из этого списка с сужением области поиска с помощью терминов: «***environmental, chemistry, physics, geosciences, geology, geophysics, geochemistry, soil science, hydrogeology, geological engineering***» в списке осталось всего 128 работ (убраны работы медицинского, гуманитарно-философского, математического плана). Вместе с тем из этих 128-ми работ больше половины – 70 публикаций посвящены разработке сети и усовершенствованию методов сейсмических наблюдений для распознавания событий ПЯВ, так и вопросам определения места проведения (координат), глубины и мощности взрывов на основе интерпретации записей сейсмических волн (табл.4). По данным Web of Science, первые работы, появившиеся в открытой печати в 1990 г., были также посвящены сейсмологическим аспектам ПЯВ. К данным публикациям близки 4 работы по интерпретации инфразвуковой, 1 – гидроакустических аспектов ПЯВ.

Сужение подборки публикаций о ПЯВ по ключевому слову «*radioactive*» из 128-ми публикаций оставил подборку всего из 22-х работ. При этом 10 из 22-х работ посвящены опять-таки проблеме распознавания ПЯВ по эмиссии радиоактивных благородных газов с коротким периодом полураспада.

Таким образом, в рамках базы Core Base Web of Science из 128-ми публикаций, связанных с «*Underground nuclear explosion*», основная часть - 85 работ посвящены методике распознавания и сейсмического мониторинга ядерных испытаний на планете. К собственно радиоэкогехимическим исследованиям последствий ПЯВ можно отнести только 12 работ, из которых 10 написаны российскими и казахскими учеными (табл.5), и в них освещаются результаты изучения радиоактивного загрязнения районов ПЯВ и территории Семипалатинского и Азгирского полигонов. Большинство работ радиоэкогехимического изучения объектов ПЯВ 6 из 12-ти опубликованы в JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY.

Таблица.4. Названия изданий с публикациями, посвященными изучению ПЯВ (по данным корневой базы Core Base Web of Science на 01.01.2015 г.)

GEOPHYSICS SEISMIC	70
ENVIRONMENTAL SCIENCES ECOLOGY, GEOCHEMISTRY,	22
ENGINEERING, GEOLOGY	19
NUCLEAR SCIENCE TECHNOLOGY	17
Всего	128

Среди 12-ти работ максимальное число цитирования, равное 14, получила публикация российских исследователей Гедеонова А.Д. с соавторами, посвященная последствиям радиоактивного загрязнения районов ПЯВ «Кристалл» и «Кратон-3» в Якутии [Gedeonov et.al., 2002]. Такое же количество – 12 работ найдено при дополнительном сужении исходной выборки по ключевому слову «geology», в число которых включены все работы соискателя [Artamonova et. al. 2011, 2012, 2013, Kojevnikov et. al., 2012]. Публикации этой подборки посвящены изучению изменений геологической среды в результате проведения ПЯВ, в т.ч. вопросам радиоактивного загрязнения подземных вод. Таким образом, библиографический анализ показал, что более активно ведутся исследования последствий ПЯВ на территории России, Казахстана и США.

Проведен параллельный поиск публикаций в **корневой базе Core Base Web of Science** на ключевое слово: “waste” – отходы, всего найдено 142104 публикации, после сужения области знаний: «геология, окружающая среда», количество работ в выборке

снизилось до 78900 работ, после следующего шага сужения выборки ключевым словом «*radioactive*» осталось 5224 работы, а если вместо него провести поиск на ключевое слово «*nuclear*», то остается выборка из 5776 работ, что больше на 552 работы. При дальнейшем сужении выборки при сужении с помощью ключевого слова «*Underground nuclear test*» осталась подборка всего из 101 работы.

Проведен третий вариант поисков публикаций в **корневой базе Core Base Web of Science** с помощью ключевого слова «*tritium*» (поскольку тритий – один из самых подвижных техногенных радионуклидов, информативных индикаторов процессов в системе «ПЯВ – геологическая среда»), в результате найдено 7676 опубликованных работ, но при дальнейшем шаге сужения этой выборки по ключевому слову «*Underground nuclear test*» осталось всего 11 работ из этой подборки, а по ключевому слову «*Underground nuclear explosion*» – всего 4 работы, из которых 2 – работа Ляховой О.Н. [Lyakhova O.N. et. al. 2012, 2013], 1 – публикация Артамоновой С.Ю. - автора диссертации [Artamonova et.al., 2011].

Необходимо отметить, что база данных Web of Science включает около 12 тыс. журналов и изданий, а в мире научных изданий не менее 60 тыс., и большинство публикаций по обсуждаемой теме могли не попасть в эту систему. Необходимо также учитывать специфику тематики исследований, поскольку до 1990-х годов объекты ПЯВ были под грифом секретности. Таким образом, несмотря на возрастающий интерес и актуальность работ, судя по количеству и тематике публикаций, связанных с ПЯВ, радиогеоэкологическая изученность объектов ПЯВ даже на мировом уровне не высокая. Среди всего объема опубликованных работ значительную долю занимают публикации российских авторов, которые являются одними из наиболее цитируемых.

**Таблица.5** Распределение опубликованных работ по радиоэкогехимическому изучению объектов ПЯВ по странам изданий (по данным Web of Science Core base) на 01.01.2015 г.

Countries/Territories	Records	% of 23
AUSTRALIA	1	4,35
BELGIUM	1	4,35
CANADA	1	4,35
FRANCE	2	8,70
KAZAKHSTAN	2	8,70
NORWAY	1	4,35
RUSSIA	<b>8</b>	<b>34,78</b>
SWITZERLAND	1	4,35
USA	9	39,13

С 2009 г. наблюдается увеличение числа публикаций по данной теме (см. рис.5), что, по-видимому, свидетельствует не столько о росте внимания к радиоэкологохимическим проблемам ПЯВ, как и большей открытости вопросов, связанных с объектами ПЯВ.

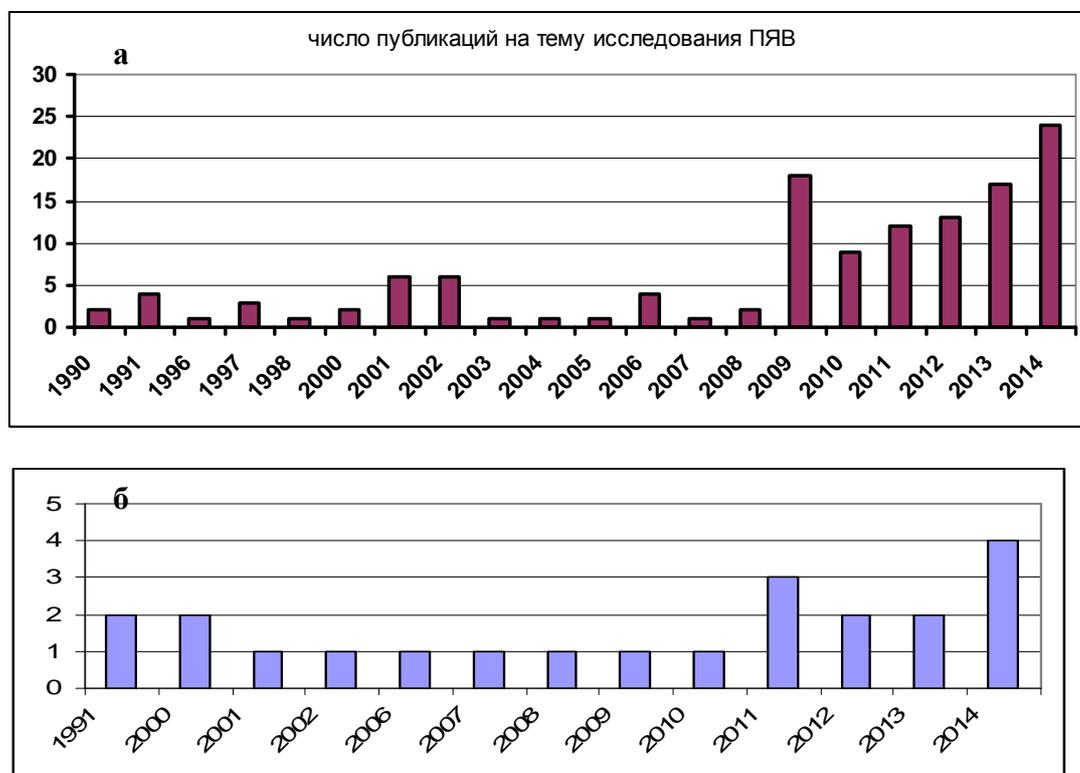


Рис.5. Распределение по году опубликования статей по вопросам геоэкологического и геофизического (а), радиоэкологохимического (б) изучения объектов ПЯВ (по данным Web of Science Core base на 01.01.2015 г.).

В России объекты ПЯВ стали доступны для широкой научной общественности после рассекречивания в 1990-ые годы. Основное внимание было обращено оценке радиационного загрязнения ландшафтов во время взрывов, дальнейшего перераспределения и миграции радионуклидов под воздействием экзогенных и биогенных процессов, расчетам и оценке дозовых нагрузок [Медведев и др., 2005, Чуйков, Досмухамедова, 2006, Ложников, Сотников, 1998, Геденов и др., 2004, Рамзаев и др., 2009, 2010, Медведев и др., 2005, Тапхаева и др., 2009, 2011], в том числе на аварийных объектах «Кристалл» и «Кратон-3» в Якутии [Бурцев, Колодезникова, 1997, Геденов и др., 2004, Степанов и др., 2003, 2004, Чевычелов, Собакин, 2004, Gedeonov et. al., 2002, Ramzaev et. al., 2007, 2009].

Ряд обследований были направлены на оценку радиационной обстановки в окрестностях так называемых боевых скважин, в которые закладывали ядерное взрывное устройство (ЯВУ) [Мясников и др., 1998, Смирнов и др., 2000, Дубасов и др., 2005, Касаткин и др., 2009]. Единичные работы посвящены влиянию ПЯВ на живую составляющую экосистем [Тестов и др., 2000, Колесникова и др., 2005].

Необходимость проведения рекультивационных работ на аварийных ПЯВ «Кристалл» и «Кратон-3» инициировали проведение не только радиоэкологических, но и специальных работ. Было проведено численное моделирование диффузии радионуклидов в сезонно-талом слое загрязненных ландшафтов ПЯВ «Кратон-3» [Пермяков, Аммосов, 2003] для оценки «расползания» пятен поверхностного загрязнения со стороны погибшего при аварии массива тайги. Разработана модель теплообмена насыпи-кургана с определенными параметрами материала, объема, которая обосновала возможность вывода загрязненного участка поверхности земли из сезонно-талого слоя путем перекрытия рыхлым породным материалом за счет поднятия уровней сезонно-талого слоя, наращивания мерзлоты и иммобилизации радионуклидов в наращенной мерзлоте [Киселев и др., 2004, 2010].

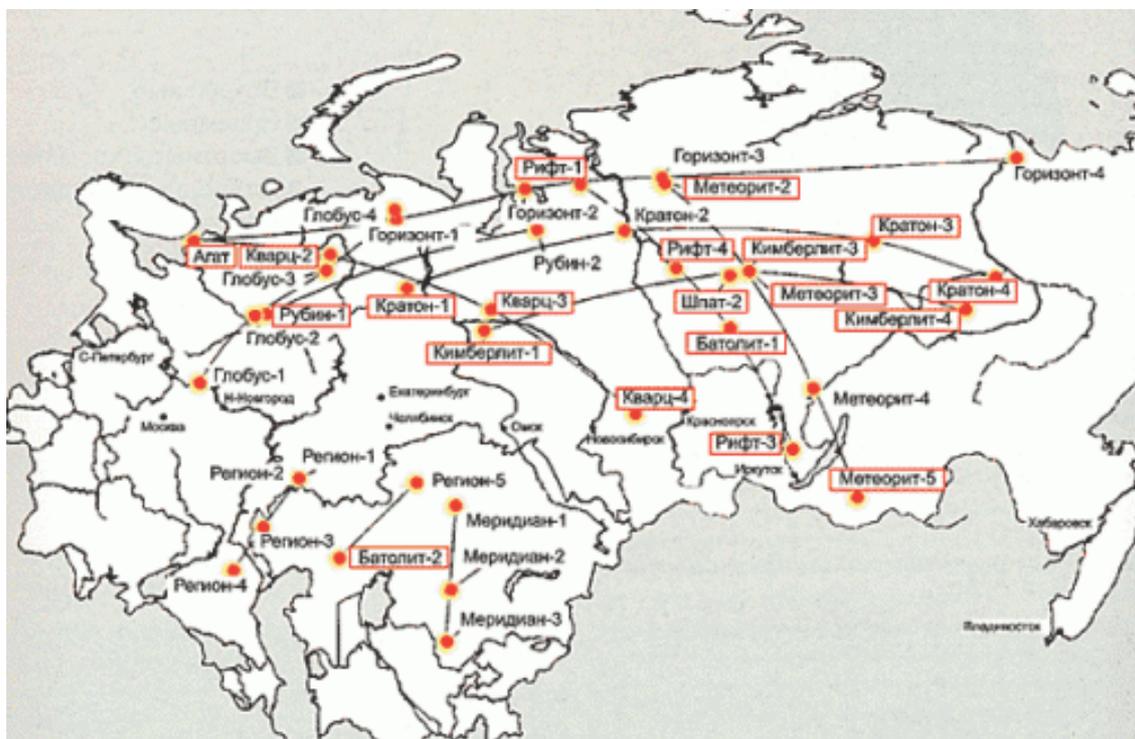


Рис. 6. Географическое расположение ПЯВ, проведенных на территории СССР. Пунктирные линии — некоторые из геофизических профилей, образованных сериями ПЯВ в качестве источника для сейсмозондирования земли [Мирные..., 2001]

Результаты первых исследований [Голубов, 1994, Геворкян, Голубов, 1998] показали, что представление о том, что ПЯВ, произведенный в штатном режиме «при правильно составленных проектах и качественном их выполнении...представляет не большую потенциальную опасность, чем использование в народном хозяйстве изотопных проборов и деятельность атомных объектов – АЭС и заводов по регенерации топлива АЭС» [Кривохатский, 1982] было неоправданно оптимистичным.

Выявлено, что выдавливание на поверхность высокорadioактивных рассолов через устья боевых скважин на Астраханском газоконденсатном месторождении [Голубов, 1994, Геворкян, Голубов, 1998], как и взрыв на Тахта-Кугультинском газовом месторождении и

образование воронки проседания [Шахиджанов, Кирюхина, 2005] обусловлены сокращением объемов полостей ПЯВ вследствие обрушения и другими поствзрывными процессами перестройки вмещающей геологической среды. В 1986 г. практически одновременное сокращение до 10 раз объемов емкостей, созданных с помощью ПЯВ в 1980-1984 гг. в соленосных толщах Астраханского газоконденсатного месторождения на глубинах от 920 до 1100 м, привело к выдавливанию на поверхность земли высокорadioактивных рассолов, накопившихся в емкостях [Голубов, 1994]. По мнению авторов [Геворкян, Голубов, 1998] низкая прочность и текучесть рассолонасыщенных кавернозных соленосных пород, неучтенные при проектировании взрывов, и кумулятивный эффект групповых взрывов на физико-механическую устойчивость недр привели к этому резкому сокращению объемов подземных емкостей. Исследователями сделан вывод о высоком риске катастрофического «схлопывания» подземных емкостей, что проявится на поверхности в виде единого провала над ними и излива на поверхности радиоактивных рассолов. Высказывается мнение, что при своевременной закачке углеводородов подземные емкости сохранили бы устойчивость из-за создания противодавления [Мясников и др., 1998, Смирнов и др., 2000]. На Тахта-Кугультинском газовом месторождении после взрыва началось фонтанирование загрязненного техногенными радионуклидами газа из добывающих скважин и образование воронки проседания глубиной 0.33 м и радиусом 320 м над боевой скважиной, обусловленные сокращением объемов полостей взрывов и другими поствзрывными процессами перестройки вмещающей геологической среды. [Шахиджанов, Кирюхина, 2005].

Голубовым Б.Н. проведен анализ состояния геологической среды у объекта ПЯВ «Гном» в штате Нью-Мексико, США [Голубов, 2013], в результате которого автор делает вывод о возможной опасности подтопления подземного хранилища высокорadioактивных отходов WIPP из-за повышения трещиноватости пород и изменения режима подземных вод вследствие ПЯВ «Гном», проведенного в 12 км к юго-западу от хранилища..

Большое значение исследователями придается переносу трития в геологической среде. Подчеркивается, что тритий является оптимальным индикатором распространения радионуклидов в геологической среде и выходов на поверхность подземной активности [Strom R.N., Kaback D.S., 1992, Cooper et.al., 2007]. В районах ПЯВ изучалась миграция и других изотопов в геологической среде. Под действием диффузии согласно расчетов изотопы родия переместились на 350 м от места взрыва [Thompson et.al., 1991]. Но основными путями для перемещения и распространения радионуклидов названы трещиноватые зоны, существовавшие до и возникшие после ПЯВ [Голубов, 2013, Hawkins et.al., 2000]. Выявлено, что изотопы Рu из очагов взрывов мигрировали на несколько км среди вмещающих рыхлых вулканических пород [Kersting et.al., 1999]. Вместе с тем на

примере объектов ПЯВ на полигоне Невада показано, что ПЯВ не привели к существенным и региональным изменениям гидрогеологических условий, наблюдается только развитие локальных изменений режима и уровней подземных вод [Hawkins et.al., 2000].

Российскими исследователями выявлены факты значительных изменений в геологической среде вследствие проведения ПЯВ. После взрывов зафиксированы как практически мгновенные, так и замедленные долго существующие изменения флюидодинамического режима и состава подземных вод на удалении от 3 до 40 км от объектов ПЯВ [Пиннекер, Шенькман, 1995, Горбунова, Спивак, 1997, Горбунова, 2007, Мельников и др., 2000, Вдовыкин, 2010]. На массиве Балапан (Семипалатинский полигон) после взрыва наблюдался практически мгновенный скачок (до 2 м) уровней подземных вод на удалении в несколько км от места взрыва, и в течение до 3 лет фиксировались низкоамплитудные афтершоки в прямой корреляции с продолжительностью затухания гидродинамического возмущения [Горбунова, Спивак, 1997, Горбунова, 2007]. В условиях Предуралья прогиба зафиксировано повышение на 7–10 м многолетних уровней субнапорных подземных вод на расстоянии от эпицентра ПЯВ в 4.1–8.3 км, на 0.3 м – на расстоянии в 17.8 км [Мельников и др., 2000]. Кроме того, в этом районе установлено резкое разнонаправленное изменение состава подземных вод как в сторону опреснения, так и повышения минерализации (засоления) [Мельников и др., 2000]. В Ангаро-Ленском артезианском бассейне появление хлоридно-кальциевых подземных вод на глубине всего 100 м около п. Оса авторы [Пиннекер, Шенькман, 1995] связывают с поднятием глубинных метаморфизованных подземных рассолов по ослабленным зонам, возникшим вследствие ПЯВ «Рифт-3», проведенного в 40 км от места наблюдения. Авторы [там же] объясняют это тем, что глубокометаморфизованные рассолы в близповерхностной кислород-содержащей зоне активного водообмена не могут существовать в масштабе геологического времени, поскольку в этих условиях происходит вывод солей кальция и магния и формирование хлоридных натриевых рассолов.

Поступление радиоактивных флюидов из зон ПЯВ зафиксированы в 250-ти добывающих скважинах на расстоянии до 10 км от объекта ПЯВ на Осинском месторождении Пермской области [Вдовыкин, 2010]. Таким образом, результаты исследований подтверждают большие последствия влияния ПЯВ на флюидо-динамический режим недр, при котором дальность влияния ПЯВ на геологическую среду достигает десятков километров в зависимости от особенностей ее строения.

Как уже отмечали выше, 51 ПЯВ проведены в пределах криолитозоны. Анализ геолого-географических условий ПЯВ, проведенных в Якутии в зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты, позволил предположить об открытости полостей

взрывов и о возможном влиянии на них активных зон тектонических разломов [Микуленко и др., 2004, 2006]. По распределению измеренной плотности потока радона вокруг боевых скважин «Нева-1», «Вятка» зафиксированы концентрические проницаемые зоны вокруг боевых скважин [Ковалев, Ложников, 2004]. Представление о том, что «в условиях вечной мерзлоты вода в центральной зоне взрыва превращается в лед и надежно удерживает радионуклиды, включая тритий» [Мирные..., 2001], на взгляд автора, также нуждается в верификации. Известна слабая устойчивость многолетнемерзлых пород на внешнее воздействие [Шумилов и др., 2001]. Проведен анализ геолого-географических условий ПЯВ в Якутии [Микуленко и др., 2004, 2006], измерялись естественные геофизические поля при взрыве «Нева-4» [Стогний, 1998]. Высказано предположение о возможной миграции радионуклидов из полости взрыва «Кристалл» в карьер кимберлитовой трубки «Удачная» [Голубов, 2004].

Вместе с тем, несмотря на проведенные исследования до сих пор районы большинства ПЯВ народнохозяйственного назначения остаются малоизученными, а состояние их недр – и вовсе неизученными. На территории России из 85-ти 22 ПЯВ был проведен с целью создания подземных емкостей для хранения углеводородов, и еще 21 – для повышения нефте- и газопритоков из продуктивных пластов, следовательно, почти половина взрывов проведена в нефтегазоносных бассейнах. Большинство эксплуатируемых сейчас месторождений в прошлом испытали воздействие ядерных взрывов, и в этих районах продолжается активное техногенное воздействие на геологическую среду. Для интенсификации добычи углеводородов применяются технологии нагнетания воды через сеть скважин, введение в продуктивные пласты специальных растворов. Откачка углеводородов ведет к развитию динамических депрессионных воронок. Важным фактором является высокая разбуренность, наличие большого количества брошенных буровых скважин неизвестного состояния: 3367 в Тюменской области, 450 – в Оренбургской области, 300 – в Краснодарском крае, 400 – на Сахалине [Кондратенко и др., 2011]. Коррозия и разрушение устьевого оборудования и обсадных колонн, потеря со временем внутрискважинной, заколонной и межколонной герметичности на старых скважинах приводит к межпластовым перетокам флюидов, в том числе в районах ПЯВ радиоактивных флюидов, изменяя гидродинамический и гидрохимический составы подземных вод. На месторождениях высокую актуальность приобретает проблема специального горного отвода вокруг объектов ПЯВ с целью охраны добываемого углеводородного сырья от радиоактивного загрязнения [Костарев, Яковлев, 2009].

Насколько открыты полости взрывов, каково их влияние на вмещающие породы и подземные флюиды? Как влияют современные технологии добычи углеводородов, сети

эксплуатируемых и брошенных скважин на состояние геотехногенных систем «полость взрыва ПЯВ – геологическая среда»? Есть ли вероятность загрязнения добываемых сегодня нефтепродуктов техногенными радионуклидами? В открытой печати эти вопросы не получили широкого обсуждения. Исследования геотехногенных систем «полость взрыва ПЯВ – геологическая среда» еще актуальны в связи с проблемой подземного захоронения радиоактивных отходов (РАО). Полости ПЯВ в соленосных толщах, предназначенные для хранения углеводородов, могут быть изучены в качестве аналогов подземных могильников РАО, поскольку уже на протяжении 25–40 лет они, по сути, являются пунктами размещения особых ядерных отходов в геологической среде с замедленным (затрудненным) водообменом [Лаверов и др., 1994, 2003]. Хранение и надежное безопасное захоронение РАО давно стали общепризнанной суперпроблемой, ставящей в зависимость от нее развитие самой атомной промышленности [Лаверов и др., 1994].

Вопрос о том, что происходит в геологической среде объектов ПЯВ по прошествии более четверти века остается открытым.

Несмотря на проведенные исследования состояние большинства ПЯВ остается мало или вовсе неизученными. На территории России 51 из 85 ПЯВ были проведены в пределах криолитозоны, где многолетнемерзлые породы отличаются низкой устойчивостью к внешним воздействиям [Качурин, 1961, Алексеева и др., 2006, Григорьев и др., 2009]. Вопрос о современном состоянии объектов ПЯВ, расположенных в сложных геологических и криогидрогеологических условиях Севера России, и связанных с ними экологических рисков остается открытым и сейчас по прошествии более четверти века после взрывов. Для поиска ответа на этот вопрос поставлена цель – **создать концептуальную геоэкологическую модель геотехногенной системы «полость взрыва – вмещающая геологическая среда … поверхность земли» и определить основные индикаторы переноса радионуклидов и сопутствующих элементов в этой системе.**

Для достижения поставленной цели решались **задачи:**

1. Детализировать свойства вмещающей геологической среды: особенности литологического строения, развитие тектонических структур, проявления магматизма, распространение водоносных горизонтов и многолетней мерзлоты, имеющие большое значение для энерго- и массообмена в геотехногенной системе «полость взрыва – вмещающая геологическая среда … поверхность земли» на основе опубликованных и картографических материалов.

2. Определить размеры механического разрушения вмещающих горных пород при ПЯВ, проведенных на территории Якутии, путем расчетов на основе эмпирических [Адушкин, Спивак, 2007] физических формул.

3. Выявить существующие в настоящее время неоднородности в геологической среде районов ПЯВ, в т.ч. флюидопроницаемые геоструктуры, разработать геоэлектрические модели районов ПЯВ путем зондирования методом переходных процессов (ЗМПП).

4. Определить содержание и характер распределения естественных и техногенных радионуклидов, макро- и микроэлементов в компонентах природной среды (поверхностных водах, подземных рассолах, донных отложениях, почвах и растениях) фоновых участков и районов ПЯВ с помощью комплекса физико-химических методов анализа.

5. На основе анализа геологических, криогидрогеологических условий районов, расчетных моделей механического разрушения при взрывах, геоэлектрических моделей геологической среды и радиоэкогехимических данных разработать синтезированную концептуальную геоэкологическую модель системы «полость ПЯВ - геологическая среда ---- поверхность земли»

**Объектами изучения** выбраны районы 10-ти ПЯВ общей мощностью в 138.9 кт в ТЭ, проведенных в Якутии в 1974-1987 гг. на глубинах от 98 м до 1.5 км (рис.7). Сложные гетерогенные условия вмещающей геологической среды Сибирской платформы: *наличие древних и подновленных тектонических разломов, разбивающих геологическую среду на ряд блоков, пластовых трапповых тел и кимберлитовых трубок, контактные зоны которых отличаются высокой флюидопроницаемостью, горизонтов с напорными подземными рассолами, распространение сплошной многолетней мерзлоты*, а также добыча алмазов и углеводородного сырья в этих районах обусловили высокую актуальность изучения геотехногенных систем этих ПЯВ.

**Личный вклад.** В работе использованы оригинальные материалы автора, собранные в районах 10-ти ПЯВ и фоновых участков на территории Якутии во время полевых работ 2008-2012 гг. в ходе выполнения проектов НИР по государственному заказу: - № 43 (76-08) «Разработка проекта специального горного отвода на объектах мирных подземных ядерных взрывов «Кристалл» и «Кратон-3» (2008-2009 гг.); - № 22-88/10 «Обследование радиоэкологической обстановки в местах проведения ПЯВ на Средне-Ботуобинском месторождении (Мирнинский район)»(2010 г.); - № 21-87/10 «Разработка системы мониторинга радиационной и гидрологической обстановок в зоне ПЯВ» (2010-2011 гг.); - № 23 «Оценка загрязнения искусственными радионуклидами подземных вод в зоне ПЯВ «Кристалл» (Мирнинский район)» (2012 г.), ответственным исполнителем которых была автор. Постановка научных задач, в том числе геофизической, проведена автором. Полевые, камеральные и лабораторные работы организованы автором, при этом полевые

радиометрические, гамма-спектрометрические измерения и отбор проб, пробоподготовка проводились автором лично, геофизическое зондирование проведено специалистами ИНГГ СО РАН и НПГГА «Луч» при участии автора. С помощью GIS-методов автором созданы GIS-базы данных, полученных в ходе НИР, на основе спутниковых снимков Landsat. Интерпретация оригинальных радиозокогеохимических и геофизических данных, написание научных статей, отчетов, разработка практических рекомендаций выполнены автором.



Рис.7. Схема расположения объектов подземных ядерных взрывов (ПЯВ) на Сибирской платформе (тектоническая схема Сибирской платформы по Микуленко К.И. и Старосельцеву В.С.[Геология..., 1981])

Примечание: СБНГКМ - Среднеботубинское нефтегазоконденсатное месторождение, красными точками показаны объекты ПЯВ, выбранные для изучения в данной работе.

**Фактический материал:** В работе использованы результаты ЗМПШ на 37-ми пикетах, всего не менее 10 серий измерений на каждом пикете, каждая из которых представляла собой усреднение от временного ряда, включавшего 50 пар переходных

**Таблица 6. Основные параметры\* объектов ПЯВ**

№ п/п	№ р**	Дата	Название и № боевой скважины	Назначение	Мощность, кт в ТЭ	Глубина, м	$H_{п},$ м/кт <sup>1/3</sup>	Rп, м	Нсто, м	Роз, м
1	409	02.10.1974	„Кристалл“	СП	1.7	98	82	12	98	180-240
2	452	05.11.1976	„Ока“ Скв. 42	ПНО	15	1520	616	25-28	152-223	240-490
3	490	09.08.1978	„Кратон-4“	ГСЗ	22	574	205	29-32	186-249	420-560
4	492	24.08.1978	„Кратон-3“	ГСЗ	22	577	206	29-32	186-249	420-560
5	500	08.10.1978	„Вятка“ Скв. 43	ПНО	15	1529	620	25-28	152-223	370-490
6	534	08.10.1979	„Шексна“ Скв. 47	ППГ	15	1541	625	25-28	152-223	370-490
7	598	10.10.1982	„Нева-1“Скв. 66	ПНОПГ	15	1501	609	25-28	152-223	370-490
8	679	07.07.1987	„Нева-2“ Скв. 68	ПНОПГ	15	1527	619	25-28	152-223	370-490
9	681	24.07.1987	„Нева-3“ Скв. 61	ПНОПГ	15	1515	614	25-28	152-223	370-490
10	684	12.08.1987	„Нева-4“ Скв. 101	СЕ	3.2	815	553	15	90-120	220-290

*Сокращения:* СП – для создания плотины; ГСЗ – как источник волн для геосейсмозондирования; ПНО – для повышения нефтеотдачи продуктивного пласта; ППГ – для повышения притоков газа; ПНОПГ – для повышения нефтеотдачи и притоков газа из продуктивного пласта; СЕ – для создания подземной емкости.  $H_{п}$  – приведенная глубина, м/кт<sup>1/3</sup>; Rп – радиус полости взрыва, м; Нсто – высота столба обрушения, м; Роз – радиус откольной зоны на поверхности

*Примечание:* \* - зоны механического воздействия МПЯВ получены расчетным путем на основе экспериментальных формул. \*\* - номер из общего реестра ядерных взрывов в СССР.

характеристик от разнополярных импульсов, т.е. общее число накоплений составляло не менее 37000.

В работе использованы данные 5494 полевых измерений радиационного фона с помощью гамма-спектрометра МКС-АТ6101Д, радиометра СРП-6108-01. Коллекция проб состоит из 298 проб донных отложений, 41 почв, 58 растительности (хвоя и хвойные узлы лиственницы (*Larix sibirica* Mayr.), мхи и лишайники (род *Cladina*, род *Dicranum*, *Hylocomium*), ягода (брусника и голубика, род *Vaccinium*), грибы), 6 проб рыбы. Проведен отбор 217 проб поверхностных и грунтовых вод и 39 проб подземных рассолов. Кроме того, изучался состав 6-ти проб цеолитов из геохимического барьера у объекта «Кратон-3», 3 пробы бурового шлама из района объекта «Нева-2».

Методом рентгено-флюоресцентного анализа на синхротронном излучении на ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН выполнено 14525 элементо-определений, методом высокоточной  $\gamma$ -спектрометрии на полупроводниковых детекторах 1404 определений содержания естественных и искусственных радионуклидов; 169 определений содержания  $^{90}\text{Sr}$  с помощью  $\beta$ -радиометрии после предварительного концентрирования радиохимическим методом; 106 определений содержания изотопов  $^{238}\text{Pu}$  и  $^{239,240}\text{Pu}$  с помощью  $\alpha$ -спектрометрии после предварительного концентрирования радиохимическим методом; 256 определений активности трития методом жидкостно-сцинтилляционной спектрометрии, 4572 элементо-определений с помощью атомно-эмиссионного и масс-спектрометрического анализов на индуктивно-связанной плазме, 196 определений  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  изотопных соотношений с помощью масс-спектрометрического анализа на индуктивно-связанной плазме.

**Научная новизна работы** заключается в том, что в работе впервые обращено внимание на ситуацию в недрах подземных ядерных взрывов, проведенных в Якутии в 1974-1987 гг., и поставлена цель создать модель взаимодействия полостей взрывов и вмещающей геологической среды. Ранее основное внимание исследователей обращалось на оценку радиационной обстановки и дозовых нагрузок на поверхности земли, а особенно – на оценку радиоактивного загрязнения ландшафтов при аварийных взрывах «Кратон-3» и «Кристалл», перераспределению и миграции радионуклидов из этих загрязненных участков под действием экзогенных процессов.

Разработанная соискателем концептуальная геоэкологическая модель геотехногенной системы «полость взрыва – вмещающая геологическая среда – поверхность земли» показала, что в данной системе идет постоянный обмен энергией и веществом. В работе с приведением большого количества измеренных данных опровергается ранее существовавшее представление о том, что многолетняя мерзлота является надежным барьером, удерживающим радионуклиды, включая тритий, как и представление о пластах каменной

соли, как о хороших изоляторах, препятствующих распространению радионуклидов в недрах, в силу пластичности и способности залечивать трещины.

**Практическая значимость работы:** Для Министерства охраны природы Республики Саха (Якутия) созданы: 1) топографическая карта района аварийного ПЯВ «Кратон-3» в масштабе 1:2000, необходимая для проведения рекультивационных и других природоохранных мероприятий;

2) проект специального охранного горного отвода объекта «Кратон-3», в пределах которого рекомендован запрет хозяйственной деятельности (с обоснованием);

3) оцифрованные ГИС-базы данных районов ПЯВ на основе космоснимков Landsat, в которые внесены все полученные данные полевых измерений и лабораторных анализов, с возможностью постоянного обновления.

4) система радиэкологического мониторинга районов ПЯВ с обоснованием ключевых участков, периодичности и густоты сети наблюдений.

Разработанные соискателем система радиэкологического мониторинга и цифровые ГИС-базы данных уже используются как основа для государственного экологического мониторинга районов ПЯВ.

#### **Основные защищаемые положения:**

1. Верхний слой, соответствующий ранним временам ( $t < 2$  мс) регистрации при зондировании методом переходных процессов с измеренными кажущимися удельными электрическими сопротивлениями от 30 до 1200 Ом·м интерпретирован как слой многолетнемерзлых пород. В пределах ослабленных зон вокруг боевых скважин, расположенных на низких склонах речных долин, наблюдается деградация многолетней мерзлоты, которая проявляется снижением удельного электрического сопротивления ( $< 100$  Ом·м), уменьшением ее мощности и развитием термокарстового полигонально-холмистого «байджарахового» рельефа.

2. Разрушение при ПЯВ сплошности вмещающей геологической среды привело к формированию флюидопроницаемых ослабленных зон вокруг боевых скважин радиусом до 200 м, которые до сих пор сохраняют свои проводящие свойства, в том числе для подъема по ним напорных подземных рассолов на 260-300 м.

3. Индикаторами переноса радионуклидов в системе **«полость взрыва – геологическая среда … поверхность земли»** служат: увеличение активности  $^3\text{H}$  – в 2-34,  $^{90}\text{Sr}$  – в 2-16,  $^{239+240}\text{Pu}$  – в 10-25 раза выше регионального фонового уровня; повышение концентрации лантаноидов, Y, Co, Be в несколько раз по сравнению с местным фоновым уровнем; снижение изотопного соотношения  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  до 126 (вместо естественного 138). В области распространения напорных подземных рассолов индикатором выхода подземных

флюидов на поверхность земли служит появление соленых (с минерализацией, как правило, выше 1 г/л) хлоридных поверхностных вод, тогда как районам характерны пресные гидрокарбонатные, гидрокарбонатно-сульфатные поверхностные воды.

4. Полости ПЯВ вне зависимости от геологических условий, глубины и режима их проведения: штатного или аварийного являются открытыми геотехногенными системами. Перенос радионуклидов в системе «**полость взрыва – геологическая среда … поверхность земли**» осуществляется через флюидопроницаемые геоструктуры: техногенные – 1) ослабленные зоны вокруг боевых скважин с талыми «окнами» в многолетнемерзлом слое; 2) потерявшие герметичность геологоразведочные скважины в районах ПЯВ; естественные, – 3) подземные водоносные горизонты; 4) тектонические разломы, в т.ч. подновленные при ПЯВ; 5) трещиноватые контактные зоны развития траппов и кимберлитовых трубок. Каждая из этих геоструктур количественно характеризуется геофизическими и геохимическими параметрами (удельным электрическим сопротивлением пород, активностью радионуклидов, концентрацией элементов и анионов).

#### **Апробация работы и публикация**

Работа выполнена в ТПУ и ИГМ СО РАН в рамках РЦП «Охрана окружающей среды Республики Саха (Якутия) на 2007-2011, 2012-2016 гг.»

Положения работы выносились автором на обсуждение тематических региональных (Якутск, 2010, 2011), всероссийских («Радиохимия», ГК РОСАТОМ, Москва, 2009, Димитровград, 2012), международных ("СИ-2008", «ГЕО-Сибирь-2009, 2010», Новосибирск, «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека», Томск, 2013, «SGEM» Албена (Болгария), 2011, «Мониторинг ядерных испытаний и их последствий», Курчатов (Казахстан)), 2012) конференций и совещаний.

По проблемам геохимии техногенеза и радиоэкологии опубликовано 94 работы, из них 21 статья – в журналах, входящих в список ВАК РФ, 5 статей – в зарубежных реферируемых журналах, а также 8 статей – в региональных журналах, 1 монография в соавторстве, 2 коллективные монографии. По радиоэкологическим проблемам объектов ПЯВ опубликовано 8 статей в рецензируемых российских журналах, 3 статьи – в реферируемом Вестнике Национального ядерного центра Республики Казахстан.

**Объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, восьми глав и заключения общим объемом 291 страниц машинописного текста, иллюстрируется 111 рисунками и 51 таблицей, также тремя приложениями. Список литературы включает в себя 248 наименований.

Первое защищаемое положение рассмотрено в главе 5, раздел 5.1., второе защищаемое положение в разделе 5.2, третье защищаемое положение в разделе 5.3. и в главе 6. Четвертое защищаемое положение обосновывается в главах 5,6 и 7.

**Благодарности.** Автор выражает искреннюю признательность бывшему руководителю отдела Министерства охраны природы Республики Саха (Якутия) Аргуновой Т.В., главному специалисту Ушницкому В.Е., за помощь в экспедиционных работах - ОАО «Алмазы Анабара», Амакинскую ГРЭ, НППГА «Луч», за аналитическую работу – Мельгунову М.С., Бондаревой Л.Г., Макаровой И.В. Николаевой И.В. и др.сотрудникам АЦ ИГМ, ФГУН СПб НИИРГ и лично Репину В.С., РАЭЦ ГУП МосНПО «Радон» и лично Минигалиеву Р.М., за полезное обсуждение задач - соавторам Кожевникову Н.О., Антонову Е.Ю., Разворотневой Л.И., Журавской А.Н., Дементьеву В.Н., за консультации - Ножкину А.Д., Гаськовой О.Л., Боброву В.А., Голубову Б.Н., Роговому В.М., Чернышеву А.К., Дубинину В.П., Бортниковой С.Б., Тананаеву И.Г. Автор благодарит научного консультанта Рихванова Л.П. за огромную помощь в работе.

**Благодарности.** Искренний интерес к результатам исследований руководителя отдела радиационной безопасности Министерства охраны природы Республики Саха (Якутия) Аргуновой Т.В., главного специалиста Ушницкого В.Е. оказали большую поддержку соискателю при постановке задач и выборе подходов для их решения, за что автор выражает им большую признательность. Автор благодарит дирекцию и Ученый Совет Института, которые способствовали выполнению работы. С особым теплом автор благодарит помощников в экспедиционных работах: руководство и работников ОАО «Алмазы Анабара», Мирнинской и Амакинской ГРЭ, Удачинского ГОКа АК АЛРОСА, НППГА «Луч» Плотникова А.Е., Васильева Я.Н., Захарова В.Е., моих дорогих помощников-полевиков, с которыми плечо к плечу ходили в трудные маршруты, доверяя друг другу наши жизни: Данилова И.Я., Берденникова А.Р., Данилюка Л.М., Жевковича В.Н. Аналитические исследования, результаты которых являются основополагающими в данной работе, были выполнены благодаря трудам к.г.-м.н. Мельгунова М.С., к.х.н. Бондаревой Л.Г., Макаровой И.В., Колмогорова Ю.П., Мирошниченко Л.В., к.х.н. Николаевой И.В., к.х.н. Палесского С.В., к.х.н. Бадмаевой Ж.О. и другим сотрудникам АЦ ИГМ СО РАН, за что автор выражает большую признательность. Сотрудничеству, помощи и человеческое участие соавторов проф., д.г.-м.н. Кожевникова Н.О., д.ф.-м.н. Антонова Е.Ю., к.х.н. Разворотневой Л.И., проф., д.б.н. Журавской А.Н., к.т.н. Дементьева В.Н., помогли состояться настоящей работе, за что им автор очень благодарна. За весьма полезные консультации, критические замечания автор признательна в.н.с. д.г.-м.н. Ножкину А.Д., проф., д.г.-м.н. Бортниковой С.Б., д.г.-м.н. Гаськовой О.Л., Руденко В.В., к.г.-м.н. Боброву В.А., к.г.-м.н. Голубову Б.Н., д.г.-м.н.

Роговому В.М., д.ф.-м.н.Чернышеву А.К., д.ф.-м.н. Дубинину В.П., член.кор. РАН, д.х.н. Тананаеву И.Г. Автор благодарит ФГУН СПб НИИ Радиационной гигиены и лично д.б.н. Репина В.С., зам.директора РАЭЦ ГУП МосНПО «Радон» д.х.н. Минигалиева Р.М. за проведение внешнего контроля аналитических данных и обсуждение результатов в знак дружественной поддержки проводимой работы. Автор благодарит научного консультанта проф.,д.г.-м.н. Рихванова Л.П. за огромную помощь в работе.

## Глава 1. Методика исследований

*Расчетная модель физико-механического воздействия ПЯВ* на вмещающую геологическую среду построена с помощью экспериментальных физических формул [Адушкин, Спивак, 2004, 2007, Механический..., 1971]

Вертикальная скважина с широким диаметром от 30 см до 43 см, в которой закладывалось ЯВУ и производился взрыв, называется боевой. Вокруг центра взрыва образуется *котловая полость* за счет расплавления и испарения пород (полость взрыва).

При условии превышения прочности пород на сжатие  $\sigma$  (Па) над пластовым давлением  $\rho gH$  (Па):  $\sigma > \rho gH$ , где  $\rho$  – плотность пород ( $\text{г/см}^3$ ),  $g$  -  $9.8 \text{ м/с}^2$ ,  $H$  – глубина (м) радиус полости оценивается экспериментально полученной формулой

$$R_{\text{п}} = E^{1/3} \frac{354,6}{(\rho \cdot C^2 \sigma)^{1/9}} \quad (1)$$

где  $R_{\text{п}}$  – радиус полости взрыва (м),  $E$  – мощность взрыва (кт в ТЭ);  $\rho$  – плотность пород ( $\text{г/см}^3$ ),  $C$  – скорость звука (м/с);  $\sigma$  – прочность пород на сжатие (Па) [Адушкин, Спивак, 2007].

Вокруг под действием ударной волны возникает *зона дробления*, радиус  $R_{\text{дроб.}}$  оценивается по формуле (2), а радиус *зоны трещиноватости* – по формуле (3):

$$R_{\text{дроб.}} = R_{\text{полости}} \left( \frac{\rho C_p^2}{4\sigma_*} \right)^{1/3} \quad (2) \quad R_{\text{трещин}} = R_{\text{дробления}} \left( \frac{\sigma_*}{2(\sigma_{\text{откол}} + \rho gH)} \right)^{1/2} \quad (3)$$

$\sigma_{\text{откол}}$  - прочность пород на откол или растяжение, в рассматриваемом случае приравнен  $\sigma_{\text{откол}} = 0.01 \text{ ГПа}$ .

На определенном этапе развития взрыва в центре взрыва падает давление и горный массив начинает двигаться внутрь (навстречу полости, разрушая полость). Этот эффект типичен для взрывов в прочных породах, не очень явно выражен для малопрочных грунтов и отсутствует в пластических грунтах (глина, соль). Например, по расчетам при взрыве «Кратон-3» в промежуток времени 30-60 мс в 100 м от центра взрыва давление резко упало и на время 70-80 мс «наступило» возвратное движение массива, т.е. грунт начал двигаться внутрь (навстречу полости), скорость стала отрицательной. На расстоянии в 200 м давление падает и идет возвратное движение грунта в промежутке времени с 55 до 90 мс. В результате формируется *зона камуфлетности* (зона со сжимающими напряжениями и повышенной плотностью) в интервале 3-10  $R_{\text{полости}}$  от центра взрыва, которая в последующем препятствует выходу радиоактивности из полости взрыва. Эта *зона камуфлетности* и частично *полость взрыва* разрушаются на поздних временах за счет прихода волны

разгрузки от свободной поверхности (сотни мс) и за счет образования *столба обрушения* по действием силы тяжести (секунды-часы).

Волна разгрузки на границе литосфера- атмосфера образует *откольную зону* с глубиной разрушений пород примерно  $10-30 \text{ м/кт}^{1/3}$  и округе  $300-400 \text{ м/кт}^{1/3}$ , т.е. радиусом примерно  $150-200 \text{ м/кт}^{1/3}$  на дневной поверхности вокруг устья боевой скважины. В диапазоне глубин заложения взрыва  $\sim 10-30 \text{ м/кт}^{1/3}$  характерен откол поверхностного слоя грунта, при этом эпицентральная часть испытывает большее воздействие, нежели краевые участки. При взрыве «Кратон-3» при приведенной глубине  $206 \text{ м/кт}^{1/3}$  глубина зоны откола от дневной поверхности составила около 120 м. Площадь откольной зоны ПЯВ «Кратон-3» на дневной поверхности описывается окружностью в  $300-400 \text{ м/кт}^{1/3}$  или 840 – 1120 м, или радиусом примерно 420-560 м вокруг устья боевой скважины.

По мере увеличения глубины заложения ЯВУ и приведенной глубины взрыва  $\gg 200 \text{ м/кт}^{1/3}$  размеры и интенсивность откольной зоны уменьшаются.

Высота столба обрушения оценивается в (6-8)  $R_{\text{полости}}$  [Адушкин, Спивак, 2007].

Устья боевых скважин изучаемых объектов ПЯВ и их эпицентры практически совпадают в силу вертикальности стволов боевых скважин и пологого рельефа. Территория в пределах зоны откола – в радиусе 200-250-метровой вокруг устьев боевых скважин, названа площадкой ПЯВ. Механическое разрушение горных пород и термическое воздействие ПЯВ приводит к формированию флюидопроницаемой вертикальной ослабленной зоны вокруг боевой скважины, состоящей из полости взрыва, развитых вокруг полости зоны дробления и зоны трещинообразования, выше – столба обрушения, у поверхности земли – из откольной зоны. Разрушение конструкции боевой скважины и ее дальнейшая коррозия в поствзрывной период – также становится частью этой вертикально ориентированной флюидопроницаемой геоструктуры – ослабленной зоны вокруг боевой скважины.

По результатам механического разрушения при взрывах в зависимости от глубины заложения и мощности различают 4 вида ПЯВ: камуфлетные, неполного камуфлета, рыхления и экскавационные (на выброс) (рис.8). Максимальные разрушения сплошности геологической среды ориентированы в направлении дневной поверхности. При полном камуфлетном взрыве столб обрушения не достигает зоны откола (рис.8, а), тогда как при неполном – эти зоны смыкаются (рис.8, б), что приводит к образованию деформации поверхности эпицентра и к слабому истечению котлового газа. Экспериментально выявлено, что минимальная приведенная глубина, необходимая для обеспечения камуфлетности взрыва, должна быть равна  $80-95 \text{ м/кт}^{1/3}$  в зависимости от типа вмещающих пород. При меньшей глубине развивается *взрыв рыхления* (рис.8, г): столб обрушения достигает поверхности земли, массив пород выше центра взрыва подвергается перемещению, создавая

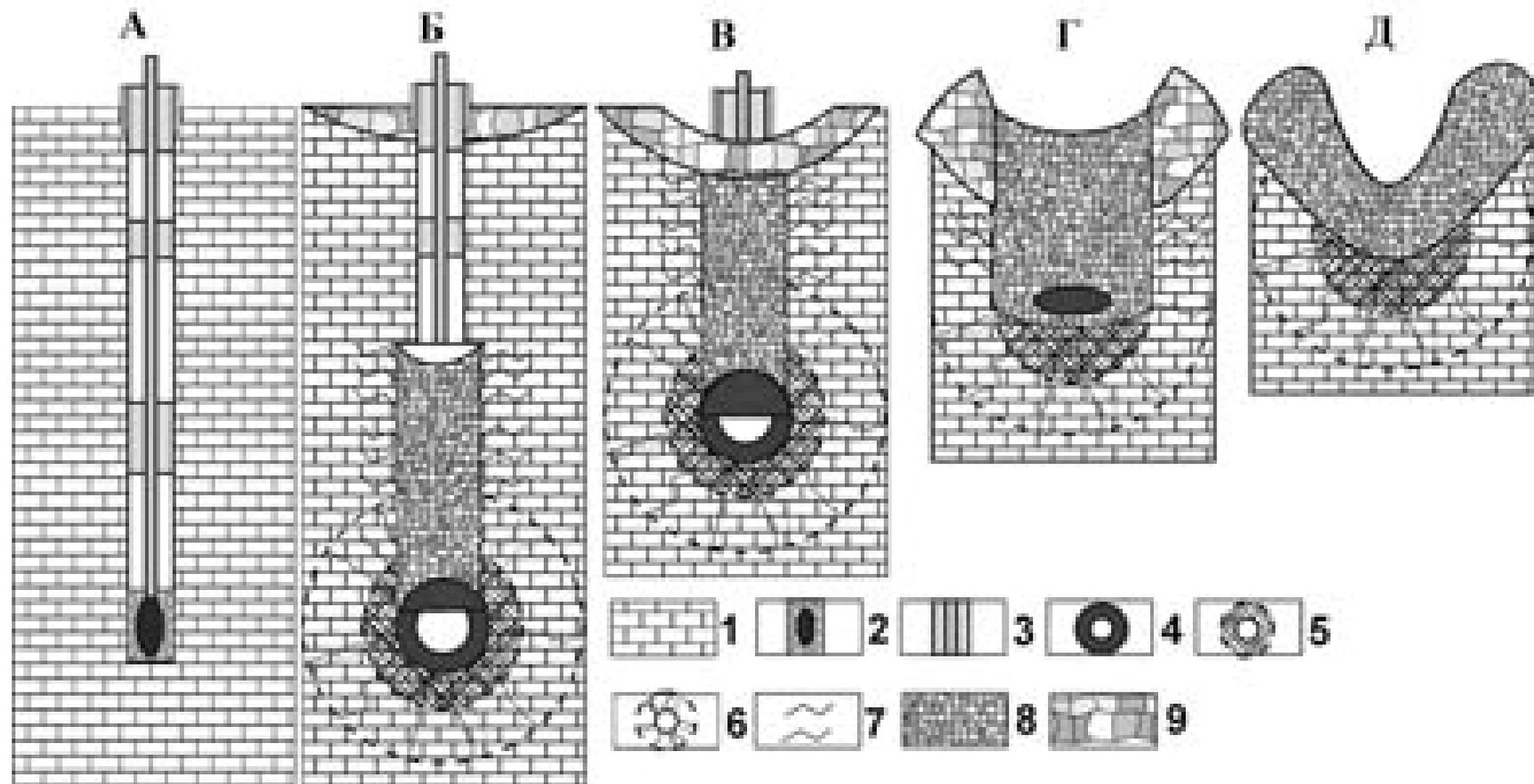


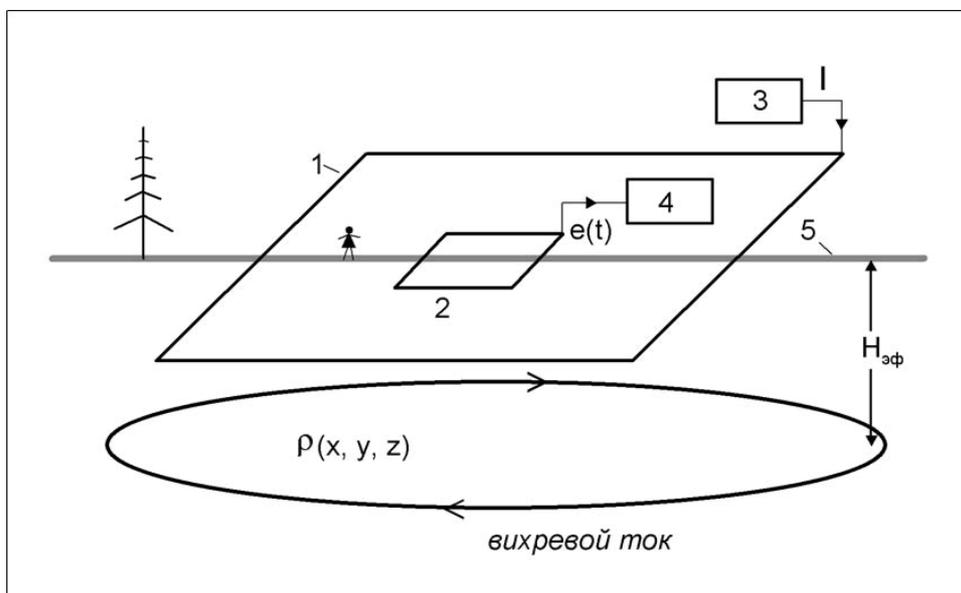
Рис.8. Схема боевой скважины (А), виды МПЯВ: камуфлетный (Б), неполный камуфлетный (В), на рыхление (Г), на выброс (экскавационный) (Д).

Условные обозначения: 1 - вмещающие горные породы, 2 - завеска ЯВУ в боевой скважине, 3 - герметизация скважины цементными пробками, 4 - полость взрыва, окруженная расплавленной породой, 5 - зона дробления, 6 - зона трещиноватости, 7 - трещины, примыкающие к столбу обрушения, 8 - столб обрушения, 9 - зона откола у поверхности земли.

холмы вспучивания и (или) провальные воронки в зависимости от исходных физико-химических свойств горных пород, полость взрыва разрушается, но не вскрывается, происходит штатное истечение котлового газа (1- 4 % от общей активности). При еще малой глубине завески ЯВУполучается взрыв на выброс со вскрытием полости взрыва (рис.8, д).

Экспериментальная модель геоэлектрического строения недр районов ПЯВ разработана зондирования методом переходных процессов (ЗМПП) путем полевых измерений ЭДС вихревого тока с расчетом кажущегося удельного электрического сопротивления (УЭС) пород от времени прихода сигнала, с последующим решением обратной задачи – обработки данных в камеральных условиях, подбор модели УЭС по глубине разреза.

В пределах Тунгусской синеклизы и Непско-Ботуобинской антеклизы Сибирской платформы развиты подземные пласты, насыщенные рассолами, по сути, являющихся природными электролитами с высокой электропроводностью, что вкупе с многолетней мерзлотой, где мерзлым и сухим породам присуще высокое удельное электрическое сопротивление, обеспечивает высокую геоэлектрическую контрастность геологической среды. Это обусловило постановку ЗМПП на объектах «Кристалл» и «Кратон-3» по традиционной методике [Ванчугов, Кожевников, 1998](рис.9). В методе ЗМПП используется установка, включающая незаземленные генераторную и приемную петли (рис. 9).



**Рис.9.** Схема измерений на пикете методом переходных процессов (ЗМПП): 1 – генераторная, 2 – приемная петли; 3 – генератор импульсов тока; 4 – измеритель; 5 – поверхность земли.

В генераторной петле с помощью генератора формируются прямоугольные импульсы тока  $I$ , разделенные паузой. В момент выключения тока в генераторной петле в окружающем ее пространстве возникает вихревое электрическое поле, под действием

которого в поверхностном слое возникают вихревые токи. В дальнейшем эти токи распространяются по вертикали и горизонтали, затухая по величине. Скорость продвижения и затухания вихревых токов зависит от пространственного распределения удельного электрического сопротивления  $\rho(x, y, z)$ , поэтому вторичное магнитное поле, создаваемое вихревыми токами, содержит информацию о геоэлектрическом строении земли. Обычно измеряют не само магнитное поле, а ЭДС  $e(t)$ , наводимую при его изменении в приемной петле. Эта ЭДС, как правило, нормированная на ток в генераторной петле, называется переходной характеристикой установки.

Измерения переходных характеристик на участках мирных промышленных ядерных взрывов (ПЯВ) «Кристалл» и «Кратон-3» выполнены симметричными установками «петля в петле». В этом случае точка записи совпадает с центром установки. Использовались квадратные петли. Поскольку априорная информация о геоэлектрическом строении исследуемых участков отсутствовала, размеры установок и расстояние между соседними зондированиями выбирались на основе самых общих соображений. Размер генераторной петли при работах на участке «Кристалл» составляли 100 м x 100 м, на участке «Кратон-3» – 200 м x 200 м. В обоих случаях размер приемной петли составлял 50 м x 50 м. Большой размер генераторной петли на участке «Кратон-3» был выбран исходя из того, что, как правило, увеличение размеров петли обеспечивает больший момент, и, как следствие, большую глубину зондирования. Для раскладки генераторных петель использовался медный провод сечением 6 мм<sup>2</sup>, приемных петель – сечением 1 мм<sup>2</sup>. Ток в генераторной петле составлял 1.7–7.5 А. Использовалась электроразведочная станция SGS-TEM с двумя телеметрическими измерителями «Пикет-2». Станция включает следующие блоки: 1) бортовой модуль в составе компьютера класса notebook и адаптер линии связи; 2) устройство УС-2 синхронизации и измерения тока; 3) два телеметрических измерителя «Пикет-2». Один измеритель использовался для регистрации ЭДС  $e(t)$  в приемной петле, второй – для измерения тока  $I$  в генераторной петле.

Для создания импульсов тока в генераторной петле использовалось устройство, разработанное в научно-производственном предприятии геофизической аппаратуры «Луч». Устройство обеспечивает формирование разделенных паузами импульсов тока чередующейся полярности и амплитудой до 40 А. Период повторения импульсов – любой, в зависимости от длительности переходного процесса.

Шаг дискретизации по времени был равен 31 мкс. На каждом пикете производилась не менее 10 серий измерений, каждая из которых представляла собой осреднение временного ряда из 50 пар переходных характеристик от разнополярных импульсов, т.е. общее число накоплений составляло не менее 1000. Начальное время регистрации  $t_{\min}$  составляло в

среднем 0.2 мс [Кожевников, Плотников, 2004] (начальное время регистрации определяет минимальную глубину исследований). Измерялась ЭДС в приемной петле, приведенная к току в генераторной, затем рассчитывалось кажущееся УЭС  $\rho_\tau$  (в Ом·м) по формуле:

$$\rho_\tau(t) = \left[ \frac{IS_g S_u}{e(t) 20\pi\sqrt{\pi}} \right]^{2/3} \left( \frac{\mu_0}{t} \right)^{5/3},$$

где  $t$  – время, с;  $S_g$  и  $S_u$  – соответственно площадь генераторной и измерительной петель, м<sup>2</sup>;  $e(t)$  – ЭДС, индуцируемая в приемной петле, В;  $I$  – ток в генераторной петле, А;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная проницаемость вакуума [Кауфман, Морозова, 1970].

Питание генератора тока осуществлялось от кислотных аккумуляторов напряжением 12 – 24 В. Ток в генераторной петле составлял 1.7–7.5 А. Поскольку в районе исследований отсутствовали промышленные помехи, даже при таком умеренном токе в генераторной петле измерения переходных процессов удалось выполнить до времен порядка 100 – 150 мс, что обеспечило глубинность исследований от 300 до 500 м.

На участке ПЯВ «Кристалл» среднее расстояние между пикетами составляло 200 м, а на участке «Кратон-3» – 400 м.

Количественная интерпретация выполнена в рамках горизонтально-слоистой модели с использованием программ <Unv\_QQ> и <Inv\_QQ> (автор – д.ф.-м.н. Е.Ю. Антонов). Относительные среднеквадратичные расхождения между экспериментальными и модельными данными составляют  $\leq 2.5\%$ . На рис. 10 слева показаны типичные измеренные и модельные кривые кажущегося УЭС от времени, а справа – соответствующие модели распределения УЭС по глубине на выбранных двух пикетах района ПЯВ «Кристалл».

#### Физико-химические методы анализа

Активность трития измеряли методом жидкостно-сцинтилляционной спектрометрии с использованием спектрометра Tri-Carb 2800 (США), время измерения – 500 мин, измерение низкоактивных проб увеличивали – от 720 до 1440 мин. Образцы воды были предварительно отфильтрованы через бумажный фильтр «Синяя лента». После чего пробы отфильтровывались через мембранные фильтры с диаметром пор 0.2 мкм. Для определения активности трития использовали фильтрованные образцы, которые смешивали в

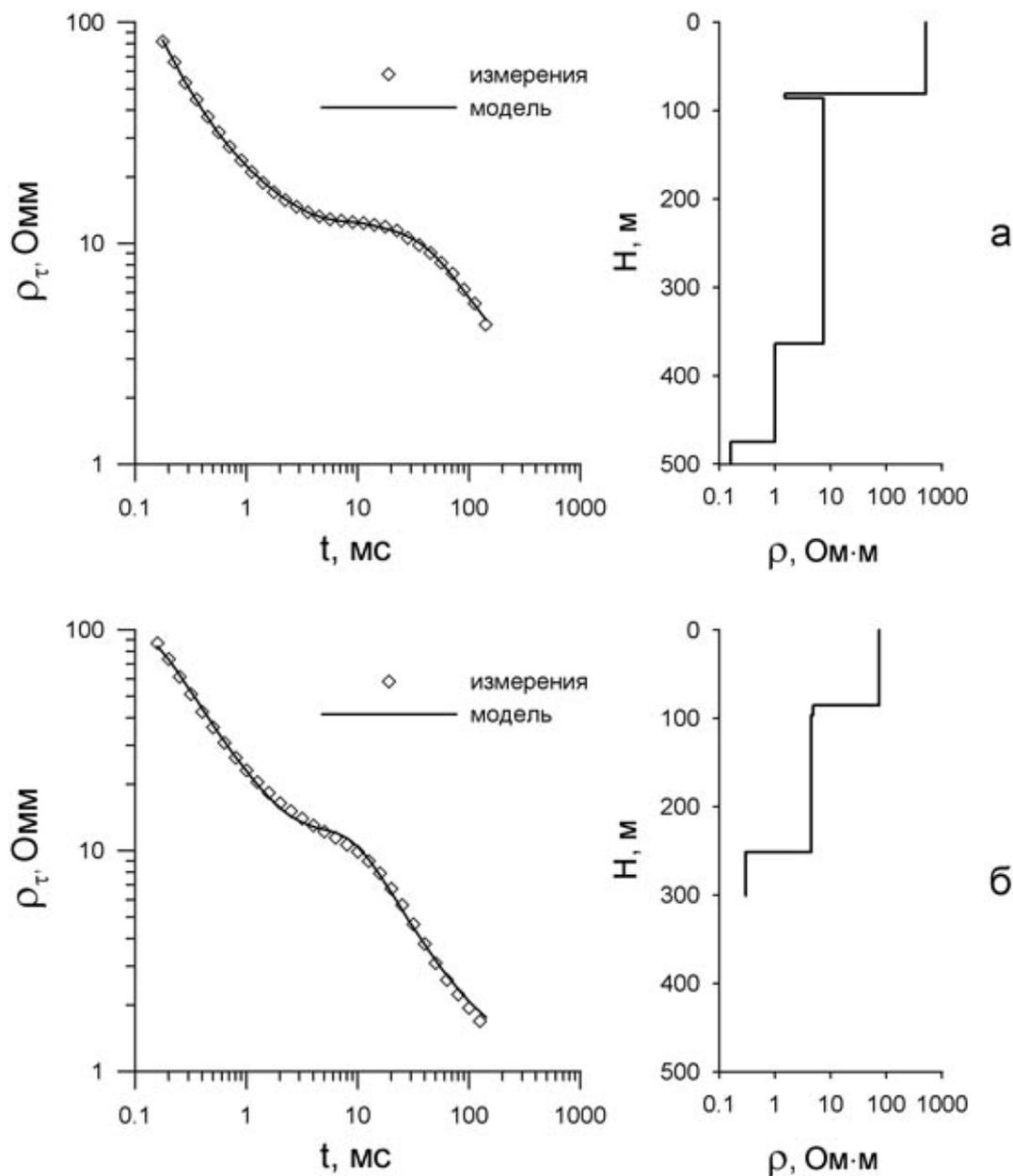


Рис.10. Кривые кажущегося удельного сопротивления (слева) и геоэлектрические модели (справа): *а* – на удалении от эпицентра ПЯВ «Кристалл» (пикет 3), *б* – в эпицентре ПЯВ «Кристалл» (пикет 5).

пластиковых виалах ( $V=20$  мл) с сцинтилляционным коктейлем в соотношении проба: коктейль = 8:12. Приготовленные смеси выдерживались в прохладном темном месте в течение 48 часов для стабилизации. После чего проводили измерения активности трития. При пробоподготовке рассолов применена методика отгонки трития в азеотропной смеси в специально разработанной установке, что позволяло получить чистую пробу, соответствующую требованиям для жидкостно - сцинтилляционной спектрометрии [Bolsunovsky A.Ya., Bondareva L.G., 2003, Бондарева, Помозова, 2009].

Нижний предел обнаружения при накопительном измерении в течение 3 часов – 2 Бк/кг, в течение более 6 часов – 1 Бк/кг. при активности  $^3\text{H}$  более 40 Бк/л относительная

погрешность не превышает 6 %, при активности 10-40 Бк/л – в пределах 10-15 %, при активности до 10 Бк/л относительная погрешность в среднем составляет 34 %. Средняя абсолютная погрешность составляет  $\pm 2.24$  Бк/л. При измерении в течение 12 часов относительная погрешность снижается до 26 % при активности трития < 9 Бк/л.

На 13-ти пробах проведен внешний контроль определения трития в воде силами ФНУ Санкт-Петербургского НИИ радиационной гигиены (проф., д.б.н. В.С. Репин) и МосНПО «Радон» (зам. директора РАЭЦ д.х.н. Минигалиев Р.М.), расхождения не превышали погрешность метода (рис. 11, 12). Результаты показали практически 100 % совпадение данных, все вариации в пределах относительной погрешности метода.

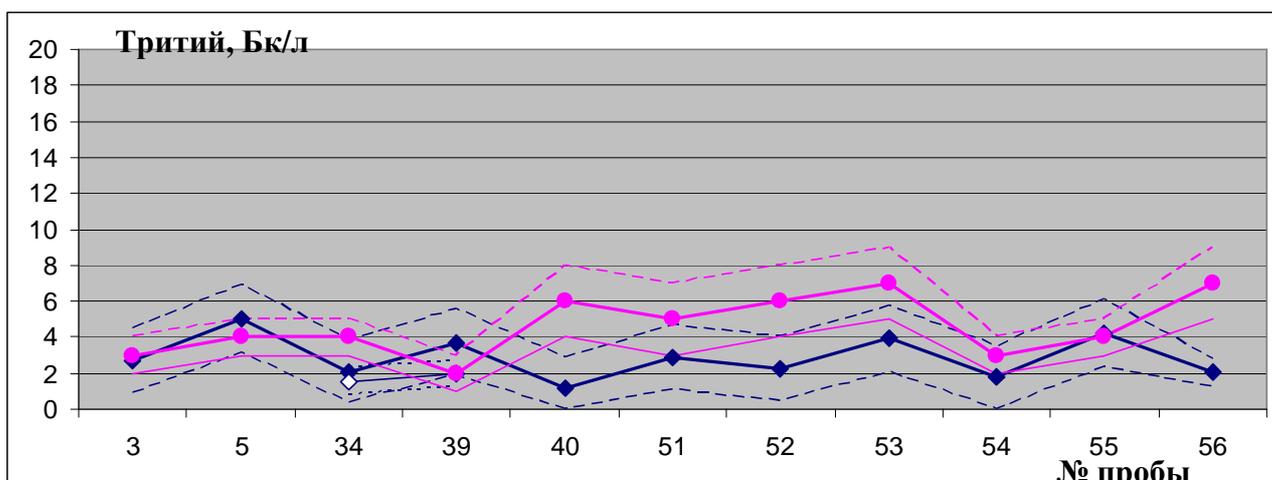


Рис.11. Активность  $^3\text{H}$  в природных водах по нашим данным (розовый цвет), по данным ФНУ Санкт-Петербургский НИИ радиационной гигиены (синий цвет). Прерывистыми линиями показаны коридоры значений в пределах относительной погрешности примененного жидкостно-сцинтилляционного метода определения.

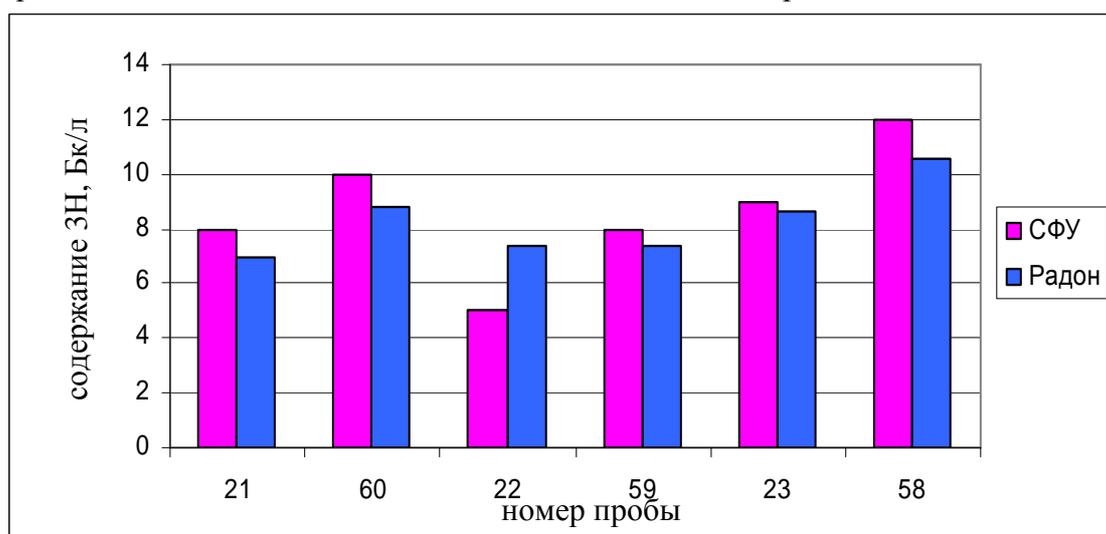


Рис.12. Активность  $^3\text{H}$  в пробах подземных рассолов (с минерализацией > 400 г/л) по данным автора (розовый цвет), по данным МосНПО «Радон» (синий цвет).

При контрольных анализах проб подземных вод с минерализацией выше 400 г/л среднее расхождение между нашими данными и контрольными измерениями МосНПО

«Радон» составило: при активности  ${}^3\text{H} < 10$  Бк/л 18.1 % или  $\pm 1,1$  Бк/л,  $\geq 10$  Бк/л – 11.8 % или  $\pm 1.3$  Бк/л, что соответствует погрешности метода анализа. Максимальное расхождение данных наблюдается в пробем с самой низкой активностью трития на уровне 5-7.4 Бк/л (рис.12).

Для определения общей  $\alpha$ - и  $\sigma$ - активности аликвота образца варьировалась от 200 до 500 мл, в зависимости от содержания солей в пробе. Аликвоты упаривали до получения влажных солей в кварцевых чашках. После чего осадок полностью с помощью дистиллированной воды переносилось в виалы, куда предварительно был добавлен сцинтилляционный коктейль. Пробы перемешивались и выдерживались в прохладном и темном месте для стабилизации сцинтилляции. Биологические образцы (ягоды и грибы) предварительно высушивались досуха при температуре  $80^{\circ}\text{C}$  в сушильном шкафу. После чего высушенные образцы озолялись в муфельной печи при температуре  $450^{\circ}\text{C}$ . Затем полученные пробы тщательно измельчались в ступке. Взвешивались. Из полученных проб отбирались навески 0.2 г, которые смешивались в пластиковых виалах со сцинтилляционным коктейлем. Перед измерением выдерживались в темном и прохладном месте, затем проводилось измерение общей  $\alpha$ - и  $\sigma$ - активности на спектрометре Tri-Carb 2800 (США). нижний предел обнаружения при накопительном измерении в течение 3 часов – 2 Бк/кг, в течение более 6 часов – 1 Бк/кг.

Для определения активности  ${}^{90}\text{Sr}$ ,  ${}^{239,240}\text{Pu}$ ,  ${}^{238}\text{Pu}$  в водных пробах отбирались крупнообъемные (до 80 л) пробы, которые в лабораторных условиях подвергались радиохимическому концентрированию по методике МРСК-Москва-80 [Сухоруков и др., 2004]. Пробы растений, дерна предварительно подвергались озолению со ступенчатым увеличением температуры и поддержанием  $450^{\circ}\text{C}$  в течение 6 часов. Затем, после охлаждения ее до комнатной температуры, в пробу вносили носитель стронция (200 мг в расчете на металл), заливают 200 мл 6 М HCl и кипятят в течение часа при перемешивании, пробу отстаивают, декантируют и проводят повторное выщелачивание, декантацию и промывку. Декантаты и промывные воды объединяют, твердый остаток отбрасывают. Из полученного раствора, доводя pH до 8 аммиаком, осаждают полуторные окислы, которые после фильтрации и промывки отбрасывают. Из оставшегося фильтрата осаждают карбонаты с помощью соли углекислого аммония (10-20 г). Карбонаты фильтруют, промывают и растворяют в минимальном количестве 6 М HCl, после чего проводится контрольное осаждение полуторных окислов добавлением 1 мл  $\text{FeCl}_3$  (10 мг в пересчете на металл). В полученный после фильтрации и промывки раствор вносят носитель иттрия (15 мг в пересчете на металл) и оставляют для достижения изотопного равновесия между  ${}^{90}\text{Y}$  и  ${}^{90}\text{Sr}$ .

Через 14 суток иттрий отделяют от Sr и Ca, и уже в чистом виде осаждают в качестве

оксалата иттрия, который после высушивания и взвешивания измеряют активность  $^{90}\text{Sr}$  по изотопу  $^{90}\text{Y}$  с помощью  $\beta$ -радиометрии на РУБ-01П с использованием низкофонового блока детектирования БДЖБ-06П. Чувствительность метода составляет 0.01 Бк. Относительная погрешность не превышает 10 %. Озоленную и охлажденную до комнатной температуре пробу ~ 20 грамм подвергали двойному выщелачиванию 8 М  $\text{HNO}_3$  в присутствии катализатора  $\text{KBrO}_3$ . В качестве индикатора активности в зависимости от ситуации использовались  $^{242}\text{Pu}$  или  $^{236}\text{Pu}$ . Объединенные фильтраты (осадок отбрасывался) нагревали до  $90^\circ\text{C}$  в присутствии  $\text{NaNO}_3$  (из расчета 205 мг на 100 мл фильтрата) для стабилизации плутония в виде  $\text{Pu}^{4+}$ . Процесс длился до прекращения выделения паров оксида азота. Охлажденный раствор подвергался сорбции анионитом АВ-17-8 в  $\text{NO}^-$  форме. Далее колонки с сорбентом последовательно промывались 100 мл 7.5 М  $\text{HNO}_3$ , 100мл 10 М  $\text{HCl}$ , 50 мл 7.5 М  $\text{HNO}_3$ . Затем плутоний элюировался 25 мл раствора 0.01 М  $\text{HF}$  в 0.035 М  $\text{HNO}_3$ . Полученный раствор упаривали до влажных солей, добавляли 10 мл горячего раствора 1.8 М  $\text{KOH}$  и осаждали плутоний электролизом при  $I=2.0\text{ mA/cm}^3$  в течение 5-ти часов на полированную мишень из нержавеющей стали. После осаждения мишень промывали дистиллированной водой и прокаливали на электрической плите.

Активности изотопов  $\text{Pu}$  определены  $\alpha$ -спектрометрическим способом на одноканальном  $\alpha$ -спектрометре 7184 фирмы EURISYS MEASURES (Франция) с высокоразрешающими полупроводниковыми детекторами типа PLUS 300-15 с активной площадью  $300\text{ мм}^2$  и разрешением 15 кэВ [Сухоруков и др., 2004]. Пределы обнаружения по изотопам  $\text{Pu}$  на уровне  $5 \cdot 10^{-4}$  Бк при времени измерения  $2 \cdot 10^5$  с.  $^{242}\text{Pu}$  и  $^{236}\text{Pu}$  –образцовые растворы, аттестованные в качестве рабочих эталонов 1-го разряда в Федеральном государственном унитарном предприятии «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева» (№ 383/ 03/21369 от 16.07.2003, погрешность аттестации эталонов 4 %). Относительная погрешность не превышает 10%.

Для определения содержания естественных радионуклидов (ЕРЭ):  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{40}\text{K}$  и техногенных радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$  в твердых пробах применена прямая высокоразрешающая полупроводниковая  $\gamma$ -спектрометрия (ВПГС) с колодезным полупроводниковым детектором EGPC 192-P21/SHF 00-30A-CLF-FA фирмы EURISYS MEASURES (Франция) [Мельгунов М.С. и др., 2003]. Активный объем детектора составлял  $200\text{ см}^3$ , разрешение по линии 122 – 1.4 кэВ, размеры колодца –  $21 \times 60$  мм. Благодаря большому рабочему объему и наличию колодца внутри активной области, позволяющему проводить измерения в геометрии близкой к  $4\pi$ , детектор характеризуется высокой эффективностью регистрации гамма-квантов в широком энергетическом диапазоне от 20 до 2000 кэВ. Для определения содержаний изотопов  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  использовалась

методика анализа в малых навесках (1-15 гр.). Исследуемый образец объемом от 1 до 10 см<sup>3</sup> засыпался в специальную кювету и помещался в колодец детектора для измерения. Время измерения, в зависимости от активности определяемых изотопов, составляло от 1-2 до 24 часов [Мельгунов М.С. и др., 2003].

Использование малых навесок для определения активностей радиоизотопов на уровне 0.05-0.5 Бк, что соответствует содержаниям урана в пробе на уровне 0.3-3 мг/кг, накладывает жесткие требования к фону измерительной установки. Для снижения фона спектрометра, обусловленного воздействием внешнего фонового гамма-излучения, применялась комбинированная защита. Её внешний контур представлял собой стандартную защиту из радиационно-чистого свинца толщиной 10 см, усиленную слоем вольфрама (12 мм). Задачей внутреннего контура было дополнительное снижение фона в низкоэнергетической области гамма-спектра ( $E_{\gamma} < 200$  кэВ). Он представлял собой Cd-Cu чехол и располагался вокруг измерительного блока детектора. Для устранения фона, создаваемого гамма-излучающими продуктами распада <sup>222</sup>Rn, детектор располагался в специальной камере с постоянной продувкой атмосферным воздухом, отбираемым с высоты 6 метров над поверхностью земли. Такая конструкция защиты позволила снизить фон спектрометра более чем в 200 раз в сравнении с геометрией при «открытом» детекторе [Мельгунов М.С. и др., 2003].

Ключевым моментом в реализации методики явилось определение коэффициентов эффективности регистрации аналитических линий, по которым рассчитывались содержания изотопов. Использованный алгоритм расчета этих коэффициентов учитывает влияние многих факторов и включает в себя следующие процедуры: оценку вклада фона и фоновых линий; калибровку по геометрии измерения, связанную с необходимостью работы с образцами разных объемов; учет плотности образца, направленный на компенсацию потерь, возникающих при поглощении и рассеянии гамма-квантов, особенно низкоэнергетичных, в материале образца; вычет вклада мешающих линий. Последнее актуально при определении <sup>226</sup>Ra по линии 186.1 кэВ, поскольку на эту линию накладывается излучение линии <sup>235</sup>U – 185.7 кэВ. Разрешения спектрометрического тракта по энергии не хватало для прямого разделения этих линий, поэтому потребовалось введение специальной процедуры выделения доли линии <sup>226</sup>Ra из суммарного пика. Настройка алгоритма определения коэффициентов эффективности регистрации проводилась по набору эталонных образцов равновесного урана, созданных на основе стандартного образца урановой руды УР-47С и особо чистых кварца, угля и древесных опилок. Содержания <sup>238</sup>U в эталонах - 50 мг/кг. Расчет коэффициентов эффективности регистрации показал, что при размещении пробы массой от 1 до 15 грамм внутри колодца эффективность регистрации гамма-квантов с энергиями 46,5 кэВ, 63,3 кэВ и 186,1 кэВ достигает величины 40-60%, а для линии 661,7 кэВ – 12-17%.

Оценка основных метрологических характеристик разработанной методики показала, что воспроизводимость анализа образцов объемом 10 мл, массой от 10 до 15 гр при времени измерения 12 часов и активности определяемых изотопов на уровне 100-120 Бк/кг составила по критерию 2-х сигм  $\pm 5\%$  для  $^{137}\text{Cs}$ ,  $\pm 8\%$  для  $^{210}\text{Pb}$  и  $^{238}\text{U}$ ,  $\pm 12\%$  для  $^{226}\text{Ra}$ . Эти значения получены для хорошо гомогенизированных образцов. Правильность метода оценивалась по результатам измерения стандартных образцов горных пород БИЛ-1, БИЛ-2, ЗУК-1, SDO-1, СГ-1А, ДВГ, ДВТ, ДВР, эталонного образца МАГАТЭ IAEA-135 (см. табл. 7) и путем сравнения с результатами, полученными другими методами (сцинтилляционная гамма-спектрометрия и РФА-СИ см. рис. 13). Пределы обнаружения - не меньше 0.03 Бк, что соответствует содержаниям  $^{238}\text{U}$  0.25 г/т,  $^{232}\text{Th}$  – 0.7–1.0 г/т, радиоцезия 1 Бк/кг. При концентрациях более 4 г/т относительная погрешность для  $^{238}\text{U}$  составляет не более 10 %. Приведенные данные показывают хорошую сходимость с паспортными значениями и с результатами, полученными другими аналитическими методами, что говорит об отсутствии значимой систематической погрешности анализа.

Таблица 7. Содержание  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  в стандартных образцах (метод полупроводниковой гамма-спектрометрии с использованием колодезного ППД) [Мельгунов М.С. и др., 2003]

Стандарт	N	$^{238}\text{U}$ , мг/кг		$^{232}\text{Th}$ , мг/кг	
		Аттестат*	Замер	Аттестат*	Замер
БИЛ-1	10	12.0 $\pm$ 1.1	13.0 $\pm$ 1.0	12.7 $\pm$ 1.3	13.5 $\pm$ 1.3
SDO-1	7	48.8 $\pm$ 6.3	46.6 $\pm$ 3.2	(10.5)**	10.2 $\pm$ 1.3
СГ-1А	15	63 $\pm$ 4	71.1 $\pm$ 4.0	130 $\pm$ 10	137 $\pm$ 7
БИЛ-2	1	(3)**	2.6 $\pm$ 0.4	-	4.1 $\pm$ 0.5
ЗУК-1	1	3.3 $\pm$ 0.4	3.7 $\pm$ 0.5	5.8 $\pm$ 1.0	6.7 $\pm$ 0.7
ДВГ	1	17 $\pm$ 5	17.5 $\pm$ 1.3	38 $\pm$ 5	26.5 $\pm$ 2.1
ДВТ	1	13 $\pm$ 3	13.2 $\pm$ 1.0	47 $\pm$ 5	44.3 $\pm$ 3.6
ДВР	1	3 $\pm$ 1	3.4 $\pm$ 0.5	12 $\pm$ 3	11.6 $\pm$ 1.3
IAEA-135	9	2.4 $\pm$ 0.4***	2.8 $\pm$ 0.4	9.1 $\pm$ 0.7***	8.5 $\pm$ 0.7

n – количество замеров; доверительные интервалы даны для уровня значимости  $\alpha=0.05$ ;

\* - аттестованные значения даны по Арнаутову (1990);

\*\* - в круглых скобках даны информационные значения.

\*\*\* - аттестованные значения даны по каталогу IAEA AQCС... (1998);

**$^{210}\text{Pb}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в эталоне МАГАТЭ IAEA-135**

(метод полупроводниковой гамма-спектрометрии с использованием колодезного ППД)

	Удельная активность изотопа, Бк/кг				
	$^{210}\text{Pb}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{238}\text{U}$	$^{232}\text{Th}$	$^{137}\text{Cs}$ *
Аттестат	48 $\pm$ 6	23.9 $\pm$ 2.2	30 $\pm$ 5	36.9 $\pm$ 1.5	880 $\pm$ 30
Замер	48.2 $\pm$ 8.0	28.0 $\pm$ 5.6	35 $\pm$ 5	34.6 $\pm$ 2.4	907 $\pm$ 30

- аттестованные (паспортные) значения удельной активности изотопа  $^{137}\text{Cs}$  даны в пересчете на момент проведения замеров эталона.

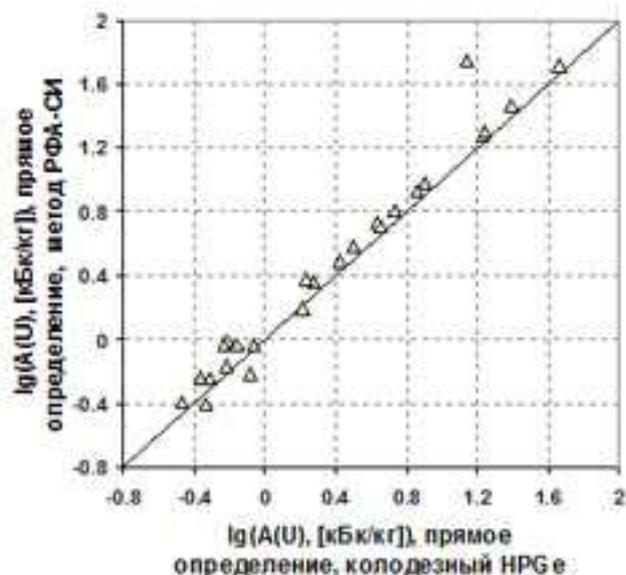
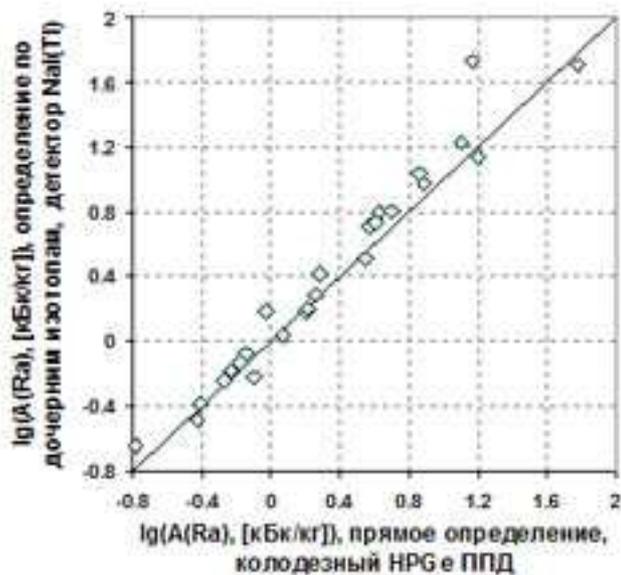


Рис. 13. Сравнение результатов определения  $^{226}\text{Ra}$  (а) и  $^{238}\text{U}$  (б), полученных разными методами.



Рис.14. Полевые гамма-спектрометрические измерения с применением МКС АТ6101Д в районе ПЯВ «Кратон-4».

В полевых условиях с помощью спектрометра МКС-АТ6101Д (Атомтех, Беларусь) проведено не менее 1276 замеров мощности амбиентной дозы гамма-излучения (мкЗв/ч) и не менее 90-ти гамма-спектрометрических замеров активности в почвах Ra, Th, K (Бк/кг) и плотности загрязнения почв  $^{137}\text{Cs}$  (Бк/м<sup>2</sup>) (рис.14). В полевых условиях также проводилось измерение экспозиционной дозы гамма-излучения с применением радиометра СРП-68-01 (мкР/ч) – всего 4128 измерений.

На станции элементного анализа ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН методом рентгено-флуоресцентного анализа на синхротронном излучении (РФА-СИ) с регистрацией на Si(Li) – детекторе в твердых пробах (золе растений, донных осадках, почвах, выпаренных рассолах) определены концентрации Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Br, I, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Te, Hg, Tl, Bi, Th, U, Pb с пределами обнаружения до 0.1 г/т в зависимости от энергии возбуждения эмиссионных линий, относительная погрешность не более 10-15 % [Baryshev et. al., 1991]. Методика энергодисперсионного рентгено-флуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения (РФА-СИ) благодаря своим техническим характеристиками решает задачи определения практически всех (кроме Hg) тяжелых металлов и токсичных элементов в твердых пробах малой навески с необходимой точностью (см. табл.8). Пробы почв (200 г) измельчались до 200 меш, брались навески 30 мг и спрессовывались в таблетки диаметром 6 мм без какого-либо другого дополнительного концентрирования и озоления.

Таблица. 8. Нижние пределы обнаружения РФА-СИ (г/т)

А. при энергии первичного монохроматизированного излучения 23 КэВ

V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn
5	4	4	3	3	2	1
Ga	Ge	As	Se	Br	Rb	Sr
0.5	0.5	0.4	0.3	0.25	0.2	0.2
Y	Zr	Nb	Mo	U	Th	Pb
0.15	0.15	0.15	0.1	0.3	0.3	0.3

Б. при энергии первичного монохроматизированного излучения 36.5 КэВ

Ag	Cd	Sn	Sb	I
0.3	0.3	0.2	0.2	0.2

Измерения эмиссионных спектров проб проводилось в следующих режимах измерения: для элементов  $Z = 19 \div 42$  – энергия первичного монохроматизированного излучения ( $E_{мон}$ ) была 23 кэВ (определялось содержание K, Ca, Ti, Mn, Fe и 19 микроэлементов, приведенных в таблице), а для элементов  $Z = 47 \div 53$  – она равнялась 37 кэВ (эта энергия выбрана ниже  $K_{\alpha}$  – края поглощения элемента Ва для того, чтобы эмиссионные линии  $K_{\alpha 1,2}$  бария не ложились на пик комптоновского рассеяния и не мешали его мониторингованию). В этом режиме определялось содержание Ag, Cd, Sn, Sb, I. Содержание Bi, Tl, Hg рассчитывалось по градуировочной кривой  $Pb_{L\beta 1}$ , содержание Te –  $Sb_{K\alpha}$ . Интенсивность вторичного излучения составляла ~ 10000 импульсов в секунду, время экспозиции - 300 секунд. Особо необходимо отметить проблемы, возникающие при обработке эмиссионных спектров элементов As и Pb программой AXIL. Алгоритм, заложенный в этой программе, не позволяет достоверно разрешать эти линии при их различных вариациях. Для решения этой задачи нами использовались два варианта подхода:

1) Выбиралась энергия монохроматора ниже  $L_{III}$  – края поглощения свинца при  $E_{мон} \sim 12.9$  кэВ, что позволяло в чистом виде определять линию мышьяка  $K_{\alpha 1,2}$  (10.55 кэВ). Затем устанавливали энергию монохроматора выше  $L_{III}$  – края поглощения свинца при  $E_{мон}$

~ 13.3 кэВ и определяли суммарную линию 10.55 кэВ от мышьяка  $K_{\alpha 1,2}$  и свинца  $L_{\alpha 1,2}$ . Разница площадей фотопиков энергии 10.55 кэВ между 2 и 1 пунктами позволяет достоверно определить линию свинца  $L_{\alpha 1,2}$ .

2) Во втором варианте проводится одновременное возбуждение всех К линий элемента As и всех L линий элемента Pb при энергии монохроматора  $E_{\text{мон}} \sim 23$  кэВ. Определение же площади фотопика для мышьяка ведется по линии As  $K_{\beta 1} \sim 11.72$  кэВ, а площади фотопика для свинца ведется по линии Pb  $L_{\beta 1} \sim 12.61$  кэВ. Энергетическое разрешение спектрометра станции (Oxford Instruments, разрешение порядка 133 эВ по линии 5.9 кэВ) позволяет определить эти фотопики несмотря на близкорасположенные линии Br, Se.

Расчет концентраций элементов выполнялся с использованием метода “внешнего стандарта”. В качестве внешних стандартных образцов использованы международный стандарт донных осадков ВП-1 и почвы SOIL-7 МАГАТЭ, для растительности – российский стандарт злаковой травосмеси СБМТ-02 №3170-85 и зольный остаток этой травосмеси ЗСБМТ-02 №3170-85. Относительное стандартное отклонение  $S_r$  результатов определения химического состава проб соответствует точности результатов ОСТ 41-08-212-82 и рекомендациям НСАМ [Артамонова, Колмогоров, 2006, Artamonova, Kolmogorov, 2009].

Содержание анионов в водных пробах определялось методом титрования, погрешность – не более 8 %. Атомно-эмиссионным методом с индуктивно-связанной плазмой (ICP-AES) на спектрометре IRIS Advantage (США) определены концентрации макроэлементов в пробах воды и растворах твердых образцов Ca, Mg, Na, K, S, Si, B, Ti, Fe, Mn, P и As [Методика..., 1998а, 1998б]. Относительная погрешность составляет не более 15 %, а нижние пределы обнаружения – от 0.1 до 0.0005 мг/л. Масс-спектрометрическим методом с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) на масс-спектрометрах Agilent 7500 (США) и на ELEMENT (Finnigan Mat, Germany) с ультразвуковым распылителем U-5000AT+ определено содержание тяжелых металлов, редкоземельных элементов (лантаноидов), высокозарядных элементов (Hf, Nb, Ta, Zr, Ba, Rb, Sr, Y, радионуклидов Th и U) [Николаева и др., 2008, Николаева, Палесский, 2011]. Пределы обнаружения элементов (за исключением макроэлементов), оцененные по  $3\sigma$  вариации фонового сигнала, составляют от 0.1 до 0.01 мкг/л. Относительное стандартное отклонение независимо от элемента не превышает 10%, если определяемая концентрация больше предела обнаружения на порядок и более. Пробы почв и донных осадков (навеска 80 мг) переводились в раствор с помощью метода сплавления с метаборатом лития при 1000 °С после предварительного озоления в течение 2 ч. при 450 °С. Результаты анализа макрокомпонентов, полученных методом МС-ИСП, хорошо совпадают с результатами, полученными с применением других методов анализов

ВПГС и РФА-СИ (рис .11). Несмотря на разные навески (80 мг и 30 г соответственно), также высока сходимость результатов анализа МС-ИСП с результатами ВПГС.

Масс-спектрометрическим методом с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) определялось  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  соотношение с временем сканирования в течение 1 мин 50 сек (по 1000 и более сканов каждого изотопа) с относительной погрешностью  $\leq 2\%$  [Бондарева, 2008, Nikolaeva et. al., 2010]. Для определения изотопного соотношения  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  с помощью ICP-MS применены методики отгонки урана из подземных рассолов в азеотропной смеси в специально разработанной установке, что позволяло получить чистую пробу, соответствующую требованиям масс-спектрометрии, также методики экстракции урана из ультрапресных поверхностных вод [Бондарева и др., 2008, 2009, патент №2011149436 (РФ) от 07.12.2011 г.]. Дополнительно применялся метод концентрирования подкисленных проб ультрапресных вод путем упаривания.

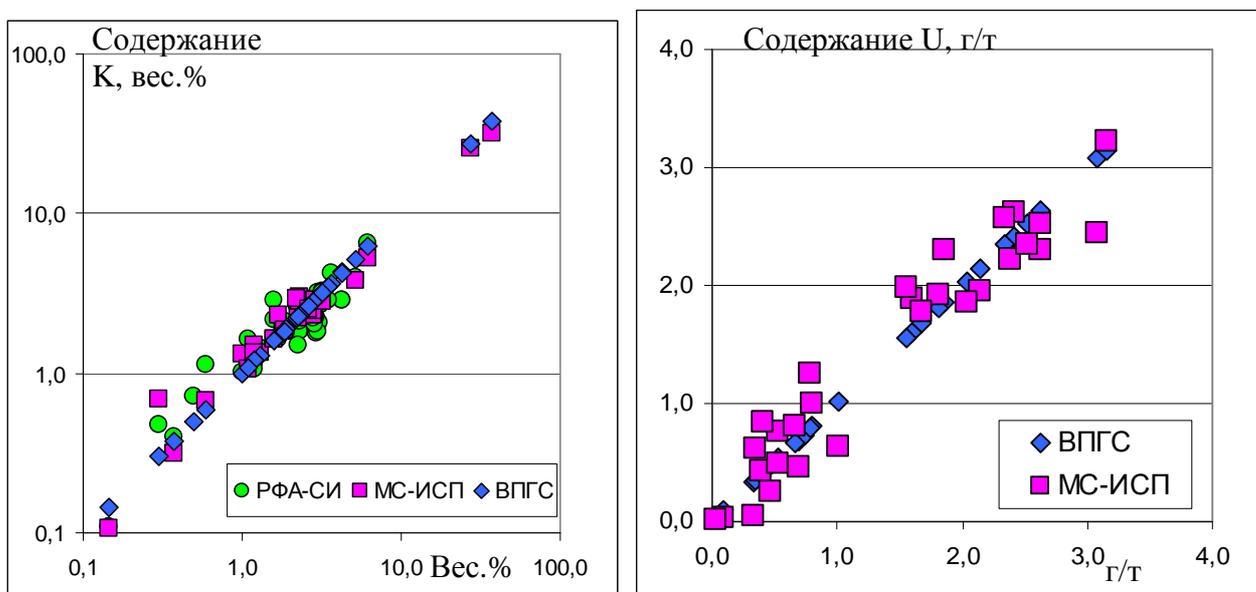


Рис.15. Сравнительная таблица результатов определения содержания К (вес.%) и U (г/т), полученными разными методами в пробах районов ПЯВ «Кратон-4» и «Кристалл».

*Примечание:* масс-спектрометрический с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS), рентгено-флюоресцентный анализ на синхротронном излучении (РФА-СИ) и высокоточная полупроводниковая гамма-спектрометрии (ВПГС).

Каждая точка отбора и пикеты маршрутов измерений были географически привязаны с помощью GPS- навигатора Etrex с абсолютной ошибкой не более  $\pm 5$  м. На объекте «Кртаон-3» выполнена топографическая съемка с применением комплекта спутникового оборудования Trimble 4600LS (свидетельство о метрологической аттестации оборудования представлено в приложении Е). По результатам съемки на объект «Кратон-3» (Западная Якутия) составлена топографическая карта в масштабе 1:2000 с высотой сечения рельефа 1 м

в местной системе координат на площади 83.63 га. В ходе выполнения работ были обследованы пункты триангуляции Пологий и Усть Чукука, в которых выявлена сохранность сигналов, однако центры пунктов найдены не были. Места расположения центров завалены обломками породы и фрагментами деревьев, сами центры, возможно, были умышленно повреждены. Обработка результатов полевых измерений осуществлялась в программном обеспечении «Trimble Geomatics Office». Всего, в ходе съемки ситуации и рельефа были определены координаты 1380 точек.

## Глава 2. Особенности геологической среды объектов ПЯВ

Подземный ядерный взрыв является одним из самых сильных техногенных воздействий, когда-либо оказанных человеком на геологическую среду [Яблоков, 2003, Адушкин, Спивак, 2007]. Геологическая среда [Сергеев, 1982, Радченко и др., 2011] – это верхняя часть литосферы, состоящая из тесной взаимосвязи вмещающих пород и подземных флюидов (вод, газов), на которые действует ПЯВ. В нашем случае геологическая среда определяется зоной влияния очага ПЯВ (в зависимости от его мощности, глубины заложения заряда и других технических параметров) на вмещающий массив горных пород, а также на флюидопроницаемые геоструктуры, как подземные водоносные горизонты, разломные зоны. Протяженность и глубина воздействия ПЯВ на геологическую среду определяются не столько масштабами механического разрушения вмещающего породного массива: размерами зоны дробления и зоны трещиноватости вокруг полости взрыва, но как дальностью воздействия взрыва на флюидодинамический режим подземных вод и дальностью переноса радионуклидов и тепловой энергии по флюидопроницаемым геоструктурам: по подземным водоносным горизонтам, зонам разломов т.п. Следовательно, анализ геологической среды проведен с точки зрения ее взаимодействия с ПЯВ, с обращением внимания на наличие и параметры флюидопроницаемых геоструктур, как возможных проводников радиоактивного вещества и энергии.

Литологическое строение, тектонические геоструктуры, магматические проявления в районе являются одним из основных факторов, предопределяющих особенности развития геотехногенных систем ПЯВ как в первые годы, десятилетия, так и в масштабах геологического времени. Тип, состав, сложение (текстура) вмещающих пород определяют петрофизические свойства пород, газовость пород и степень разрушения пород при ПЯВ. Тектонические нарушения сплошности геологической среды, подземные водоносные горизонты, продуктивных пласты с залежами нефти, газов, зоны трещиноватости, существовавшие до ПЯВ, и появившиеся и (или) подновленные после проведения ПЯВ – все эти факторы создают возможность для распространения техногенных радионуклидов из зоны взрыва.

Вмещающая геологическая среда выбранных 10-ти объектов ПЯВ на Сибирской платформе отличается сложностью, отмеченной на разных уровнях организации геосистемы, обусловленной наличием древних и подновленных тектонических разломов, разбивающих геологическую среду на ряд блоков, пластовых трапповых тел и кимберлитовых трубок, контактные зоны которых отличаются высокой флюидопроницаемостью, горизонтов с напорными подземными рассолами, распространение сплошной многолетней мерзлоты.

## 2.1. Район ПЯВ «Кристалл» и «Кратон-3».

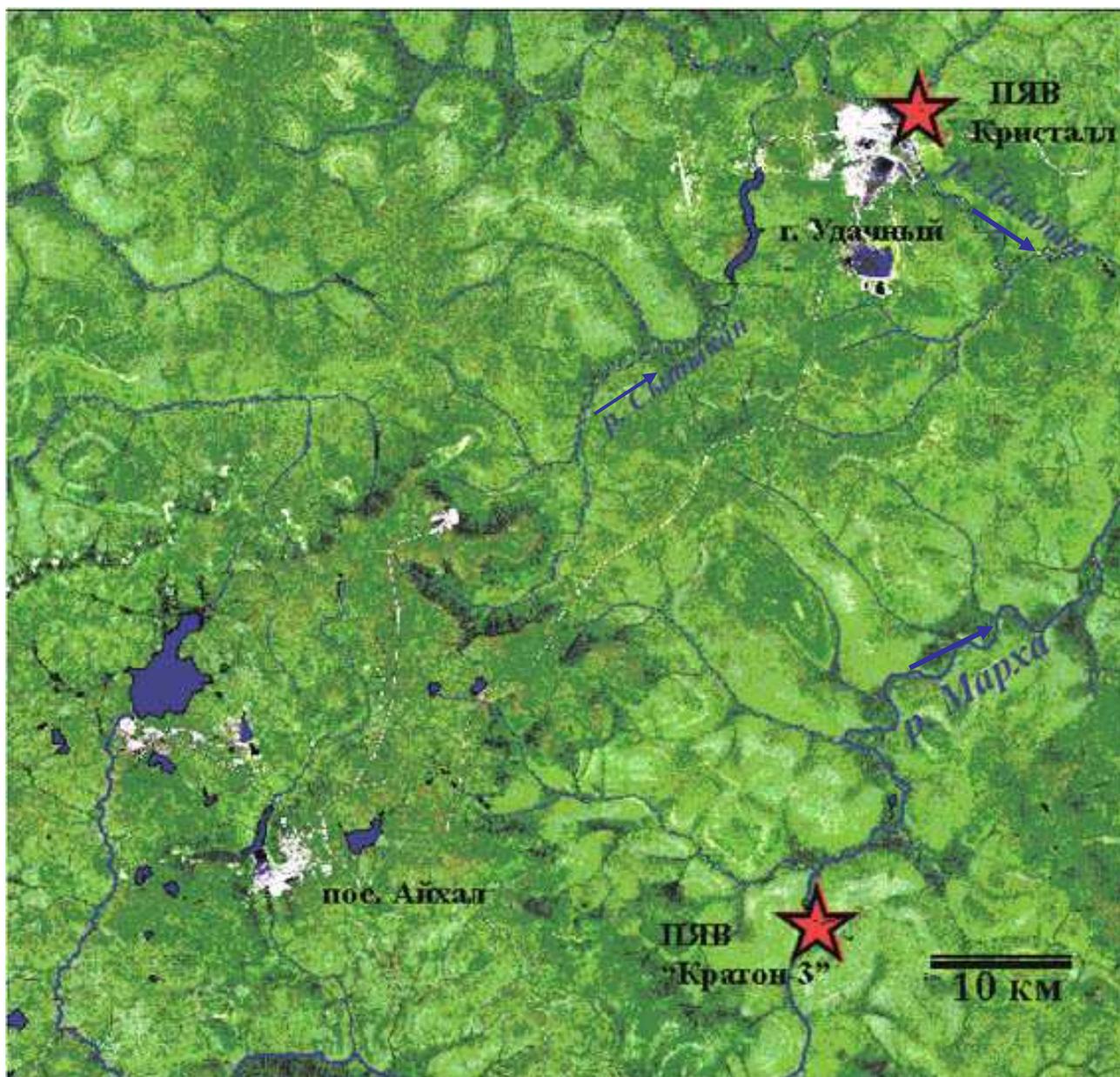


Рис.16. Взаиморасположение ПЯВ «Кристалл» и «Кратон-3» в бассейне р. Марха (из ГИС-проекта района, подложка – спутниковый снимок Landsat из открытых источников интернета)

Геологическая изученность. Степень геологической, гидрогеологической и геокриологической изученности района ПЯВ «Кристалл» и «Кратон-3» разная. Район ПЯВ «Кристалл» изучен гораздо лучше вследствие его расположения рядом в 4.5 км с крупной кимберлитовой трубкой «Удачная», где идет активная добыча алмазов открытым способом (в карьере) и позднее продолжается закрытым способом (в руднике - шахте). Также в 13.5 км отрабатывается кимберлитовой трубки «Зарница» карьерным способом.

В районе ПЯВ «Кристалл» широко проводились гидрогеологические и геокриологические исследования, в том числе для поисков путей подземного захоронения

рассолов, выкачиваемых из карьера кимберлитовой трубки «Удачная» [Кобылкина, 2004, Климовский, Готовцев, 1994, 2002, Дроздов, 2006; Климовский и др., 2002, Алексеев, 2009].

В районе ПЯВ «Кратон-3» детальные геологические исследования до 1978 г. не велись, возможно, этому способствовало отсутствие поблизости кимберлитовых трубок. Здесь единственной глубокой буровой скважиной была боевая скважина, данные по которой крайне скудны и сейчас недоступны. После аварийного взрыва в 1978 г. геологоразведочные работы, предполагающие бурение, в непосредственной близости от объекта ПЯВ «Кратон-3» также не проводились.

Геологическое положение. Объекты ПЯВ «Кристалл» и «Кратон-3» расположены на южном склоне Анабарской антеклизы, близко к месту сочленения с Тунгусской синеклизой, в 60 км друг от друга (рис.7, 16). Анабарская антеклиза является одним из основных элементов Сибирской платформы, сформированная у поднятия фундамента - Анабарского щита. Районы ПЯВ «Кристалл» и «Кратон-3» расположены в 60 км друг от друга в известняково-доломитовых породах кембрийского возраста в пределах Далдыно-Алакитского алмазоносного района в бассейне р. Марха (рис.16).

Литологическое строение и стратиграфия. Осадочную толщу слагают известняки и доломиты и их глинистые разности венд-кембрийского и нижнеордовикского периода. Общая мощность осадочных пород составляет примерно 2400 м (рис.17), и она несогласно перекрывает кристаллический фундамент [Алексеев, 2009]. Залегание известняков и доломитов горизонтальное или моноклиналиное с падением в юго-западном направлении до 10 - 12° – в сторону центральных частей древнего моря. Породы эдиакария представлены доломитами, строматолитовыми доломитами с прослоями мергелей и песчаников с мощностью всего до 190 м. Основную часть геологического разреза района составляют кембрийские известняки и доломиты с общей мощностью около 2-х км.

Более приподнятое положение района ПЯВ «Кристалл» на склоне Анабарской антеклизы по сравнению с районом ПЯВ «Кратон-3» привело к вскрытию и денудации нижнеордовикских отложений (рис.18) и в геологическом разрезе ордовикские отложения отсутствуют (рис.19) или остались на ограниченной площади. В 60 км южнее в районе ПЯВ «Кратон-3» подстилающими породами являются отложения олдондинской свиты нижнего ордовика, которые представлены в полном разрезе (рис.19). Здесь нижнеордовикские известняки с прослоями аргиллитов мощностью ~ 240 м подстилают дневную поверхность.

Карбонатные породы в приводораздельных ландшафтах сверху перекрыты суглинистыми четвертичными элювиально-делювиальными отложениями с обломками известняков и карбонатов мощностью 1-2 м. Мощность рыхлых четвертичных отложений

увеличивается на нижних частях склонов и в долинах рек до 8-10 м, где представлены аллювиальными песками, галечником.

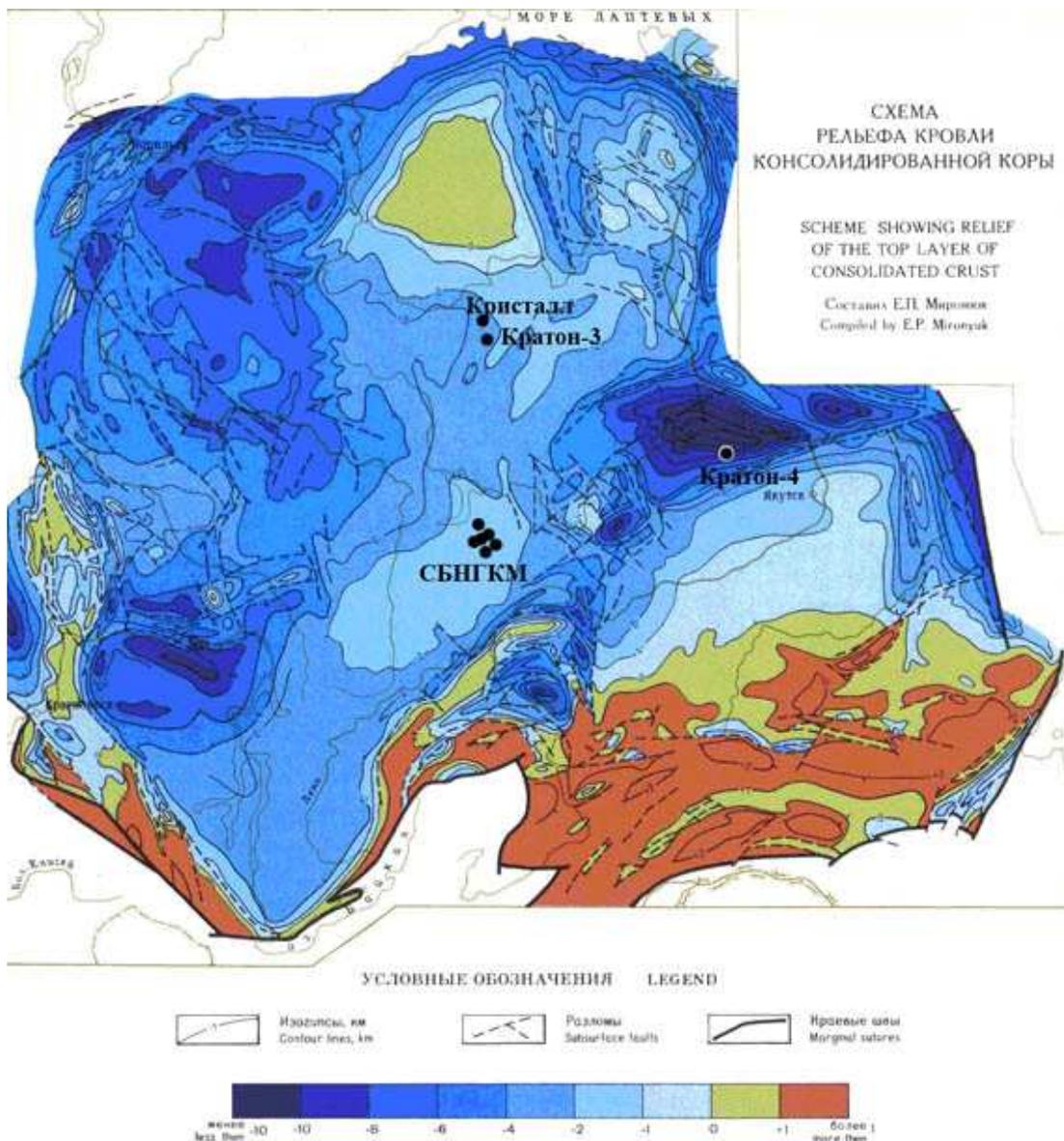


рис.17. Мощность осадочной толщи на архейском фундаменте Сибирской платформы (км) [Геологическая карта Сибирской платформы и прилегающих территорий, 1999, 1:1500000]. Черными кружками показаны объекты ПЯВ. СБНГКМ – Среднеботуобинское нефтегазоконденсатное месторождение.

Для геотехногенных систем ПЯВ имеет значение, что вмещающие породы - известняки и доломиты отличаются невысокой прочностью, например, по сравнению с магматическими породами - гранитами массива Балапан (Семипалатинский полигон, где были проведены первые экспериментальные взрывы народно-хозяйственного назначения). К известнякам и доломитам применимы все эмпирические физические формулы по расчетам разрушения упругой среды под действием взрыва [Адушкин, Спивак, 2007].

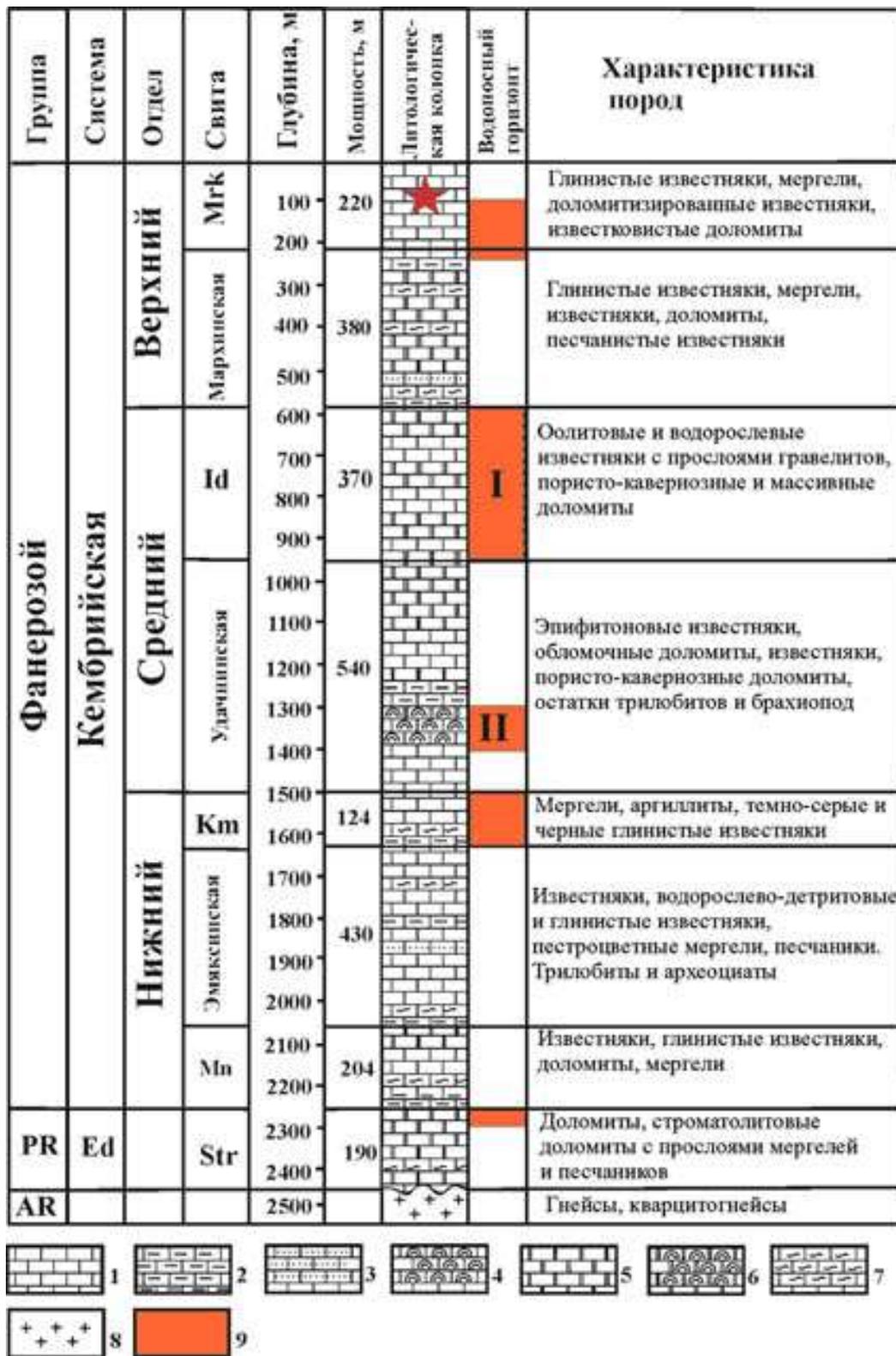


Рис.18. Литологическая колонка района ПЯВ «Кристалл» по данным скв. 703, глубина 2593 м [Алексеев, 2009] с дополнением положения подземных водоносных горизонтов в геологическом разрезе района: 1-4 - известняки: 1 - чистые, 2 - глинистые, 3 - песчаные, 4 - органогенные; 5-6 - доломиты: 5 - чистые, 6 - органогенные, 7 - мергели; 8 - кристаллические породы фундамента; 9 – протерозойский, нижнекембрийский и I, II среднекембрийский, верхнекембрийский водоносные горизонты.

Ed – эдиакарий, свиты: str – старореченская, mn – манькайская, km - куонамская, id – известняково-доломитовая пачка, mrk – мархинская, mrk маркокинская, ol - олдондинская.

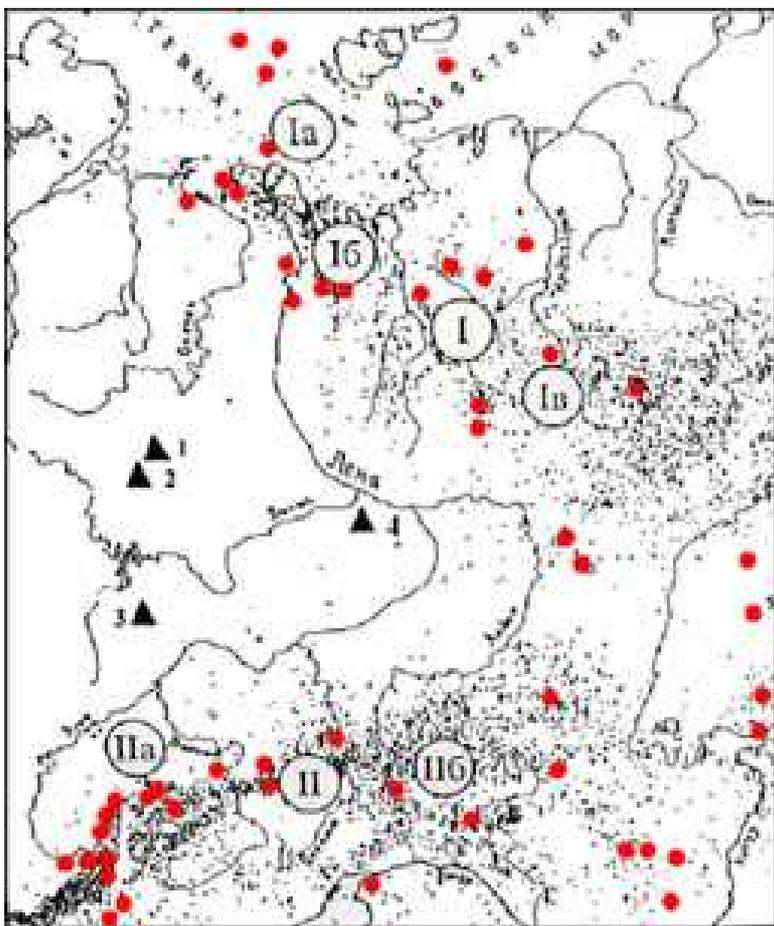
Группа	Система	Отдел	Свита	Глубина, м	Мощность, м	Литологическая колонка	Водоносный горизонт	Характеристика пород
Фанерозой	Кембрийская	Верхний	Ol	100	238			Глинистые известняки с прослоями аргиллитов
			Mrk	500	132			Глинистые известняки, доломиты, конгломераты закарстованные и кавернозные
		Mr			176			Известняки доломитные, в нижней части - грубо-косослоистые неосаженные и алевроитовые известняки
		Средний	Id	1000	370		I	Оолитовые и водорослевые известняки с прослоями гравелитов, пористо-кавернозные и массивные доломиты
					540		II	Эпифитоновые известняки, обломочные доломиты, известняки, пористо-кавернозные доломиты, остатки трилобитов и брахиопод
		Нижний	Km	1500	124			Мергели, аргиллиты, темно-серые и черные глинистые известняки
					430			Известняки, водорослево-детритовые и глинистые известняки, пестроцветные мергели, песчаники. Трилобиты и археоциаты
					204			Известняки, глинистые известняки, доломиты, мергели
		PR	Ed	Str	190			Доломиты, строматолитовые доломиты с прослоями мергелей и песчаников
		AR			2500			Гнейсы, кварцитогнейсы

Рис.19. Литологическая колонка в районе ПЯВ «Кратон-3» [Микуленко и др., 2006] с дополнением положения подземных водоносных горизонтов в геологическом разрезе района. Условные обозначения см. рис.18.

Карбонатные породы отличаются высокой газовостью – при нагреве выделяется  $CO_2$ , увеличивая термобарическое воздействие взрыва на вмещающие породы. Низкое содержание в породах алюмосиликатной примеси (глинистой) могло привести к более слабому образованию расплавленной корки вокруг полости взрыва, изолирующей в зоне взрыва основную массу радиоактивного вещества.

Тектонические нарушения. Подземные ядерные взрывы «Кристалл» и «Кратон-3» проведены на южном склоне Анабарской антеклизы (рис.7) у северо-восточного борта

Тунгусской синеклизы. В целом район характеризуется спокойной тектонической и сейсмической обстановкой [Микуленко и др., 2006, Имаев и др., 1995](рис.20,21). Но этот участок Сибирской платформы разбит сетью древних и подновленных тектонических разломов (рис.21).



**Рис. 20. Схема эпицентров землетрясений в Якутии и сопредельных территорий [Имаев и др., 2000]:**

I - Арктико-Азиатский сейсмический пояс: Iа-Iв - сеймотектонические зоны, Iа - Лаптевоморская, Iб - Хараулахская, Iв - Черская); II - Байкало-Становой: IIа, IIб - сеймотектонические зоны (IIа - Байкальская, IIб - Олёкмо-Становая).

Кружками показаны землетрясения с глубиной очага 60 км и меньше.

Местоположения ПЯВ: 1 - «Кристалл», 2 - «Кратон-3», 3 - Среднеботуобинская группа ПЯВ, 4 - «Кратон-4».

В  $\approx 6$  км южнее объекта ПЯВ «Кристалл» проходит зона тектонического разлома Октябрьский северо-западного простирания, вблизи крупные тектонические разломы отсутствуют. А взрыв «Кратон-3» был произведен в непосредственной близости от тектонического разлома, выходящего на поверхность по руслу р.Марха северо-западного простирания с углом падения  $55^\circ$  на северо-восток [Микуленко и др., 2006]. Эпицентр взрыва «Кратон-3» располагается всего в 160 м от уреза местной реки Марха. На промежутке глубин 165-186 м или в 391 -412 м выше точки заложения заряда (центра взрыва) при бурении боевой скважины был вскрыт водопоглощающий интервал [Радиационная..., 1980]. Этот трещиноватый интервал, по мнению соискателя, и был разломной зоной. Проведение взрыва «Кратон-3» рядом с тектоническим разломом, по мнению автора, осложнило ситуацию, и столб обрушения и зона разлома могли соединиться, и усилить перенос

вещества и энергии в системе «полость взрыва- вмещающая геологическая среда» по этой флюидопроницаемой зоне.

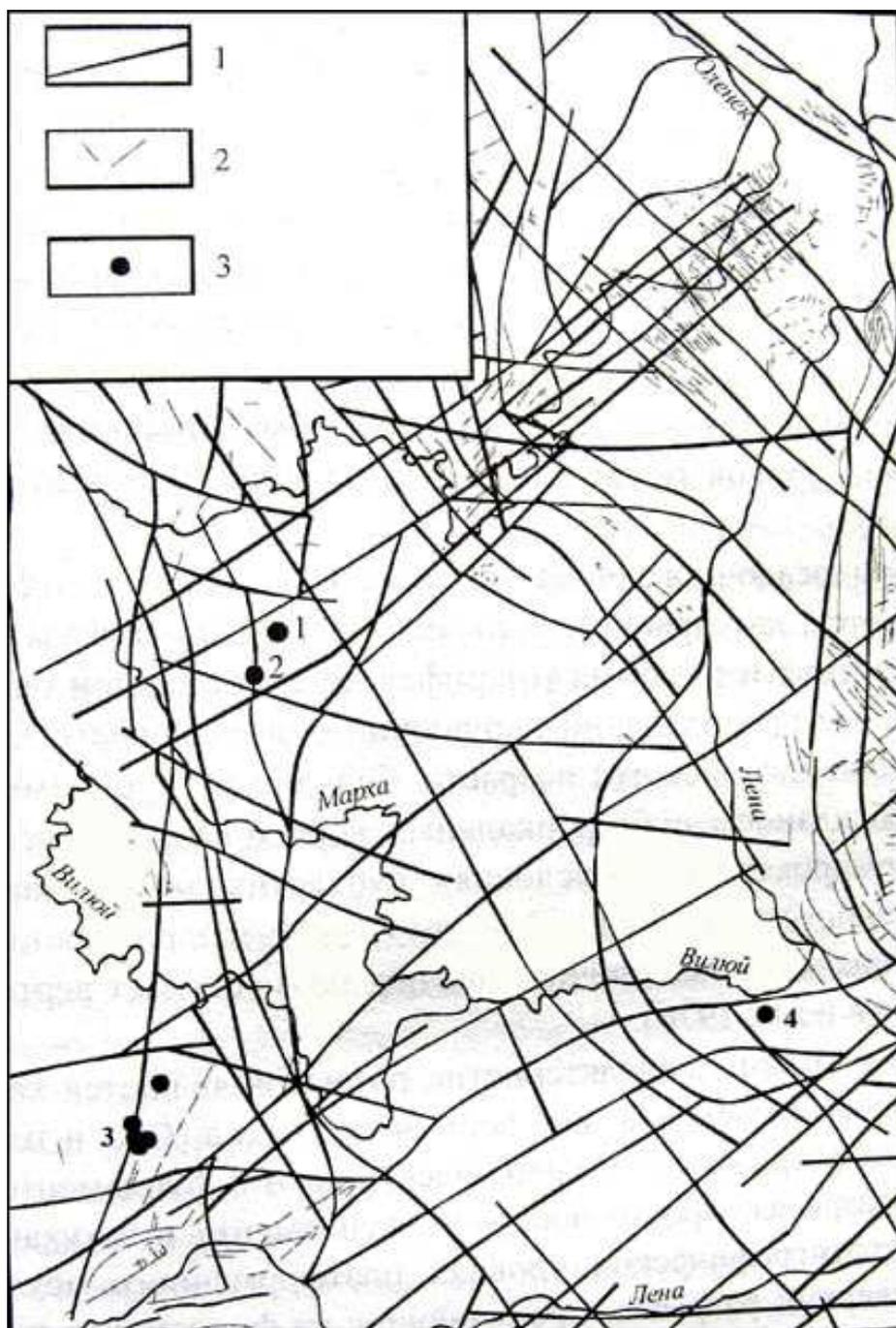


Рис. 21. Положение ПЯВ на схеме разрывных нарушений, схема составлена Микуленко К.И. [Микуленко и др., 2006]. *Условные обозначения:* 1-разломы, выявленные по геолого-геофизическим данным; 2 – разломы, выявленные по геологическим данным, 3 – местоположение ПЯВ: 1- «Кристалл», 2 – «Кратон-3», 3 – Группа ПЯВ на Среднеботуобинском месторождении, 4 – «Кратон-4»

Проявление магматизма. Толщи кембрий-ордовикских карбонатов в позднедевонское-раннекарбонское время ~ 350 млн. лет назад были прорваны кимберлитовыми трубками (рис.22), а ~ 251-200 млн. лет назад в перми -триасе (в мезозойскую эру) Сибирскую платформу покрыли площадное растрескивание и на сушу вылились трапповые эффузивы, образовав пластовые тела, их сопровождали менее распространенные долеритовые интрузивы в виде даек.

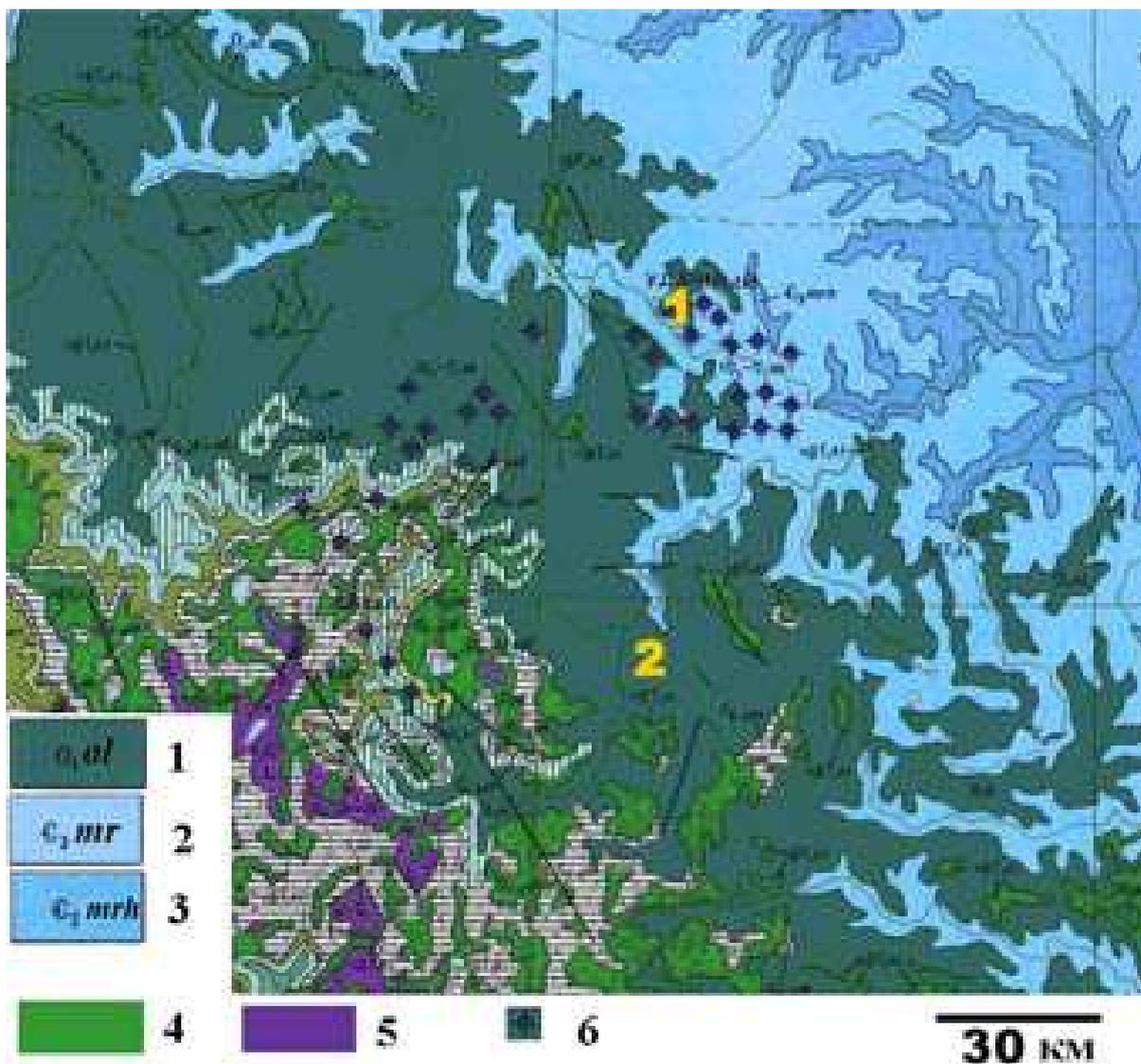


Рис. 22. Распространение магматических тел в районе ПЯВ «Кристалл» и «Кратон-3» (вырезка из геологической карты Сибирской платформы и прилегающих территорий 1:1500000, 1999). Примечание: 1 – ПЯВ «Кристалл»; 2 – ПЯВ «Кратон-3».

Условные обозначения: 1 – олдондинская свита, нижний ордовик ( $O_{1ol}$ ); 2 – моркокинская свита, нижний кембрий ( $e_{3mr}$ ); мархинская свита, нижний кембрий ( $e_{3mrh}$ ); 4 – долеритовые дайки (триас), 5 – траппы (перм, триас), 6 - кимберлитовые трубки (поздний девон- ранний карбон).

Район ПЯВ «Кристалл» относится к Далдынскому алмазоносному полю (трубки Удачная, Сытыканская, Юбилейная, Айхал, Краснопресненская, Комсомольская), [Кимберлиты..., 2013, Афанасьев, 2014]. В настоящее время в районе выявлено 79 кимберлитовых тел, в т.ч. 69 трубок и 10 жил и даек (рис.22). При этом некоторые трубки (Удачная, Сибирская, Аэромагнитная и др.) состоят из 2-х спаренных тел. Интенсивность проявления ультраосновного магматизма в пределах района весьма неравномерная – около ПЯВ «Кратон-3» они отсутствуют.

В приконтактных зонах кимберлитовых пород отмечается увеличение содержания обломков вмещающих пород, также появление интенсивной трещиноватости и дробления с

образованием приконтактных карбонатных брекчий. Мощность зон дробления колеблется в пределах 0.2 – 5 м. Эти приконтактные зоны являются естественными флюидопроницаемыми структурами и могут служить проводниками для перетекания подземных вод и установления гидравлической связи между подземными водоносными горизонтами. В 3.5 км к юго-западу от ПЯВ «Кристалл» расположена сдвоенная кимберлитовая трубка «Удачная», в 13.5 км к востоку – трубка «Зарница». На обеих кимберлитовых трубках идет добыча алмазов. То есть сразу отметим, что рядом с геотехногенной системой ПЯВ «Кристалл» развиваются две геотехногенные системы горнодобывающей промышленности, имеется сверхглубокое «геологическое окно» - карьер тр. Удачная глубиной 600 м и шахта глубиной около 1 км.

На юго-западе от Далдынского кимберлитового поля (рис.22) развито поле выхода субвулканических пластовых траппов пермского и триасового периодов, они показаны сиреневым цветом. К ним приурочены долеритовые дайки (показаны зеленым цветом) триасового возраста. Эти субвулканические пластовые тела и дайки представлены недифференцированными и слабо дифференцированными долеритами. Мощность эндоконтактных зон не превышает 0.6-1 м. Мощность экзоконтактных изменений не превышает 0.5 – 2.0 м, эти участки характеризуются высокой трещиноватостью, и таким образом являются естественными флюидопроницаемыми структурами, способствующими передвижению флюидов в геологической среде.

Наиболее крупное тело долеритов сложной морфологии (дайка) расположено на правобережье р. Далдына в зоне Октябрьского разлома в 6 км к юго-западу от ПЯВ «Кристалл». Простирается тело северо-западное, протяженность более 50 км. В районе объекта «Кратон-3» магматические тела кимберлитов и долеритов отсутствуют.

Природные ландшафты Район представляет собой средне-расчлененное плато и относится к Среднесибирскому плоскогорью – средне-расчлененном плато с уровнями водоразделов от 300 до 600 абс.м, с врезом рек от 100 до 400 м. Местный рельеф холмисто-увалистый, развиты ландшафты северной тайги с доминирующим древесным видом - лиственницей Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr.), мохово-лишайниковым покровом (род *Cladina*, род *Dicranum*, *Hylacomium*).

Район находится в бассейне р. Марха – левого притока р. Вилюй. Объект ПЯВ «Кратон-3» расположен на правом берегу р. Марха в 160 м от берега, здесь уровень р. Марха составляет примерно 290 абс.м. Объект ПЯВ «Кристалл» находится на правом берегу небольшого ручья Улазан-Бысытта, впадающего в р. Далдын – левого притока р. Марха.

Многолетняя мерзлота. Район расположен в зоне сплошной многолетней мерзлоты. При этом мощность зоны собственно многолетнемерзлых горных пород (ММП), т.е. горных пород, в

которых встречается лед как отдельный минерал, занимает лишь верхнюю 200-300-метровую зону (рис.23). Ниже нее залегают «охлажденные» (содержащие воду с повышенной минерализацией - криопэги) и «морозные» (без криопэга и льда) горные породы. Нулевая изотерма в данном районе фиксируется на глубине 700-1000 м от поверхности. В результате проведения температурных наблюдений в длительно выстоявшейся Мархинской опорной скважине (устье р. Далдына) нулевая температура была установлена на глубине 1470 м [Климовский, Готовцев, 1994]. Это самое глубокое официально зафиксированное место залегания охлажденной литосферы по всей области распространения ММП в Евразии. Как уже было отмечено выше, в рассматриваемом районе наблюдаются самая мощная зона отрицательных температур и самый низкий тепловой поток. В пределах Анабарской антеклизы средняя величина теплового потока равна 20 мВт/м<sup>2</sup>. При этом геотермический градиент в зоне отрицательных температур не превышает 0,5-0,97°/100 м. Все перечисленные зоны с отрицательной температурой формируют криолитозону [Балобаев и др., 1982, 1983].



Рис. 23. Трещины и каверны со льдом в керне скважин (фото предоставлено Иост Н.А., Мирнинская ГРЭ, 2012 г.)

Выявлено, что низкие значения температур ММП наблюдаются на пониженных, заболоченных участках долин и у подножий склонов в районе тылового шва речных террас. Например, самая низкая температура ММП для данного района, равная  $-8,6^{\circ}\text{C}$ , была зафиксирована в скв. 121, пробуренной в густом замшелом лиственничнике в пределах тылового шва террасы р. Далдына. Более широким диапазоном значений температуры горных пород характеризуются склоновые типы местности (рис.24). На них температура изменяется от  $-2,0$  до  $-6,0^{\circ}\text{C}$ . Основными факторами, влияющими на формирование температурного режима ММП на склонах, выступают их крутизна и экспозиция. Водораздельные поверхности оконтуриваются изотермой  $-2,0...-3,5^{\circ}\text{C}$ , а долины  $-4,5- -8,0^{\circ}\text{C}$ , т.е. в формировании температурного режима ММП наблюдается четкая ландшафтная зональность. При этом средний гипсогеотермический градиент равен  $1,5^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$  [Климовский, Готовцев, 1996]. Таким образом, в рассматриваемом районе все аномалии температурного поля верхней части криогенной толщи связаны с поверхностными факторами.

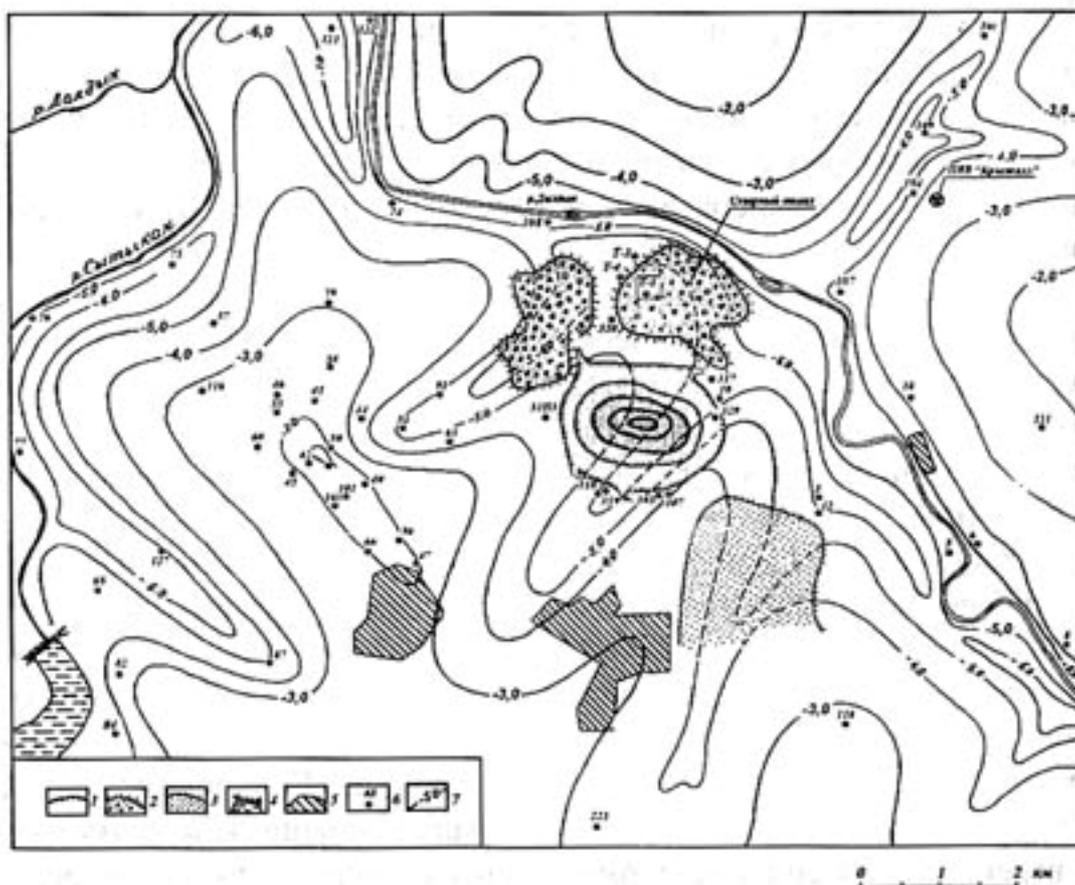


Рис. 24. Картограмма температурного поля многолетнемерзлых горных пород среднего течения р. Далдына [Микуленко и др., 2006]. Условные обозначения: 1 - карьер; 2 - отвалы вмещающих пород; 3 - хвостохранилище; 4 - водохранилище; 5 - жилые массивы; 6 - скважина и ее номер; 7 - изотерма

Отметим, что ПЯВ «Кристалл» был проведен на глубине 98 м в толще ледосодержащих многолетнемерзлых пород. Существовало общепринятое мнение, что мерзлота является хорошим барьером против распространения радионуклидов в геологической среде, поскольку «в условиях вечной мерзлоты вода в центральной зоне взрыва превращается в лед и надежно удерживает радионуклиды, включая тритий» [Мирные..., 2001, с.280]. И верификация данной концепции является одной из задач настоящей работы.

Гидрогеологическое строение. В гидрогеологическом отношении рассматриваемый район расположен в пределах Оленекского криоартезианского бассейна [Алексеев, 2009] в зоне его сочленения с Тунгусским криоартезианским бассейном. Определено, что по зоне Октябрьского разлома проходит граница между Оленекским и Тунгусским криоартезианскими бассейнами. В северной части района месторождения, относящейся к южному крылу Оленекского бассейна, выделяются верхне-, средне-, нижнекембрийский и протерозойский водоносные комплексы (рис.18), различающиеся между собой по степени водообильности, пластовых давлений, состава и минерализации рассолов. К югу от Октябрьского разлома в разрезе карбонатной формации развита слабоводоносная толща пород, относящаяся к восточному крылу Тунгусского бассейна [Алексеев, 2009].

Были сделаны выводы о том, что основными факторами, влияющими на формирование их химического состава, являются их происхождение, условия водообмена и преобразование (метаморфизация рассолов) в результате взаимодействия с вмещающими породами [Шварцев, 1973, 2004, Анциферов и др., 1989, Алексеев, 2009, Геология, гидрогеология..., 1986]. В соответствии [Романовский, 1983], подземные воды района разделяются на следующие типы: над-, меж- и подмерзлотные воды.

*Надмерзлотные воды* представлены водами сезонно-талого слоя и несквозных подрусовых и подозерных таликов.

Воды сезонно-талого слоя существуют только в теплые сезоны года и циркулируют, в основном, в четвертичных отложениях. Их региональным водоупором является верхняя поверхность ММП. Питание вод сезонно-талого слоя происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков и оттаивания мерзлых льдистых отложений, поэтому их уровеньный режим характеризуется значительным непостоянством и зависит, главным образом, от количества выпавших атмосферных осадков. Мощность горизонта в конце теплого сезона года достигает 1-2 м. Разгрузка осуществляется в основном в речную сеть. По химическому составу воды сезонно-талого слоя весьма близки к атмосферным осадкам и поверхностным водам. Воды ультрапресные с минерализацией от 0,3 до 0,5 г/л, по составу гидрокарбонатные магниево-кальциевые, значения рН изменяются от 6,9 до 7,6 [Алексеев, 2009].

Воды гидрогенных подрусловых таликов связаны с термальным действием водных масс, поэтому встречаются под руслами почти всех крупных рек района и приурочены к аллювиальным песчано-гравийно-галечным четвертичным отложениям. Мощность подрусловых таликов изменяется от 5 до 30 м. Отличительной особенностью подземных вод подрусловых таликов является тесная связь с поверхностными водами рек, что выражается в химическом составе. Они имеют сульфатно-гидрокарбонатный магниевый-кальциевый состав с минерализацией до 0,5 г/л.

Воды подозерных таликов распространены под крупными озерами и искусственными водоемами. По морфологии они, как правило, не выходят за контуры водоемов, поэтому размеры и объемы их определяются в основном размерами и конфигурацией озер. Мощность таликов увеличивается от береговой линии к центру водоема и в некоторых случаях может достигать 120 м и более [Девяткин, Шамшурин, 1980]. По химическому составу воды подозерных таликов сульфатно-гидрокарбонатные магниевый-кальциевый-натриевые с минерализацией до 2 г/л. Вследствие застойного режима эти воды содержат сероводород (445 мг/л) и повышенное количество органики.

Взаимосвязь подмерзлотных и таликовых вод не установлена.

*Межмерзлотные воды.* В районе месторождения трубки «Удачная» эти воды были вскрыты на глубине 50-70 м. Они представлены хлоридными кальциевыми рассолами с минерализацией до 70 г/л. Мощность водонасыщенных линз незначительная и составляет первые метры. Водовмещающими породами являются пористые трещиноватые известняки. Установившиеся уровни межмерзлотных вод отличаются от уровней верхнекембрийского водоносного комплекса и фиксируются на 30-50 м выше.

*Подмерзлотные воды* района приурочены к венд - кембрийским отложениям и, как правило, вскрываются ниже глубины 200 м. По результатам проведенных исследований сверху вниз выделены следующие водоносные комплексы: верхне-, средне-, нижнекембрийский и верхнепротерозойский (вендский), а также обводненные зоны кимберлитов и траппов [Геология, гидрогеология ..., 1986; Дроздов и др., 1989, 2008; Алексеев, 2009].

*Верхнекембрийский водоносный комплекс* в районе трубки «Удачная» приурочен к отложениям мархинской свиты (рис.18). Кровля комплекса залегает на глубинах от + 100 до + 180 м абс, понижаясь к югу. Глубина вскрытия зависит от геоморфологических особенностей территории и возрастает с северо-запада на юго-восток от 90 (в долинах рек) до 700 м (на водоразделах). Здесь зафиксировано несколько водоносных горизонтов, объединяющих пласты-коллекторы трещинно-порового типа. Общая мощность водоносного комплекса изменяется от 2-3 до 10-30 м, а эффективная - не превышает 3-5 м. Подземные воды верхнекембрийского комплекса представлены хлоридными натриево-магниевый-кальциевыми

солеными водами и рассолами. Минерализация их изменяется от 30 до 200 г/л при среднем значении 90 г/л. Водоносный комплекс характеризуется низкой водообильностью. Водопроницаемость изменяется от  $n \cdot 10^{-2}$  до  $n \cdot 10^{-4}$  м/сут. В зонах тектонического дробления значения коэффициента водопроницаемости возрастают до 7,3-32 м<sup>2</sup>/сут. Подземные воды комплекса имеют величину напора над кровлей от 10-25 (на севере) до 140-280 м (на юге). В основании водоносного комплекса залегают практически непроницаемые осадочные породы, мощность которых колеблется от 30 до 200 м. Водоносный верхнекембрийский комплекс карьером трубки «Удачная» вскрыт в 1985 г. и в настоящее время полностью пересечен [Климовский, Готовцев, 1994, Алексеев, 2009].

*Среднекембрийский водоносный комплекс* приурочен к переслаивающимся карбонатным отложениям известняково-доломитовой толщи ( $C_{2id}$ ) и карбонатным отложениям верхней пачки удачинской свиты ( $C_{1.2ud}^2$ ) средне-нижнего кембрия. (рис.13). Кровлей комплекса служат карбонатно-глинистые отложения мархинской свиты верхнего кембрия. Подошвой комплекса являются плотные карбонатные породы нижней части удачинской свиты, залегающие на глубинах с отметкой от /-1050 до -1120 абс. м/. Общая мощность водовмещающих пород в районе месторождения составляет около 1000 м. По типу пластов-коллекторов и гидродинамическим параметрам в разрезе выделено два горизонта:

*Первый водоносный горизонт ( $C_{2id}$ )* приурочен к карбонатным отложениям известняково-доломитовой толщи максимальной мощностью около 480 м. Граница между нижним горизонтом верхнекембрийского и первым водоносным горизонтом среднекембрийского водоносного комплекса проходит по подошве первой пачки мархинской свиты (бывшей чукукской свиты), залегающей на глубинах с абсолютными отметками от -220 до -260 м. Подошвой горизонта служат породы удачинской пачки нижне-среднего кембрия. Подземные воды приурочены к пластам-коллекторам в известняках и доломитах, которые составляют около 40 % мощности отложений свиты. Тип коллекторов кавернозно-поровый. Мощность водоносного горизонта не выдержана и колеблется в районе месторождения от 10 до 480 м. Максимальные значения мощности водовмещающих пород зафиксированы в северо-восточной части флексуры, минимальные – в зоне Октябрьского разлома.

Средняя суммарная мощность коллекторов составляет 250 м, а мощность отдельных проницаемых пластов изменяется от 0,1 до 8–10 м. По результатам испытаний КИИ-95 суммарные водоприитоки при полной депрессии на пласт изменяются от 0,01 до 2,8 л/с. Однако, как показала практика, результаты исследований с использованием этих методов следует считать только качественными, из-за возможных межпластовых перетоков флюидов

при испытаниях. Водоносный горизонт характеризуется существенной неоднородностью фильтрационных параметров по глубине и латерали. Значения коэффициента водопроницаемости изменяются от 1,0 до 60,0 м<sup>2</sup>/сут. В целом, в разрезе среднекембрийского водоносного комплекса первый водоносный горизонт является наиболее водообильным.

Второй водоносный горизонт (Є<sub>1-2ud2</sub>) приурочен к верхней части удачинской свиты, представленной рифовыми кавернозно-трещиноватыми известняками и доломитами (мощностью до 450–500 м). Водоносный горизонт приурочен к спорадически обводненным зонам биогерм нижней части среднего кембрия. Кровлей водоносного горизонта служат глинистые пачки карбонатных пород, залегающие на отметках от /–650 до –700 абс. м/. Подошвой горизонта являются плотные, практически водоупорные эпифитоновые и органогенно-обломочные известняки удачинской свиты, залегающие в интервале /–1050...–1120 абс. м/. Подошвой горизонта служат плотные органогенные известняки удачинской свиты. Мощность горизонта изменяется от 500 до 700 м, а эффективная - от 10 до 40 м. Тип коллекторов трещинно-кавернозный. Подземные воды имеют величину напора над кровлей 310-350 м. Пьезометрические уровни устанавливаются на глубинах от -164 до -180 м абс. Подземные воды комплекса представлены хлоридными кальциевыми рассолами с минерализацией до 400 г/дм<sup>3</sup>.

Максимальная мощность водоупорной пачки, разделяющей первый и второй горизонты, составляет около 70 м. Тип коллекторов водонасыщенных пород горизонта – кавернозно-поровый, по данным Амакинской ГРЭ [Кобылкина, 2005], суммарные водопритоки варьируются от 92,5 до 330,0 м<sup>3</sup>/сут. Водоносный горизонт характеризуется высокими значениями пластовых давлений, которые изменяются от 7,0 до 15,6 МПа и увеличиваются к подошве горизонта. По данным поинтервального опробования пластоиспытателем, водопритоки из коллекторов составляют от 0,02 до 1,2 л/с, а водопроницаемость от 0,024 до 0,59 м<sup>2</sup>/сут. Гидравлическая связь с вышележащим первым водоносным горизонтом установлена и наиболее ярко проявляется по разрывным нарушениям массивов осадочных толщ пород.

Таким образом, подземные воды среднекембрийского водоносного горизонта представлены крепкими и весьма крепкими хлоридно-кальциевыми рассолами с минерализацией от 300 до 400 г/дм<sup>3</sup>. В растворенном состоянии в рассолах находятся до 0,5 м<sup>3</sup>/ м<sup>3</sup> (в среднем 0,2-0,3 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>) азотно-углеводородных газов, среди которых преобладает метан (до 96%). Сероводород в составе газовой смеси не обнаружен [Кобылкина, 2005].

Нижнекембрийский водоносный комплекс вскрыт параметрическими скважинами 703 и 2531 в интервале глубин 1390-1537 м [Алексеев, 2009]. Он приурочен к плотным известнякам и доломитам куонамской свиты. Комплекс отличается высокой

водообильностью. Проведенными опытно-фильтрационными работами в скважине 703 установлен дебит  $150 \text{ м}^3/\text{сут}$ . Коэффициент водопроницаемости ориентировочно составляет  $50\text{-}60 \text{ м}^3/\text{сут}$ , а величина напора подземных вод -  $1200\text{—}1335 \text{ м}$ . Гидравлическая связь между нижнекембрийскими с вышележащими водоносными комплексами не изучена. Рассолы имеют хлоридный кальциевый состав и минерализацию около  $400 \text{ г/дм}^3$  и  $0,9 \text{ м}^3/\text{м}^3$  растворенных азотно-углеводородных и углеводородных газов. В нижнекембрийских подземных рассолах содержатся в промышленных количествах бром, литий, стронций, йод, рубидий [Анциферов, 1989, 2004]

*Верхнепротерозойский (вендский) водоносный комплекс* в районе вскрыт вышеуказанными двумя параметрическими скважинами и приурочен к карбонатным и глинисто-карбонатным породам верхней части старореченской свиты. Кровля залегает на глубине  $2260 \text{ м}$ . Подземные воды комплекса представлены хлоридными кальциевыми рассолами с минерализацией около  $400 \text{ г/дм}^3$ . Водорастворенные газы и гидравлическая взаимосвязь с другими комплексами не изучены.

Кроме охарактеризованных комплексов в районе распространены *обводненные зоны траппов и кимберлитов*, имеющие различную морфологию и размеры. Они являются своеобразными гидрогеологическими «окнами», через которые возможна гидравлическая связь между водоносными комплексами. Проницаемость зон обусловлена, главным образом, трещиноватостью пород. В пределах мерзлой зоны трещины в кимберлитах часто выполнены льдом, химический состав которых изучался З.Г. Устиновой [1964]. По ее данным, до глубин  $100 \text{ м}$  залегает лед сульфатно-гидрокарбонатного кальциевого состава с минерализацией до  $0/3 \text{ г/л}$ , глубже залегает лед сульфатного кальциевого состава с минерализацией до  $1.5\text{-}4.3 \text{ г/л}$ .

Таким образом, в районе ПЯВ «Кристалл» и «Кратон-3» характерна элизионная водонапорная система, состоящая из 5 водоносных горизонтов, насыщенных хлоридными натриевыми и кальциевыми рассолами. С глубиной минерализация рассолов увеличивается от  $90$  до  $450 \text{ г/л}$ , превышение пластового давления над нормальным гидростатическим – от  $1\text{—}1.5$  до  $26 \text{ мПа}$  [Микуленко и др., 2006, Алексеев, 2009]. Напор подземных вод по латерали увеличивается к юго-западу в сторону Тунгусского криоартезианского бассейна.

Отметим, что ПЯВ «Кристалл» был произведен в многолетнемерзлых породах вблизи верхнекембрийского водоносного горизонта. ПЯВ «Кратон-3» был также проведен вблизи водоносного горизонта – около I среднекембрийского водоносного горизонта (см. рис. 18, 19)

## **2.2. Район группы ПЯВ на Среднеботуобинском нефтегазоконденсатном месторождении**

Геологическая изученность района высокая в связи с тем, что здесь расположено Среднеботуобинское нефтегазоконденсатное месторождение (СБНГКМ), где выявлено 2 основных продуктивных горизонта: осинский – в нижнекембрийских известняках и доломитах на глубине примерно 1500 м и ботуобинский – в вендских песчаниках на глубине ~ 1850 -1900 м.

Геологическое положение. Район расположен на северной части погребенной Непско-Ботуобинской антеклизы (рис.7), граничащей по простиранию с Тунгусской синеклизой на северо-западе и Предпатомским прогибом на юго-востоке, в пределах антиклинальной структуры III порядка – Ботуобинской антиклинали.

Литологическое строение. Район СБНГКМ в основном сложен породами венда -кембрия [Анциферов и др., 1984]. По материалам поисково-разведочного бурения установлено, что осадочную толщу общей мощностью примерно 2000 м составляют доломиты, известняки и их глинистые разности, мергели, перемещающиеся пластами каменных солей венда и кембрия [Микуленко и др., 2006] (рис.25). Каменные соли прозрачные, белые, мощность пластов до 20 м. карбонатные породы сверху перекрываются прерывистым слоем терригенными породами нижней юры мощностью от 0 до 40 м, и четвертичными отложениями: суглинками, песками, щебнем и галечниками, в основном, приуроченными к пониженным участкам рельефа. Мощность четвертичных отложений не превышает 14 м.

Практически во всех скважинах, вскрывших фундамент, зафиксирована кора выветривания, развитая на гранитоидах, достигающая по мощности 39 м (рис.25). Большие мощности отложений, накопившиеся за сравнительно короткий срок (40—50 млн. лет), свидетельствуют о высокой скорости общего опускания, что обусловило хорошую сохранность осадков регрессивных этапов накопления и проявление различного ранга цикличности разреза. Таким образом, солеродный бассейн в южной части Сибирской платформы существовал с конца венда и в раннем кембрии. Глубины эпиконтинентального бассейна в целом были небольшими, колебались во времени и по территории от 0 до 250 м. Образование мощных пластов и пачек соли происходило одновременно на обширных территориях Непско-Ботуобинской антеклизы. Очевидно, перед выпадением соли рапа заполняла весь бассейн. Отложения соли заполняли временные прогибы глубинно до 100 иногда до 250 м. Формированием соленосно-карбонатных отложений завершился венд-раннекембрийский цикл седиментации. Берег поднятия был с северо-западной стороны от Непско-Ботуобинской антеклизы.

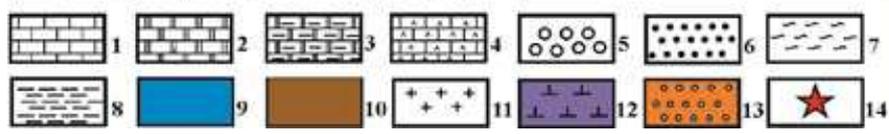
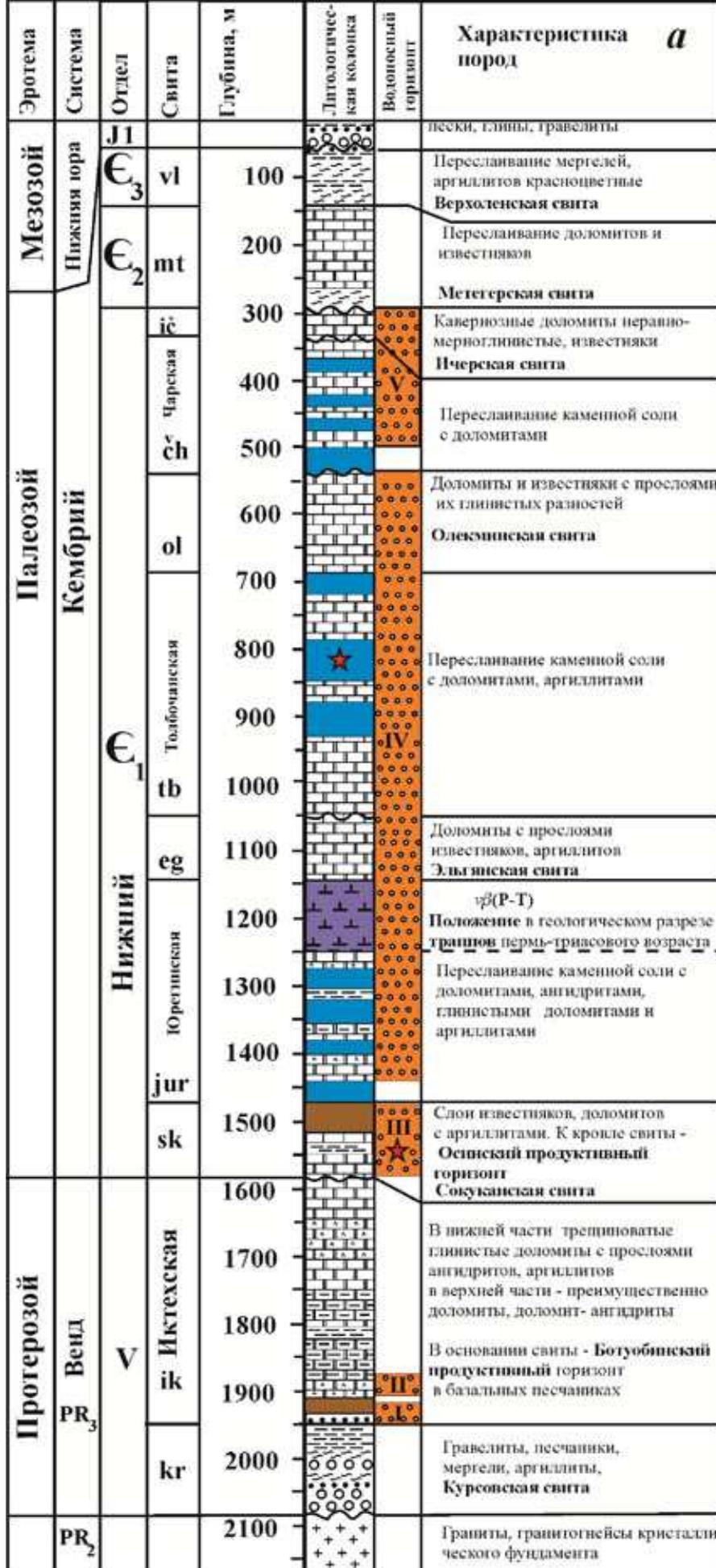


Рис.25. Литологическая колонка района Среднеботубинского нефтегазо - конденсатного месторождения (с уровнями распространения подземных водоносных комплексов и траппового пластового тела и расположения ПЯВ) с использованием данных скв. 51, 703, 95 [Микуленко и др., 2006]: 1 – известняки; 2 – доломиты; 3 – глинистые доломиты; 4 – доломит-ангидриты; 5 – гравелиты; 6 – песчаники, пески; 7 - мергели; 8 - аргиллиты; 9 – пласты каменной соли; 10 – продуктивный пласт; 11 - кристаллические породы фундамента: граниты и гнейсы; 12 – положение траппов перми-триасового времени в геологическом разрезе района; 13 – подземные водоносные комплексы, 14 – ПЯВ.

В среднем и позднем кембрии (521 -488 млн. лет) участок земли явно начал подниматься, поскольку среди сохранившихся до наших времен породах этого периода зафиксированы кроме морских отложений и песчаники и все большее распространение аргиллитовых прослоев. Скорость осадконакопления уменьшилась, участок земли поднимался. В позднем кембрии-раннем ордовике цикл осадконакопления завершился формированием до 330—600-метровой толщи красноцветных мергелей верхоленской свиты, карбонатно-терригенных пород. Последующее поднятие участка земли на территории современного СБНГКМ привело к неравномерному размыву отложений среднего и верхнего кембрия. Потому мощность отложений среднего кембрия – от 30-237 м, мощность отложений верхнего кембрия - от 0 до 100 м.

Последний цикл седиментации проходил в ранне-среднеюрское время, когда на всей территории антеклизы формировались терригенные континентальные отложения мощностью до 200 м. В последующие периоды мезозойской эры и до современной эпохи территория антеклизы представляет собой область сноса, а на современном этапе — и область выщелачивания солей из нижнекембрийских толщ.

Шесть взрывов проведены в подсолевом разрезе в карбонатных породах на глубине около 1.5 км чуть ниже уровня осинского продуктивного горизонта. Седьмой взрыв «Нева-4» проведен в пласте каменной соли на глубине 815 м для создания подземной емкости для хранения нефти, газоконденсатов. Выше полостей взрывов расположены многочисленные пласты каменной соли, которым характерно свойство залечивать трещины и изолировать движение флюидов в геологической среде. Таким образом, традиционно считалось [Мирные..., 2001], что проведение ПЯВ в каменной соли и ниже пластов каменной соли безопасно, поскольку в силу пластичных и газо- и гидроизоляционных свойств каменная соль прекрасно локализует радиоактивное вещество в геологической толще. В настоящей работе как раз ставится задача по верификации изоляционных свойств геологического разреза с многочисленными пластами каменной соли при проведении ПЯВ.

Тектонические нарушения На севере Непско-Ботубинской антеклизы выделяют ряд кулисообразно расположенных антиклинальных структур III порядка платформенного типа. К одной из них, наиболее крупной - Среднеботубинской, приурочено одноименное месторождение (рис.26). В районе развиты разломы сбросово-взбросового типа с амплитудами перемещений 40 м и более, в основном, северо-восточного простирания (рис.27). Длина и ширина Ботубинской антиклинали, в среднем, составляют, соответственно, 105 и 20 км. Наиболее изученным глубоким бурением является центральный блок – самый крупный в системе блоков Среднеботубинского месторождения, восточная граница которого проходит по субмеридиональному дизъюнктивному нарушению,

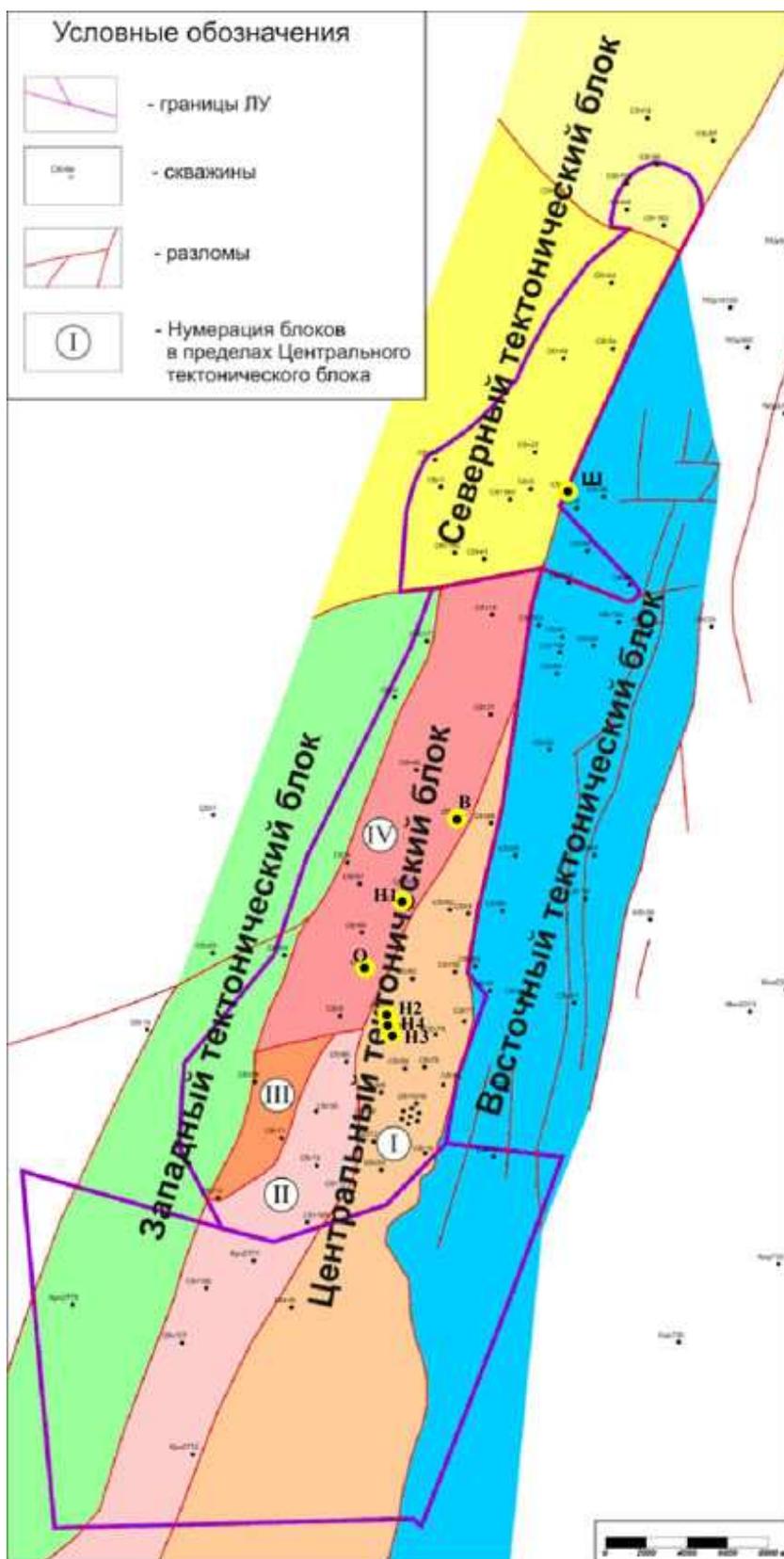


Рис.26. Схема тектонического районирования Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения [передана ООО ТЮНГД в 2010 г.]

Желтыми кружками показано расположение объектов ПЯВ и начальные буквы их названий: Н1- «Нева-1», Н2 – «Нева-2», Н3 – «Нева-3», Н4 – «Нева-4», О – «Ока», В- «Вятка», Ш – «Шексна».

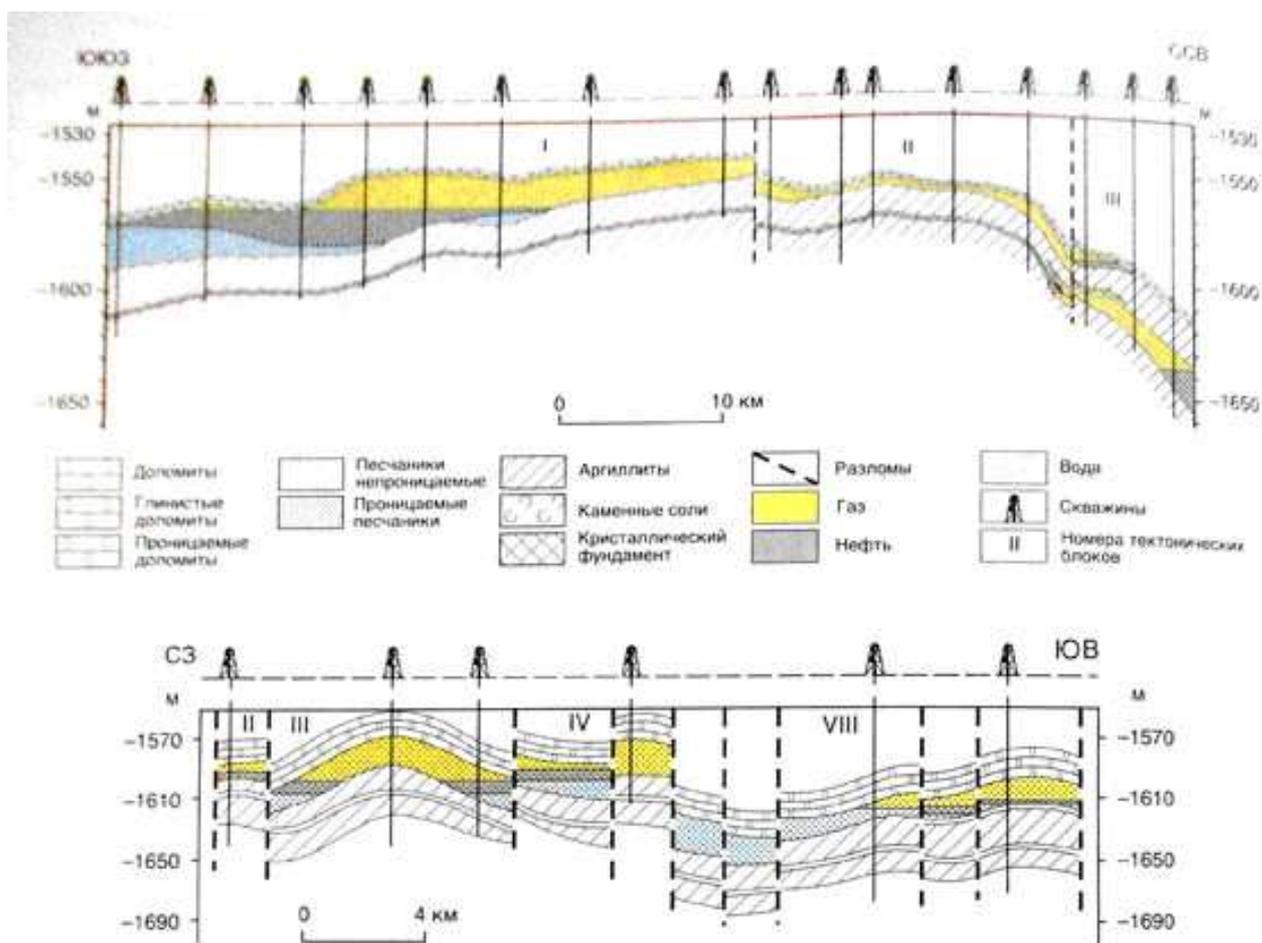


Рис.25. Разрез ботубобинского продуктивного горизонта на Среднеботубобинском нефтегазоконденсатном месторождении и отдельно северной части СБНГКМ – Тас-Юряхском нефтегазовом месторождении [Тектоника..., 2001].

осложняющему Среднеботубобинскую структуру и являющемуся тектонической границей ее сводовой части. Нарушение фиксируется по данным сейсморазведки, аэромагнитной съемки, результатам бурения и опробования скважин. Амплитуда разрывного нарушения составляет около 40 м.

На севере Центральный блок по поперечному разрывному нарушению граничит с северными блоками. Амплитуда разрывного нарушения по структурным построениям составляет 5-10 м, причем Центральный блок является приподнятым относительно северных. Граница с Западным блоком так же проходит по разлому. Впервые этот разлом выделен в 1992 г. по результатам сейсморазведочных работ и бурения на Курунском участке [Микуленко и др., 2006].

Развитие сети многочисленных разломов – естественных флюидопроницаемых геоструктур в СБНГКМ является условием, облегчающем перенос радиоактивного вещества в геологической среде вплоть до выхода на поверхность земли. И это данное свойство

геологической среды СБНГКМ будет со всем вниманием учитываться при радиоэкологическом исследовании района.

Проявление магматизма. В геологическом строении района месторождения принимают участие интрузивные образования двух формаций: средне-палеозойской и перм-триасовой. Средне-палеозойские интрузии представлены дайками долеритов, приуроченных к разломам Вилуйско-Мархинской зоны. Дайки имеют падение близкое к вертикальному на восточном крыле структуры, толщина их достигает 200 м, и они, возможно, могут являться дополнительными экранами для тектонически экранированной залежи в районе скв. № 16. Дайки фиксируются по данным аэромагнитной съемки в виде линейных аномалий преимущественно субмеридионального простирания.

В перм-триасовое время было одноактное внедрение трапповой интрузии: пластовое тело толщиной от 42 до 177 м траппов располагается в карбонатах нижнего кембрия на глубинах 1100–1200 м и ступенчато поднимается в восточной части СБНГКМ до 550 м глубины. В пределах месторождения интрузии трапповой формации приурочены к пяти стратиграфическим подразделениям (юрегинской, эльгянской, толбачанской, олекминской и чарской свитам). Толщина силлов траппов, вскрытых скважинами, изменяется от 42 до 177 м. Траппы в большинстве скважин залегают единым телом, и лишь в редких случаях кроме основного встречаются дополнительные тела значительно меньшей толщины (3-37 м). Судя по тому, что толщина осадочной части свит, прорванных интрузиями, практически не уменьшается, переработка вмещающих пород магматическим расплавом была незначительной и привела лишь к образованию на контакте зон трещиноватости, с которыми связаны интенсивные поглощения бурового раствора.

В западной части Среднеботуобинского месторождения интрузия траппов залегает на абс. отметках минус 860- минус 700 м в виде пластового тела, приуроченного к отложениям юрегинской свиты. В восточном направлении интрузия последовательно ступенчато перемещается в эльгянскую, толбачанскую и олекминскую свиты, поднимаясь на восточном крыле структуры до абс. отметок –300 - -200 м, где она встречена скважинами в отложениях чарской свиты. С уменьшением глубины залегания траппового тела уменьшается и его толщина с 120-110 м на западе до 90-45 м на востоке и севере структуры.

Исходя из характера залегания траппового тела, можно предполагать одноактность внедрения и то, что магмаподводящие каналы находятся западнее Среднеботуобинского месторождения. Поскольку траппы приурочены к солевым и межсолевым отложениям, они не оказывают влияния на строение залежей продуктивных горизонтов.

Природные ландшафты и многолетняя мерзлота. В геоморфологическом отношении СБНГКМ расположено на юге Среднесибирского плоскогорья. В районе развиты ландшафты средней тайги, преимущественно заболоченные, лиственница Каяндера – доминирующая древесная растительность в условиях распространения сплошной многолетней мерзлоты. Рельеф представляет собой равнину высотой 340 - 370 абс.м., речной врез составляет 40-70 м. Долины рек – широкие с пологими склонами и с обширными заболоченными поймами, в пределах которых развита сеть стариц и небольших озер. Основным водотоком района СБНГКМ является р. Улахан-Ботуобуйа и ее правые притоки: рр.Тэлгэспит, Кудулах, Тас-Юрях. Значительную часть (21%) территории месторождения занимают болота и заболоченные участки. Низинные, или травяные (иначе эвтрофные), болота встречаются в понижениях рельефа, в поймах рек и по берегам озер; питание их происходит преимущественно за счет грунтовых вод, относительно богатых питательными веществами. Низинные болота покрыты травяно-кустарниковой растительностью и имеют небольшую мощность торфа; верховые болота в этом районе имеют небольшое распространение (рис.28). Наиболее распространенными типами заболоченности в пределах месторождения



Рис.28. Вид на заболоченные участки средней тайги (фото Артамоновой С.Ю., 2010 г.)

являются периодически переувлажняемые земли, заболоченные луга и леса и низинные болота на водораздельных плато, плоских склонах и в поймах рек (рис.28).

Повсеместно распространена сплошная многолетняя мерзлота, зона отрицательных температур (от 0 до  $-3^{\circ}\text{C}$ ) охватывает четвертичные, юрские и верхнекембрийские отложения (рис.29). Мощность зоны закономерно уменьшается с севера на юг от 300 до 220 м. Незначительное количество замеров не позволяет построить точную карту распределения вечной мерзлоты, но в восточной части месторождения намечается вытянутая аномалия уменьшенных мощностей (до 45-100 м) зоны отрицательных температур. Аномалия имеет субмеридианальное простирание и увязывается в плане с разломом, разделяющим центральный блок от восточного крыла Средне-Ботуобинской структуры. На востоке СБНГКМ отмечается образование наледей, что указывает на уменьшение здесь мощностей толщи многолетней мерзлоты, возможность существования таликовых зон, незамерзающих источников. Мощность деятельного слоя 1-2 м, увеличивается на южных солнечных склонах. Наибольшая толщина сезонного оттаивания (3.5-3.9 м) характерна для водораздельных участков, покрытых сосновым лесом.

Для большинства типов ландшафтов естественная влажность пород составляет 20-35 %. Наряду с мерзлотными таежными палевыми почвами, широкое распространение получили мерзлотные типичные и мерзлотные таежные оподзоленные почвы, развивающиеся на бескарбонатных материнских породах. По мере продвижения к югу наступает пояс мерзлотных дерново-карбонатных почв, развивающихся на элювии кембрийских известняков доломитов.

Гидрогеология. Район СБНГКМ представляет собой кулисообразную вытянутую в субмеридиональном направлении горст-антиклиналь платформенного типа, разбитую на ряд блоков, что обусловило блоковое распространение водоносных комплексов с широким диапазоном пластовых давлений от 4.5 до 32 мПа. Район относится к Якутскому криоартезианскому бассейну. По классификации и районированию Алексева С.В. [2009] – к Вилюй-Ботуобинской криогидрогеологической системе. Выделяют надсолевой, межсолевой и подсолевой водоносные комплексы, насыщенные рассолами. С глубиной хлоридные натриевые рассолы сменяются на метаморфизованные хлоридные натрий-кальциевые рассолы, при этом минерализация увеличивается от 30 до 650 г/л [Анциферов и др., 1984, Анциферов, 1989, Вожов, 1987].

В геологической среде выделено 5 водоносных комплекса (рис.25):

I – нижнекембрийский надсолевой безнапорный на глубинах от 100 до 400 м инфильтрационного типа (21 замер) [Анциферов и др., 1984, Анциферов, 1989, Вожов, 1987]

II – нижнекембрийский межсолевой на глубинах с 500 до 1400 м, с близким к нормальному гидростатическому или повышенным пластовым давлением (12 замеров);

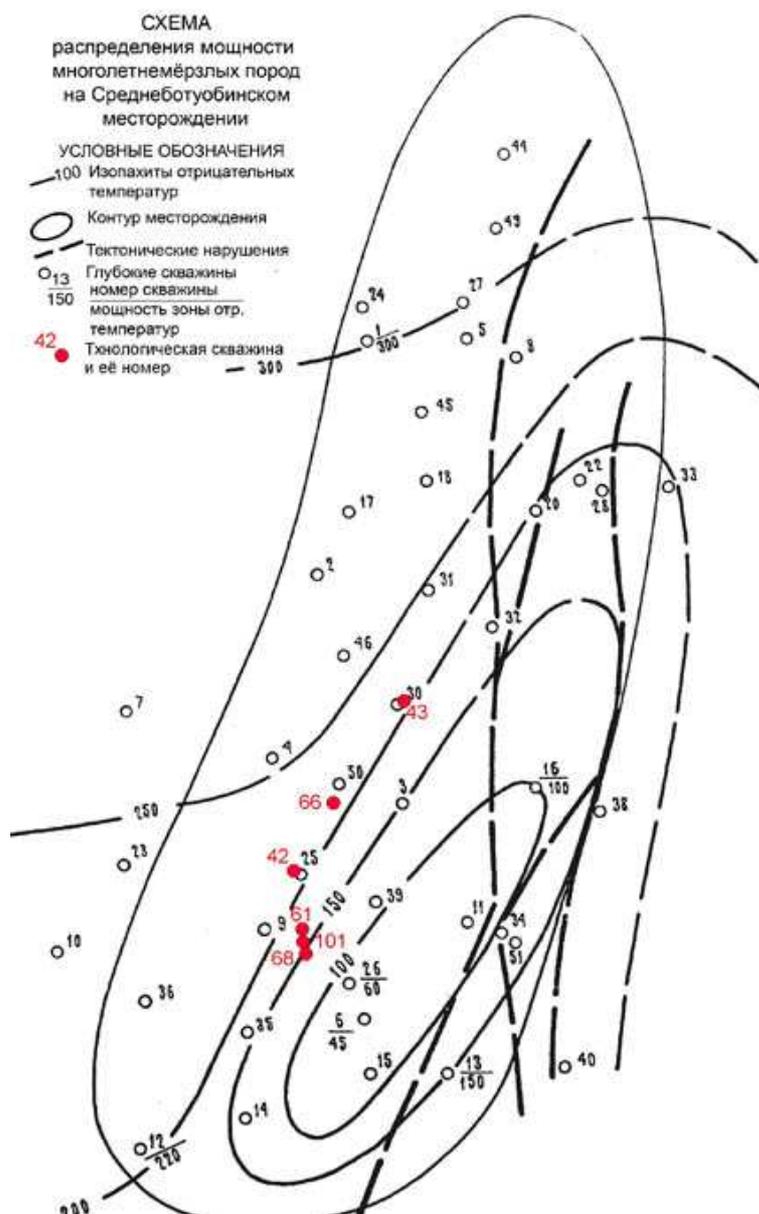


Рис. 29. Схема распределения мощности многолетнемерзлых пород на Среднеботуобинском месторождении [Микуленко и др., 2006]. Кружками показаны объекты ПЯВ.

III – нижнекембрийский подсолевой карбонатный, карбонатный на глубине 1420 – 1530 м с высоким пластовым давлением, от 15.7 до 32 МПа (128 замеров);

IV – вендский карбонатный, вендский карбонатный на глубине 1830-1890 м с пластовым давлением 14 - 16 МПа, что до 2.5 МПа ниже нормального гидростатического;

V – вендский терригенный на глубине 1850-1930 м со средним пластовым давлением 14 МПа, что на 4-5 МПа ниже нормального гидростатического (всего 309 замеров) (табл.9).

Надсолевой I водоносный комплекс содержит подземные воды разного состава: от пресных гидрокарбонатных кальциевых, кальциево-магниевых вод с минерализацией 0.5-1 г/л до хлоридных натриевых рассолов с минерализацией до 300 г/л, в распространении спорадических водоносных горизонтов большую роль играет криолитозона.

Таблица 9. Коэффициенты гидродинамической напряженности водоносных комплексов в пределах Непско-Ботуобинской антеклизы [Анциферов, 1989]

Водоносный комплекс	Диапазон	среднее	число определений
I – нижнекембрийский надсолевой	0.33-1.07	0.88 (16)	21
II – нижнекембрийский межсолевой	0.92-1.66	1.14	12
III – нижнекембрийский подсолевой	0.48-1.59	1.05	128
IV – вендский карбонатный	0.64-1.23	0.95	260
V – вендский терригенный	0.66 -1.08	0.8	49

Коэффициент гидродинамической напряженности рассчитывается по отношению измеренного пластового давления на нормальное гидростатическое давление.

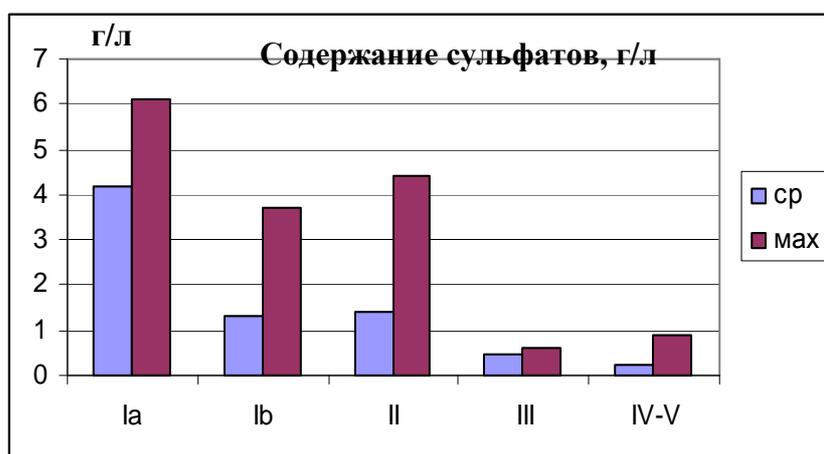
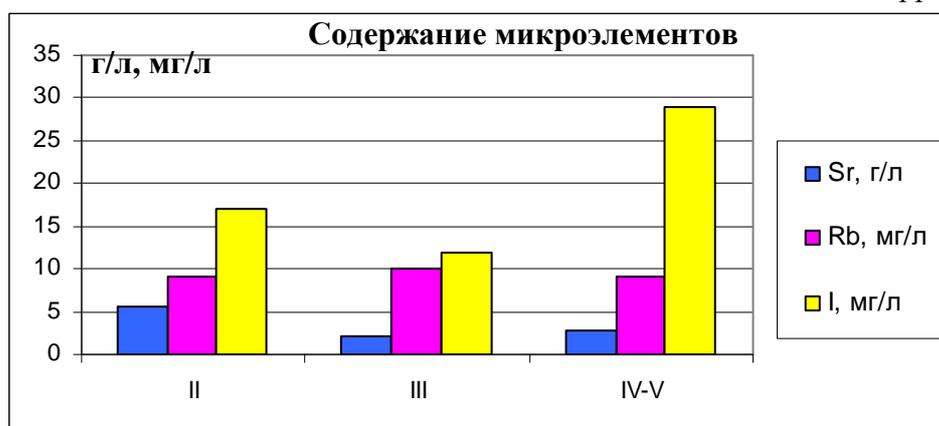


Рис.30. Содержание сульфатов (г/л) и микроэлементов в подземных водах и рассолах подземных водоносных комплексов [Анциферов и др., 1989]: Ia,б – нижнекембрийского надсолевого; II – межсолевого, III – подсолевого; IV -V – вендских карбонатного и терригенного.



Надсолевой водоносный комплекс содержит подземные воды разного состава: от пресных гидрокарбонатных кальциевых, кальциево-магниевых вод с минерализацией 0.5-1 г/л до хлоридных натриевых рассолов с минерализацией до 300 г/л, в распространении спорадических водоносных горизонтов большую роль играет криолитозона. Особенностью I

надсолевого водоносного комплекса является содержание в них большого количества сероводорода [Анциферов, 2004], также наблюдается высокое содержание  $\text{SO}_4^{2-}$  (до 6.1 г/л). Выход сероводорода на поверхность земли в заболоченных местах придает характерный запах.

Для межсолевого водоносного комплекса характерны хлоридные натриевые рассолы с минерализацией до 100 г/л [Алексеев, 2009].

Для III-V подсолевых водоносных комплексов характерны метаморфизованные хлоридные натрий-кальциевые рассолы с минерализацией 350-450 г/л [там же]. В рассолах содержание  $\text{Br}^-$  увеличивается с глубиной – до 4.43 г/л в рассолах вендских водоносных комплексов.

Для межсолевого II водоносных и подсолевого III комплексов развита элизионная водонапорная система с блоковым распространением, обусловленным тектоническими разломами, разбивающими геологическую среду на отдельные блоки. Элизионная водонапорная система, характерная для верхней и средней частей геологического разреза, около подошвы платформенного чехла на глубине 1800–2100 м сменяется на аномально – депрессионную с дефицитом пластового давления от 2.5 до 5 МПа. Причины развития аномально низких пластовых давлений в I и II вендских водоносных комплексах СБНГКМ остается открытым вопросом. По мнению авторов [Яковлев, Семашев, 1982, Вожов, 1987, Карцев, Матусевич, Яковлев, 1989] вероятнее всего уход рассолов по трещинам в фундамент платформы привел к образованию депрессионной водонапорной системы. По мнению авторов [Абукова, Яковлев, 2008, Абукова и др., 2011] недра СБНГКМ на уровне вендских водоносных комплексов как нельзя хорошо подходят для захоронения РАО даже при условии одновременной добычи нефтепродуктов из приуроченного к этим водоносным горизонтам ботубинского продуктивного пласта. Возможно, уход рассолов в трещины фундамента платформы привел к образованию аномально низких пластовых давлений в нижней части разреза [Яковлев, Семашев, 1982, Вожов, 1987, Карцев и др., 1989].

Выделяются два основных продуктивных горизонта: осинский – у кровли III водоносного горизонта в нижнекембрийских пористо-кавернозных и трещиноватых известняках и доломитах с прослоями аргиллитов на глубине примерно 1500 м и ботубинский – в кровле I водоносного комплекса в вендских песчаниках на глубине ~ 1850 - 1900 м (рис.31). Шесть ПЯВ на СБНГКМ были проведены практически у водоносного горизонта чуть ниже осинского продуктивного горизонта для усиления его нефтеотдачи и выхода газов, то есть рядом с флюидопроницаемыми естественными геоструктурами. Со времени взрывов отработка осинского продуктивного горизонта приостановлена, сейчас идет добыча углеводородов с нижезалегающего ботубинского продуктивного горизонта.

Существующие гидрогеологические условия СБНГКМ считаются весьма благоприятными для захоронения промышленных радиоактивных и токсичных отходов [Абукова, Яковлев, 2008, Абукова и др., 2011], тем более эти условия должны обеспечивать локализацию радиоактивных веществ в полостях взрывов ПЯВ и препятствовать их переносу

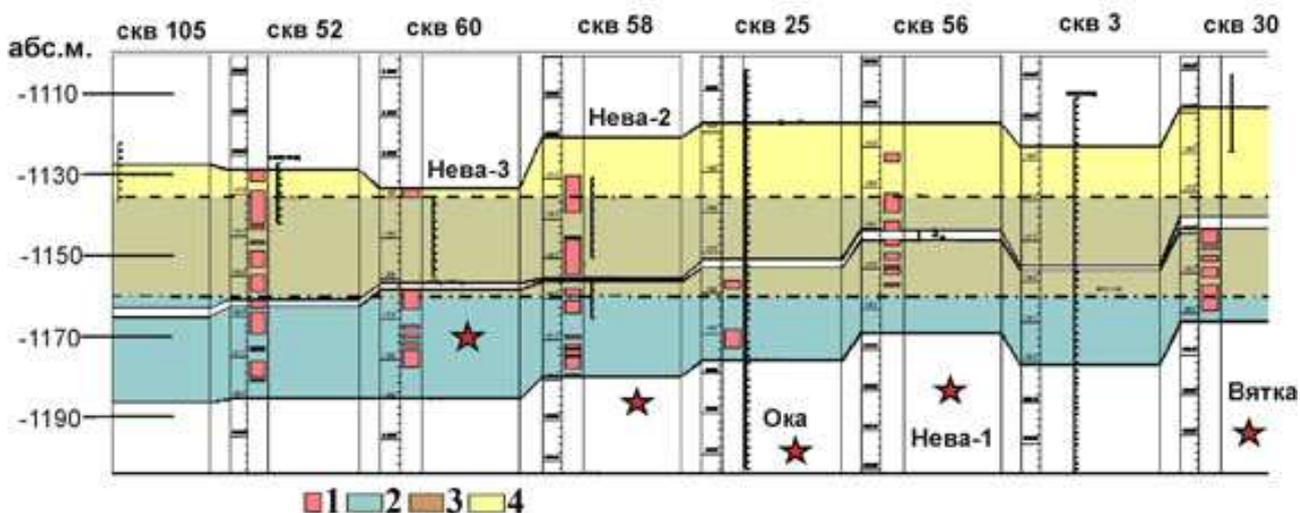


Рис. 31. Интервалы осинского продуктивного горизонта на Среднеботуобинском нефтегазоконденсатном месторождении по данным скважин [по данным ТЮНГД, 2010]. Условные обозначения: 1 – интервалы эффективных мощностей; пласты: 2 – водонасыщенный, 3 – нефтенасыщенный, 4 – газонасыщенный, звездочками показаны расположение уровней ПЯВ в геологическом разрезе.

в геологической среде. Усиливающим изолирующее свойство геологической среды СБНГКМ является литологическое строение, а именно покрывка из многочисленных пластов каменной соли, которая в силу пластичности и непроницаемости согласно сложившемуся мнению [Мирные..., 2001] препятствует выходу вероятных потоков радионуклидсодержащих подземных флюидов на поверхность земли.

Наличие сети тектонических разломов, 5-ти водоносных комплексов, проведение ПЯВ рядом с подземным водоносным и продуктивным горизонтом, наличие траппового тела с трезиноватой приконтактной зоной, высокая разбуренность территории – эти все флюидопроницаемые естественные и техногенные геоструктуры осложняют строение геологической среды и взаимосвязи в геотехногенных системах «полость взрыва – вмещающая геологическая среда --- поверхность земли». В настоящей работе на эти изолирующие свойства геологической среды СБНГКМ соискатель обращает особое внимание, ставя перед собой задачу их верификации в геотехногенной системе «полость взрыва – вмещающая геологическая среда --- поверхность земли» путем радиоэкогеохимического изучения поверхностных вод и подземных рассолов.

### 2.3. Район ПЯВ «Кратон-4»

Геологическая изученность района ПЯВ «Кратон-4» связана с промышленным освоением газоконденсатных месторождений в пределах Вилюйской синеклизы. Вместе с тем опубликованных работ по геологическому строению району немного.

Геологическое положение. Район расположен на переходной зоне Вилюйской синеклизы в Предверхоянский краевой прогиб (рис.7) на восточном склоне погребенного Хапчагайского мегавала – основной геологической структуры II порядка. В позднем палеозое формируются Вилюйская синеклиза и протяженная линейная зона опускания на восточной и северной окраинах Сибирской платформы, которые сливались с располагавшейся восточнее, на месте Верхоянского складчато-надвигового пояса миогеоклиналью (пассивной континентальной окраиной). Формирование Вилюйской синеклизы и зоны опускания, которые представляют собой единый Вилюйский осадочный бассейн, следует рассматривать как результат термального прогибания земной коры, которое последовало после разогрева и утонения коры в данных районах в процессе девонского и раннекаменноугольного рифтогенеза [Тектоника .., 2001]. Верхнепалеозойский структурный ярус в пределах Сибирской платформы включает отложения среднего-верхнего карбона и перми и представлен исключительно терригенными континентальными угленосными и прибрежно-морскими отложениями, которые накапливались в основном в пределах Вилюйской синеклизы и Предверхоянского краевого прогиба. Термальное опускание восточной части платформы, начавшееся в среднем карбоне, сохранялось и в мезозойское время [Тектоника .., 2001]. Продолжается формирование осадочных бассейнов, начавшееся в позднем палеозое. В мезозойское время район постоянно погружался, заполняясь терригенными породами, сносимыми со стороны Сибирской платформы. В опускание втягиваются борта осадочных бассейнов. Юрские отложения залегают трансгрессивно, запечатывая отложения триаса и верхнего палеозоя

Литологическое строение. Геологическая среда сложена терригенными породами мезозоя и верхнего палеозоя общей мощностью до 6 км, представленными песчаниками, перемежающимся слоями аргиллитов, алевролитов, гравелитов (рис.32). На поверхность выходят породы нижнего мела: 0-50 м – пески; 50-100 м – переслаивание алевролитов, 100-420 м – песчаники с переслаиванием алевролитов и аргиллитов; 420-500 м – песчаники; 500-550 м – алевролиты и аргиллиты, ниже 550-574 – песчаники [Микуленко и др., 2006].

Верхнеюрские и меловые отложения выполняют Предверхоянский краевой прогиб, примыкающий к фронту Верхоянского складчато-надвигового пояса и сливающийся с Вилюйской синеклизой. Они образованы преимущественно континентальными песчаниками, песками, алевролитами, глинами и углями. Мощность их максимальна (до 4500 м) вблизи

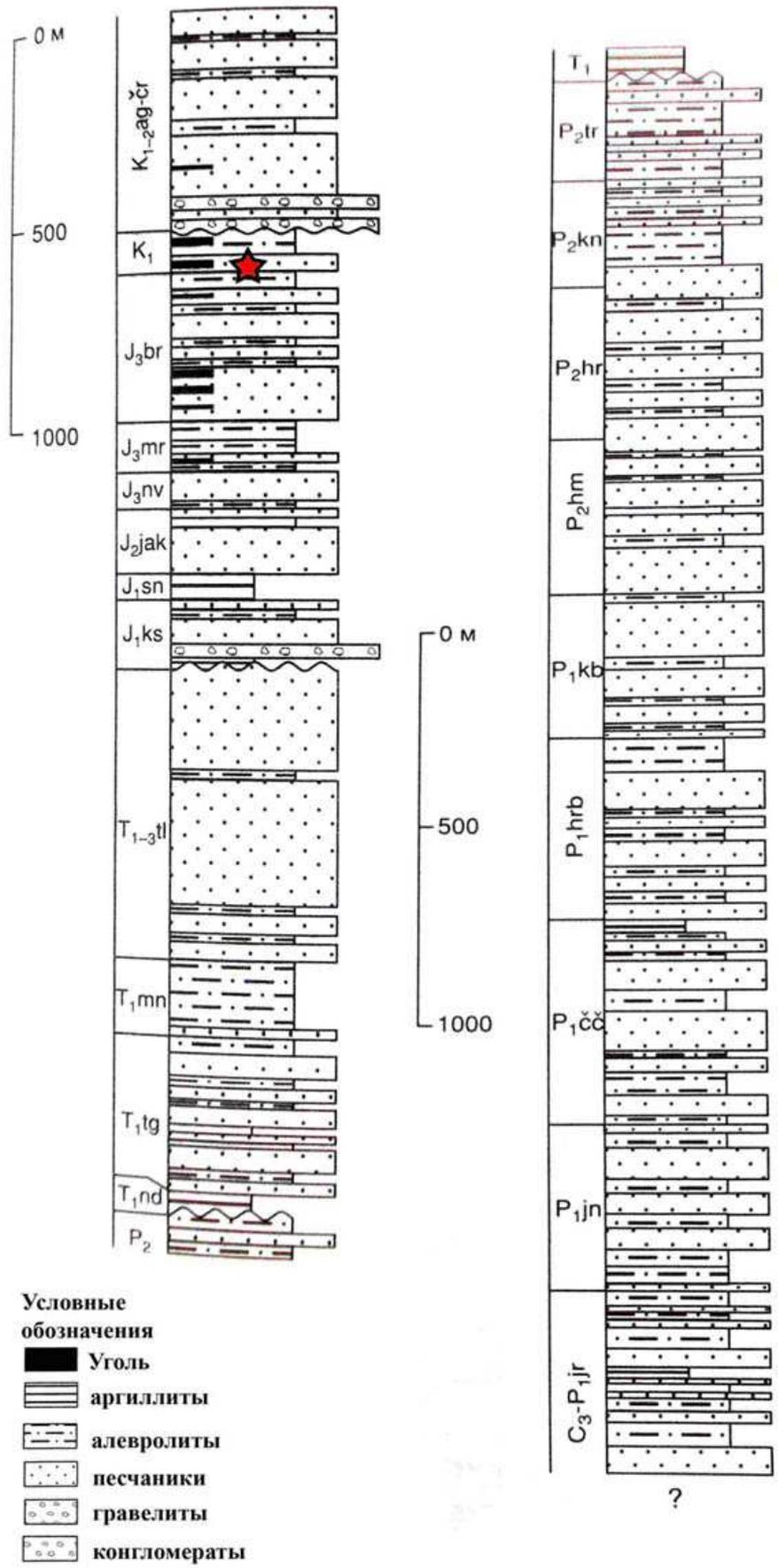


Рис.32. Литолого-стратиграфическая колонка района ПЯВ «Кратон-4» Средневиллюйская свк. 27 [Тектоника ...,2001] Возрастные подразделения и свиты: C<sub>3</sub>-P<sub>1</sub>jr - юренская, P<sub>1</sub>jn - юнкюрская, P<sub>1</sub>сс - чочосская, P<sub>1</sub>hrb- харбалахская, P<sub>1</sub>kb - кубалангдинская, P<sub>2</sub>hm - хомустахская, P<sub>2</sub>hr- харыйасская, P<sub>2</sub>kn - кундейская, P<sub>2</sub>tr - тарагайская, P<sub>2</sub> - верхнепермские отложения, T<sub>1</sub>nd - неджелинская, T<sub>1</sub>tg - таганджинская, T<sub>1</sub>mn - мономская, T<sub>1-3</sub>tl - тулурская, J<sub>1</sub>sn - сунтарская, J<sub>1</sub>ks - кзылсырская, J<sub>2</sub>jak - якутская, J<sub>3</sub>nv - нижневиллюйская, J<sub>3</sub>mr - марыкчанская, J<sub>3</sub>br - бергеинская, K<sub>1</sub>- нижнепермские отложения, K<sub>1</sub>ag-cr - аграфеновская - чиримыйская. Звездочкой показано уровень расположения объекта МПЯВ в геологической среде.

фронта Верхоянского складчато-надвигового пояса и резко уменьшается (до нескольких сотен метров) в сторону платформы. В нижней части разреза присутствуют мелководные прибрежно-морские отложения. Смена морских отложений на континентальные в большей части бассейна произошла в поздней юре, на севере - в начале раннего мела. В Предверхоянском прогибе преобладают фации озерно-аллювиальных равнин, которые в сторону платформы сменяются фациями руслового аллювия, а к северу, по простиранию прогиба фациями приморской аллювиальной равнины и прибрежного мелководья [Япаскурт, 1992]. Верхнемеловые отложения (до 1000 м) представлены континентальными грубозернистыми песками и песчаниками, каолиновыми глинами, характерны прослой бурых углей, лигнитов и конгломератов. Триасовые, нижне- и среднеюрские отложения (до 700 м) представлены преимущественно морскими мелководными песчано-глинистыми образованиями, которые на северо-западном и юго-восточном бортах Вилюйской синеклизы замещаются континентальными песками и конгломератами мощностью до 200 м.

Тектонические нарушения. По мнению ряда исследователей, Вилюйская синеклиза представляет собой рифтогенную зону, основной этап формирования которой связывают с девонским периодом, которая приурочена в среднем течении р. Вилюй у восточной границы Сибирской платформы [Левашов, 1975, Гайдук, 1988]. Н.С. Шатский [1958]— один из основоположников понятия о рифтах и возникающих на их месте в результате тектонической инверсии авлакогенов («бороздой рожденных»), еще в середине 40-х годов XX в. полагал наиболее вероятными местами зарождения рифтов внутренние (входящие) углы ограничения древних платформ. Действительно, восточная граница Сибирской платформы в бассейне нижнего течения р. Вилюй образует входящий на юго-запад угол, подчеркнутый изгибом Верхоянской складчато-надвигового пояса позднепалеозойско-мелового возраста. Обширная (более 300 тыс. км<sup>2</sup>) Вилюйская гемисинеклиза, выполненная верхнепалеозойско-меловыми терригенными осадками суммарной толщиной более 10 км, представляет собой типично платформенную депрессию с практически не нарушенными крупноамплитудными сбросами бортами и обширным относительно плоским днищем. На поверхности Мохо под Вилюйской гемисинеклизой выявляется крупное воздымание, что в полной мере соответствует условиям изостазии [Старосельцев, 2009].

Тектонические особенности района предопределяются влиянием Верхоянского складчато-надвигового пояса (рис.33), под его влиянием в зоне перехода Вилюйской синеклизы в Предверхоянский прогиб сформировался Хапчагайский мегавал – структура II порядка (рис. 34). Основными тектоническими дизъюнктивными нарушениями являются примыкающие с востока надвиговые зоны. По оси Хапчагайского мегавала вдоль русла р. Вилюй развит тектонический разлом широтного простирания (рис.35) [Микуленко и др.,

2006].



Рис.33. Геологический разрез через Куранахский сегмент Верхоянского складчато-надвигового пояса и Предверхоанский краевой прогиб [Тектоника..., 2001]

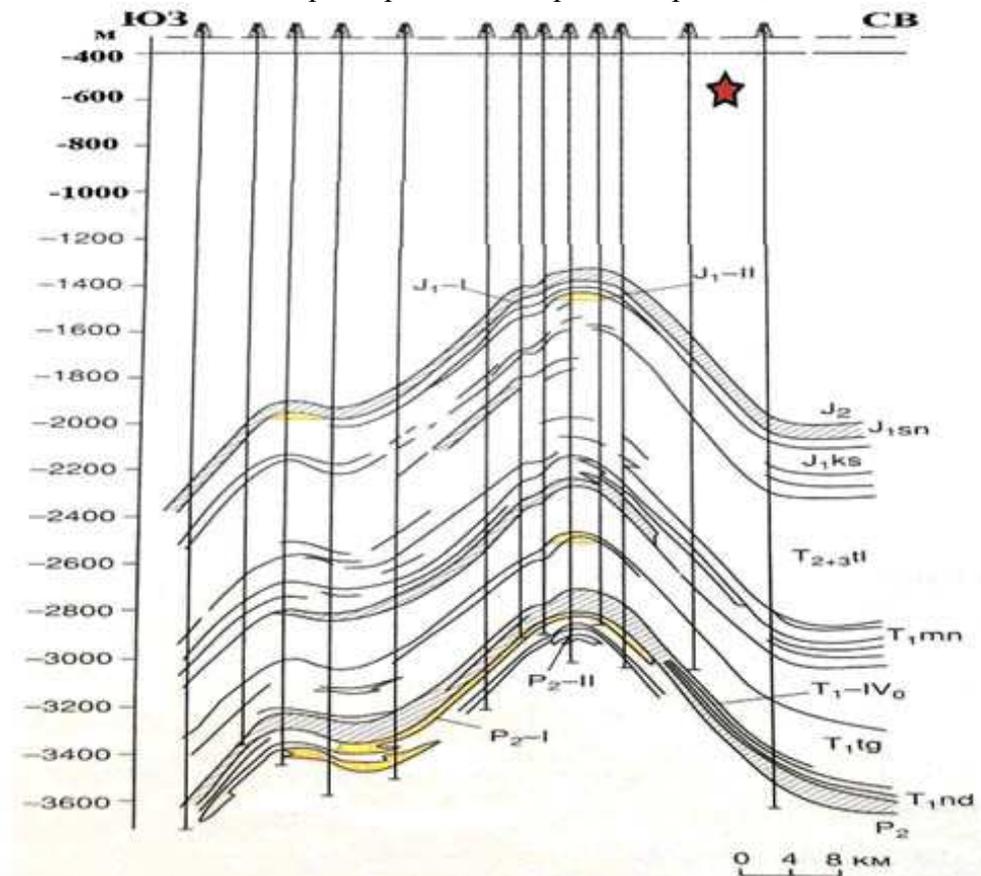


Рис. 34. Геологический разрез Хатчагайского мегавала в переходной зоне Вилюйской синеклизы и Предверхоанского прогиба. Условные обозначения см. рис.22, косым штрихом показаны аргиллитовые покрывки структурных ловушек для газоконденсатных залежей (желтый цвет) Соболюх-Неджелинской группы месторождений [Тектоника, ... 2001], дополнительно показано положение объекта ПЯВ «Кратон-4» в виде звезды.

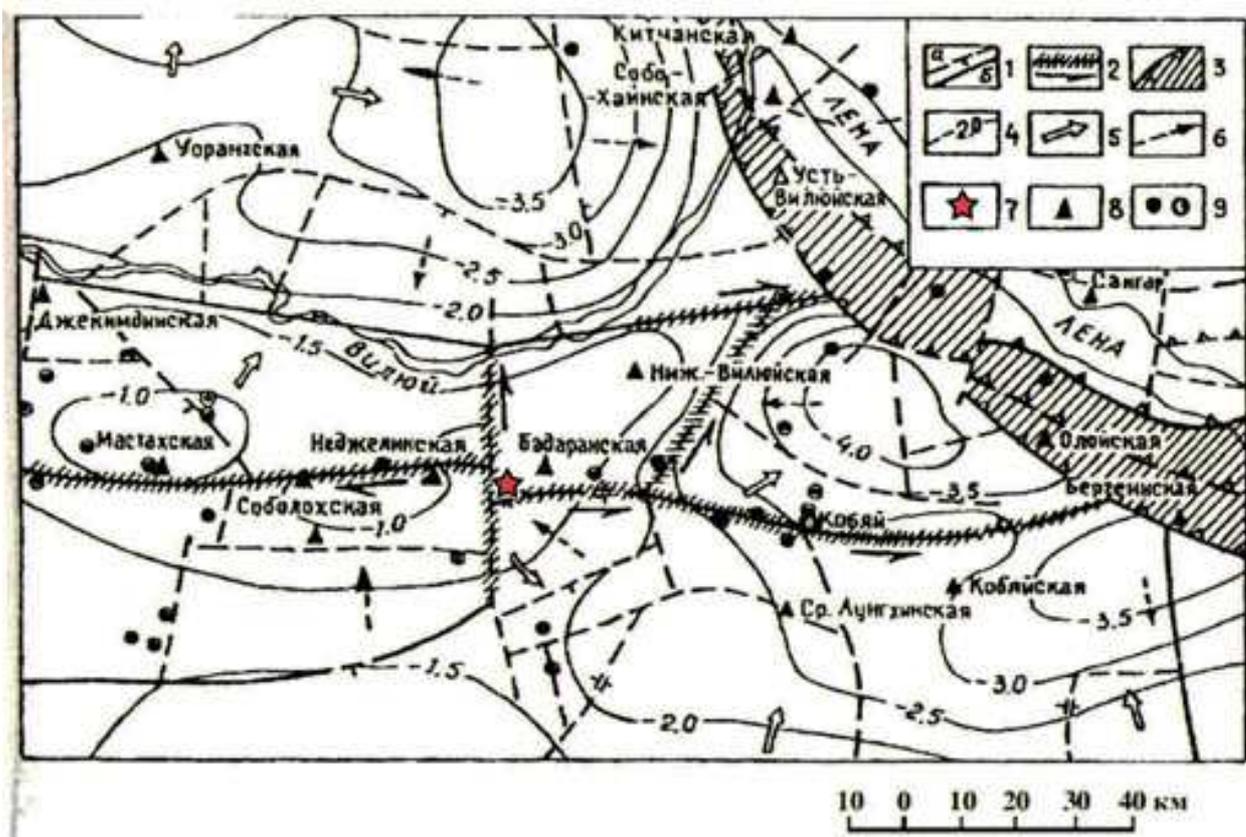


Рис. 35. Структурно-тектоническая схема района ПЯВ «Кратон-4» (составили КИ. Микуленко, Ю.Х. Протопопов, А.И. Чомчоев)[Микуленко и др., 2006]. Условные обозначения: 1- тектонические разломы: установленные (а), предполагаемые (б), 2 – флюидопроводящие разломные зоны и направления (показаны стрелками) флюидов вдоль них; 3 – тектонические флюидобарьеры; 4 – стратоизогипсы (км) подошвы нижнемеловых отложений; 5 – главные направления миграции подземных вод в верхней части разреза; 6 – главные направления миграции углеводородов ; 7 – эпицентр ПЯВ; 8 – глубокие скважины нефтеразведочных площадей; 9 – населенные пункты.

Магматические проявления в районе ПЯВ «Кратон-4» отсутствуют.

Природные ландшафты и многолетняя мерзлота. Район объекта ПЯВ «Кратон-4» расположен в бассейне р. Вилуй на слабохолмистой низменности с высотами ~ 90 (до 100) абс.м., которая является частью Центрально-Якутской равнины [Мерзлотные ландшафты..., 1989]. В районе много озер термокарстового происхождения, а также распространены речные старицы (рис36). Болотистые водотоки со слабым течением текут в северо-восточном (локально в районе «Кратон-4» заворачивают немного в северо-западном направлении) и разгружаются в р. Вилуй. К северу от района простирается Линденская впадина с развитыми на ней болотистыми ландшафтами. Рельеф равнинный аккумулятивный, песчано-грядовый на низких и средневысотных речных террасах, на которых развиты среднетаежные ландшафты. Подстилающие терригенные породы обусловили развитие на поверхности ландшафтов сосновых лесов и распространения тукуланов – сыпучих песков, формирующих под действием ветра дюнообразные формы

микро- и мезорельефа. На космоснимке тукуланы дешифрируются в виде светлых (белых) площадей, простирающихся в юго-восточном направлении, по-видимому, по направлению господствующих ветров (рис.36).



Рис.36. Космоснимок Landcat района ПЯВ «Кратон-4» (отмечено звездочкой). Белые пятна юго-восточного простирания – тукуланы (дюны), темные пятна - озера

В пределах Вилюйской синеклизы характерно развитие сплошной многолетней мерзлоты, глубина отрицательных температур в породах достигает 500-600 м. В районе сочленения Вилюйской синеклизы и Предверхоянского краевого прогиба выявлено сложное мерзлотное строение и уменьшение мощности многолетнемерзлых пород за счет их оттаивания снизу в результате влияния восходящих потоков внутриземного тепла по зонам надвигов со стороны Верхоянского складчато-надвигового пояса [Балобаев, 1998, Семенов, Железняк, 2013]. На западе Хапчагайского мегавала (площадка Средневилюйская) (рис.34) изотерма  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  проходит на глубине 550-600 м, и здесь развита стационарная многолетняя мерзлота, которая по мере продвижения к востоку становится меньше по мощности (рис.37) и появляется нестационарность: поток тепла в подмерзлотной талой зоне намного выше потока тепла в мерзлой толще до  $30\text{-}34\text{ мВт/м}^2$  [Семенов, Железняк, 2013]. Так, на площадке Усть-Вилюйская изотерма  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  уже проходит на глубине 150 м. Потоки внутриземного тепла с запада на восток в пределах Хапчагайского мегавала увеличиваются с  $40\text{-}45\text{ мВт/м}^2$  до  $50\text{-}60\text{ мВт/м}^2$  [Семенов, Железняк, 2013]. Под руслом р. Лена развит сквозной талик (мерзлота отсутствует).

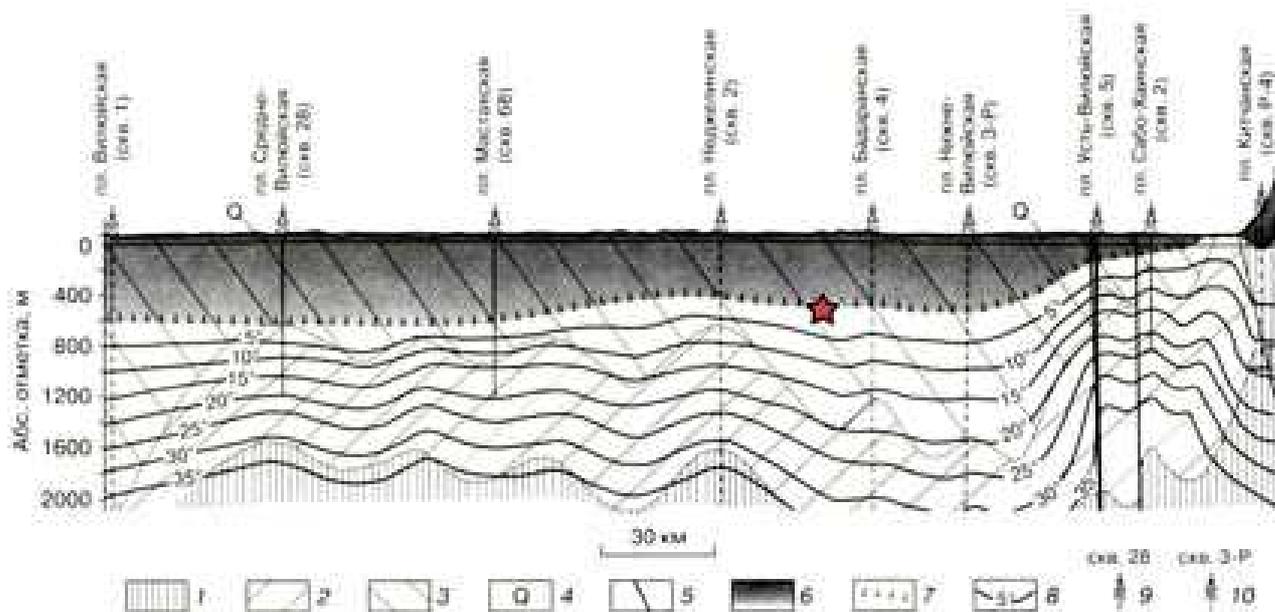


Рис.37. Профиль многолетней мерзлоты на Хатчагайском мегавале в зоне сочленения Вилюйской синеклизы и Предверхоанского краевого прогиба [Семенов, Железняк, 2013] с указанием местоположения объекта ПЯВ «Кратон-4» (положение профиля в плане см. на рис. 33).

1 - песчаники, алевролиты, аргиллиты, глины (Т); 2 - песчаники, песчаники с чередованием аргиллитов, алевролитов и глин (J); 3 - песчаники, песчаники с прослоями алевролитов, аргиллитов, бурых, каменных углей и лигнита (К); 4 - песок, супесь, суглинок (Q); 5 - линии тектонических нарушений; 6 - толщина мерзлых пород; 7 - подошва толщи многолетнемерзлых пород; 8 - изотерма, °С; 9, 10 - название площади, скважина и ее номер, глубина выполненных исследований: 9 - точечные геотермические измерения, 10 - стандартный каротаж (в том числе термокаротаж).

В верхней части изотермы характерен участок мощностью до 200 м с отрицательным градиентом  $-0.58\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ , затем безградиентный участок мощностью до 160 м, а ниже градиент изотермы становится устойчиво положительным и плавно растет от 0.4 до  $3.6\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$  [Семенов, Железняк, 2013].

Математическое моделирование поля гидростатического давления в подмерзлотной зоне с разной степенью закрытости показало особенности протекания процессов [Балобаев, 1998]. В частности, показано, что в сильно закрытой системе при оттаивании мерзлой толщи снизу обнаружен процесс внутрипорового преобразования воды в пар, что, несомненно, должно способствовать переносу и выходы на поверхность земли подземных флюидов, в том числе радиоактивных, при открытии подмерзлотной системы в зоне тектонических разломов, надвигов и сквозных таликов.

На подстилающих суглинках и алевролитах широко развито полигонально-жильное льдообразование. Район ПЯВ «Кратон-4» расположен в зоне сплошной мерзлоты на подстилающих песках, мощность многолетнемерзлых пород составляет 400 - 500 м., то есть

взрыв на глубине 574 м был произведен ниже многолетнемерзлых пород. На подстилающих песках мощность сезонно- талого слоя гораздо больше, здесь происходит более глубокое проникновение метеорных вод и развитие зоны аэрации. При наличии в мерзлой толще таликовых щелей при сезонном оттаивании наблюдается всасывание воды с поверхности в подмерзлотную зону, при промерзании - выжимание воды на поверхность по таликовой щели [Балобаев, 1998], и эти процессы также способствуют движению подземных вод в геологической среде района.

Гидрогеология. Район относится к Якутскому криоартезианскому бассейну. Выделяется 3 водоносных комплекса [Тектоника..., 2001]. 1) Водоносный комплекс пермских отложений изолирован от триасового 80-1000 метровой водоупорной пачкой аргиллитов и алевролитов неджелинской свиты. Пластовые давления в трещинно поровых коллекторах меняются от 26 МПа на крыльях складки до 48.5 МПа в своде Хапчагайского мегавала, при этом превышение пластовых давлений над нормальными гидростатическим давлением составляет от 10 до 15 МПа. Характерны слабые хлоридные натриевые рассолы с минерализацией от 44 до 180 г/л.- Температура флюидов и пород по мере его погружения с запада на восток возрастает от 60-70 °С до +87-95 °С.

2) Нижнетриасовый водоносный комплекс сложен песчаниками таганджинской свиты с изменчивой водообильностью с дебитами до 300-500 м<sup>3</sup>/сут. Пластовые давления в своде Хапчагайского мегавала превышают нормальные гидростатические давления на 0.3 -1.8 МПа. Температура флюидов и пород по мере его погружения с запада на восток к Предверхолянскому краевому прогибу возрастает от 50-70 °С до +90-95 °С. Минерализация подземных вод возрастает с запада на восток от 20 до 110 г/л, состав подземных вод хлоридный кальциево-натриевый (см. рис.38).

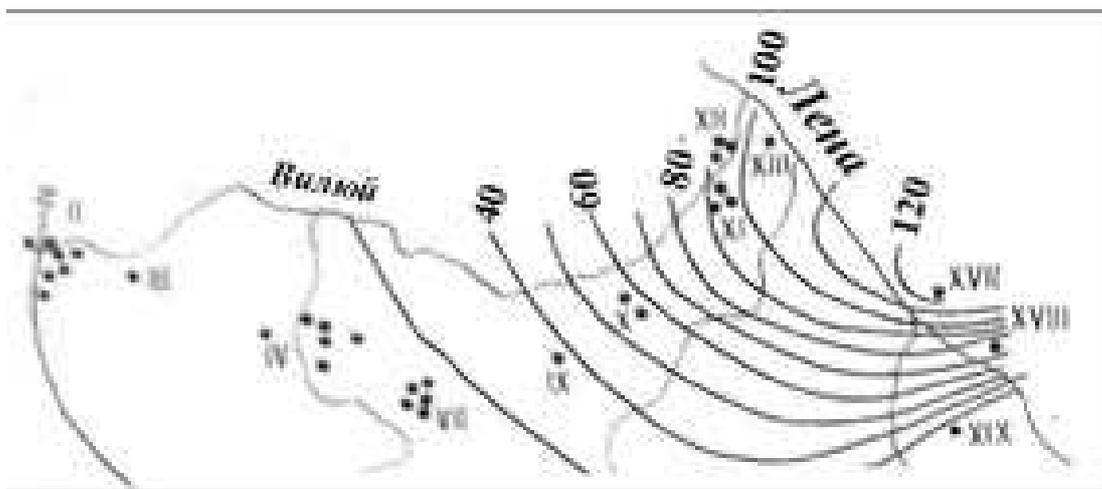


Рис.38. Схема распределения значений минерализации в напорном нижнеюрском водоносном комплексе района ПЯВ «Кратон-4». По В.И.Вожову [1987].

3) Водоносный комплекс среднего, верхнего триаса и нижней юры не выдержаны по простиранию, имеют региональную покрывку из аргиллитовых пачек, и пластовые давления в своде Хапчагайского мегавала превышают нормальные гидростатические давления до 0.5 - 1.0 МПа. В юго-западном направлении хлоридные натриевые воды постепенно переходят в хлоридно-гидрокарбонатные, минерализация вод снижается от 125 до 20 г/л и менее.

Хапчагайский мегавал сверху перекрыт слабо литифицированными алевролитами и песчаниками средней и верхней юры и нижнего мела [Микуленко и др., 2006] мощностью до 1200 м. И здесь средне-верхнеюрско-меловой водоносный комплекс ввиду обособленности от нижележащих комплексов при отсутствии регионального водоупора сверху и влияния метеорных вод отличается гидрогеодинамическими и гидрогеохимическими условиями. Пластовые давления на большей части района аномально низкие, на 1.0-1.5 МПа ниже условно гидростатического, хотя влияние многолетнемерзлых пород может приводить к созданию подпора. В целом, в верхней части разреза в слаболитифицированных песчаниках развита инфильтрационная водонапорная система с блуждающими горизонтами пресных подземных вод с латеральным направлением движения к северо-востоку-востоку по склону погребенного Хапчагайского мегавала в сторону долины р. Лена. По мнению авторов [Микуленко и др. 2006] наличие тектонических разломов широтного простирания еще больше способствует движению подземных флюидов в верхней части разреза к востоку. Эта простая гидрогеодинамическая система верхней части разреза, по –видимому, должна быть осложнена влиянием восходящих глубинных потоков минерализованных подземных вод, поступающих по зонам надвиговых нарушений со стороны Верхоянского складчато-надвигового пояса. Минерализация подземных вод к востоку в сторону Предверхоанского прогиба и в северу в сторону Линденской впадины повышается до 30 г/л, а температура возрастает от 36-55°C до 73-93°C.

Таким образом, при наличии литологических водоупоров в структуре Хапчагайского мегавала и восходящих глубинных потоков минерализованных подземных вод, поступающих по зонам надвиговых нарушений со стороны Верхоянского складчато-надвигового пояса, к востоку от западного склона Хапчагайского мегавала (к востоку от района ПЯВ «Кратон-4») инфильтрационная водонапорная система переходит в элизионную водонапорную систему с юго-западным региональным направлением движения подземных вод. Именно в результате влияния глубинных подземных рассолов Верхоянского складчато-надвигового пояса в подземных водах района наблюдается повышение минерализации и температур в восточном направлении. А с глубиной увеличивается превышение пластовых давлений над нормальным гидростатическим уровнем.

Вместе с тем в своде Хапчагайского мегавала на глубинах от 1500 до 3300 м в литологических ловушках пористых песчаников, разделенных флюидоупорными пластами аргиллитов мощностью от 60 до 100 м, образованы газоконденсатные залежи (рис.34). Здесь выявлены месторождения: Соболюхское, Неджелинское, Люксугунское, Нижневилуойское и др.. Структура месторождений по кровле пермских отложений представляет собой крупную брахиантиклиналь субширотного простирания с размерами по замкнутой изогипсе - 3100 м 37x21 км, с амплитудой около 300 м. Выделяют три основные продуктивные горизонты: Неджелинский на глубинах от -3500 до -2920 м. на верхнепермских аргиллитах, таганджинский на глубинах от -2700 до - 2430 м, кзылсырский – на глубинах -1450 - -1300 м. Продуктивные горизонты снизу подпираются вышеуказанными подземными водоносными горизонтами.

#### **2.4. ВЫВОДЫ. Влияние особенностей геологической среды на развитие геотехногенных систем ПЯВ.**

1. Сибирская платформа - этот устойчивый крупный участок континентальной земной коры со спокойным тектоническим режимом и низким уровнем сейсмичности, что обеспечивает полостям ПЯВ, содержащих опасные ядерные отходы, относительную устойчивость и сохранность в геологическом интервале времени при низкой вероятности катастрофических геологических процессов, как землетрясения, вулканы.
2. Все 10 рассматриваемых в работе ПЯВ были проведены в осадочных породах на глубинах от 98 до 1541 м. из них 8 взрывов – в известняках и доломитах, 1 – в пласте каменной соли, 1 – в кварц-полевошпатовых слаболитифицированных песчаниках.
3. Карбонатные породы отличаются хрупкостью и высокой газовостью: от 24 до 43 % [Адушкин, Спивак, 2007]. Эти свойства пород могли способствовать развитию аварийной ситуации при ПЯВ «Кристалл» и «Кратон-3», также появлению повышенной трещиноватости пород – новых техногенных флюидопроницаемых геоструктур, по которым мог осуществляться перенос радионуклидов в геологическую среду и выход на поверхность земли.
4. Соленосные пласты обладают текучестью и способностью самозалечивания трещин, и перекрывают сверху места 7-ми ПЯВ на Среднеботуобинском нефтегазоконденсатном месторождении. Покрышка из пластов каменной соли способствует изоляции подземной радиоактивности в полостях взрывов.
5. Слаболитифицированные песчаники района ПЯВ «Кратон-4» в отличие от карбонатных пород обладают большей пористостью и проницаемостью, что, возможно, позволяет беспрепятственному движению радиоактивных флюидов в геологической среде. Вместе с

тем, именно в силикатных породах при взрыве формируется мощная зона сжатия и сплавления пород вокруг полости ПЯВ, приводящая к образованию мощной корки из алюмосиликатного расплава вокруг полости взрыва, препятствующей распространению радионуклидов в геологической среде.

6. Взрыв «Кратон-3» проведен у тектонического разлома, также все семь взрывов на Среднеботуобинском нефтегазоконденсатном месторождении проведены близко от тектонических разломов. Эти флюидопроницаемые геоструктуры разломов могли стать проводниками для переноса тепловой энергии и радиоактивных флюидов из зоны взрыва в геологическую среду и предопределить развитие геотехногенной системы «полость взрыва – вмещающая геологическая среда – поверхность земли».

7. Вертикальноориентированные контактные зоны кимберлитовых трубок, как и практически горизонтальные контактные зоны трапповых тел являются природными флюидопроницаемыми геоструктурами, и они могут стать проводниками для переноса тепловой энергии и радионуклидов и сопутствующих элементов из зон взрывов по геологической среде вплоть до их выхода на поверхность земли при создании соответствующих гидрогеологических и др. условий. Данный вывод более всего касается геотехногенной системы ПЯВ «Кристалл», где в 3.5 км находится карьер кимберлитовой трубки Удачная. Трещиноватые контактные зоны трубки Удачная могли внести свой вклад в развитие геотехногенной системы горнодобывающего карьера, так и его взаимодействия с геотехногенной системой ПЯВ «Кристалл».

8. Влияние на геотехногенные системы ПЯВ «Кристалл» и «Кратон-3» пластовых траппов и долеритовых даек мезозойского возраста, развитые в 15 и более км к юго-западу от них, маловероятно в силу удаленности. А на Среднеботуобинском нефтегазоконденсатном месторождении взаимодействие геотехногенных систем ПЯВ с трещиноватой контактовой зоной траппового тела, расположенного примерно в 300 м выше 6-ти полостей взрывов в средней части геологического разреза, весьма вероятно.

9. В районах исследования развита сплошная многолетняя мерзлота, где в верхней части геологической среды вода находится в виде льда. Многолетнемерзлые породы препятствуют проникновению просачиванию метеорных и поверхностных вод в подстилающие горные породы. С другой стороны, многолетняя мерзлота служит практически непроницаемым щитом, препятствующим выходу напорных подземных флюидов на поверхность, в том числе радиоактивных флюидов из полостей ПЯВ. Таким образом, в криолитозоне свободный газо- и водообмен между литосферой, гидросферой и атмосферой затруднен, и потому общепринятое представление о том, что «в условиях вечной мерзлоты вода в центральной зоне взрыва превращается в лед и надежно удерживает радионуклиды, включая тритий»

[Мирные..., 2001] кажется логичным и ожидаемым, но требует верификации. По мнению автора, необходимо изучить последствия отепляющего и разрушающего воздействия ПЯВ на мерзлые породы, тем более итак многолетней мерзлоте свойственна гетерогенность в силу ряда естественных факторов – литологического разнообразия, наличия тектонических разломов – проводников тепла и флюидов, так и естественных климатических, ландшафтных условий.

10. Из рассматриваемых единственный взрыв «Кристалл» проведен в мерзлых породах на глубине 98 м. Остальные 9 ПЯВ проведены ниже слоя многолетнемерзлых пород.

11. Все рассматриваемые в работе взрывы, за исключением 2-х взрывов «Нева-4» и «Кратон-4», проведены в непосредственной близости или в пределах подземных водоносных горизонтов.

12. Район объектов ПЯВ «Кристалл», «Кратон-3» относится к Оленекскому криоартезианскому бассейну [Алексеев, 2009]. Здесь характерна элизионная водонапорная система, состоящая из 5 водоносных горизонтов, насыщенных хлоридными натриевыми и кальциевыми рассолами. С глубиной минерализация рассолов увеличивается от 90 до 450 г/л, превышение пластового давления над нормальным гидростатическим – от 1–1.5 до 26 мПа [Микуленко и др., 2006, Алексеев, 2009]. Напор подземных вод по латерали увеличивается к юго-западу в сторону Тунгусской синеклизы.

13. Район Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения (СБНГКМ), где расположены 7 объектов ПЯВ, относится к Якутскому криоартезианскому бассейну. Блоковое распространение подземных водоносных комплектов, перекрытых сверху соляными пластами, привело к развитию элизионной водонапорной системы с широким диапазоном пластовых давлений от 4.5 до 32 мПа в верхней и средней частях осадочной толщи района. Вместе с тем на глубине 1800–2100 м (около подошвы платформенного чехла) элизионная водонапорная система сменяется на аномально – депрессионную с дефицитом пластового давления от 2.5 до 5 МПа. Предполагается, что уход подземных рассолов в разломы (трещины) пород фундамента привел к образованию аномально низких пластовых давлений в нижней части разреза [Яковлев, Семашев, 1982, Вожов, 1987, Карцев и др., 1989]. Полости взрыва проведены на участке геологического разреза с элизионной водонапорной системой, и поэтому при появлении гидравлической связи с флюидопроницаемыми геоструктурами может происходить переток радиоактивных флюидов из зон взрывов как вверх к поверхности земли, так и вниз, в горизонты с аномально низкими пластовыми давлениями. Данная ситуация осложняет сценарии развития геотехногенных систем «полость взрыва – геологическая среда - ...» в зависимости от конкретных геологических условий на месте проведения взрыва.

14. В верхней части геологическая разреза района ПЯВ «Кратон-4» развита инфильтрационная водонапорная система с блуждающими горизонтами пресных подземных вод с латеральным направлением движения к северо-востоку-востоку по склону погребенного Хапчагайского мегавала в сторону долины р. Лена. Эта простая гидрогеодинамическая система верхней части разреза к востоку от ПЯВ «Кратон-4» становится элизионной водонапорной при появлении аргиллитовых и алевролитовых водоупоров и под влиянием восходящих глубинных потоков минерализованных подземных вод, поступающих по зонам надвиговых нарушений со стороны Верхоянского складчато-надвигового пояса.

15. Сложные гетерогенные условия вмещающей геологической среды Сибирской платформы (наличие сплошной многолетней мерзлоты, горизонтов напорных высокоминерализованных подземных рассолов, древних и подновленных тектонических разломов, разбивающих геологическую среду на ряд блоков, пластовых трапповых тел и кимберлитовых трубок, контактные зоны которых отличаются высокой флюидопроницаемостью) обуславливают высокую актуальность изучения геотехногенных систем «полость ПЯВ – вмещающая геологическая среда --- поверхность земли». Поствзрывной техногенез: добыча алмазов и углеводородного сырья в районах ПЯВ еще больше актуализирует поставленную научную проблему геоэкологического изучения геотехногенным систем подземных ядерных взрывов.

### **Глава 3. Фоновые содержания радионуклидов и микроэлементов в компонентах природной среды районов исследования.**

#### **3.1. Естественные радионуклиды U, Th, K и микроэлементы.**

Почвенный покров, растительность, грунтовые и поверхностные воды, донные отложения взаимосвязаны друг с другом и с подстилающими породами через миграцию вещества. И эти компоненты составляют в совокупности геохимический ландшафт [Перельман, 1965] наземного, аквального и субаквального типов. В компонентах геохимического ландшафта фоновые уровни естественных радионуклидов и микроэлементов в первую очередь предопределяются составом подстилающих пород [Виноградов, 1957, Ковальский, 1974]. Климат, в первую очередь, влияет на глубину преобразования первичного вещества пород (на выветривание), в условиях резко-континентального климата и многолетней мерзлоты преобладает морозное выветривание [Конищев, Рогов, 2006, 2008], вместе с тем также существенно проявляется и химическое выветривание пород в пределах деятельного слоя за счет появления высокоминерализованной пленочной воды при сезонных промерзании – оттаивании [Конищев, Рогов 2006, Птицын, 1992]. А особенности рельефа, а именно расчлененность рельефа, предопределяют интенсивность латерального движения вещества в сопряженных ландшафтах «водораздел – склон- долина» [Нечаева и др., 2004].

Районы изучаемых ПЯВ, за исключением «Кратон-4», в основном сложены из морских отложений карбонатного состава.

##### **3.1.1. На южном склоне Анабарской антеклизы в районе ПЯВ «Кристалл» и «Кратон-3»**

поверхность подстилают глинистые известняки и доломиты. В связи с закрытостью территории пробы типичных подстилающих глинистых известняков и доломитов отобраны на искусственном обнажении, сформированном при строительстве дороги на правом борту р. Далдын, а также с отвала пустых пород.

По данным обобщения Рихванова Л.П. [2009] в карбонатных породах содержание тория составляет 3 г/т, и чуть меньше урана - около 2.5 г/т. Наши данные сопоставимы с этими обобщенными данными : содержанием микроэлементов составляет (от 0.п – 10-20 г/т) и естественных радионуклидов U – 1.1-1.8 г/т, Th – 1.5 -3.5 г/т (табл.11). Содержание K<sub>2</sub>O связано с глинистыми частицами и составляет около 2.3-3.11 мас. %.

Для понимания природы малого содержания микроэлементов, Th, U надо обратить внимание на условия осадкообразования в венде-кембрии. В венд-кембрийское время территория Сибирской платформы представляла собой эпиконтинентальное теплое море [Жарков, 1970; Фанерозой Сибири, 1984; Репина, Жаркова, 1985](см. рис.39). По остаткам трилобитовой фауны древнее море подразделяется на три палеогеографические зоны (рис.40) с повышенной соленостью (I) и нормальной соленостью (II), а также переходной зоной III

[Репина, Жаркова, 1985]. Территория южного склона Анабарской антеклизы, где расположены объекты ПЯВ «Кристалл», «Кратон-3», относится к переходной зоне Ш, вытянутой в виде широкой полосы с северо-запада на юго-восток.

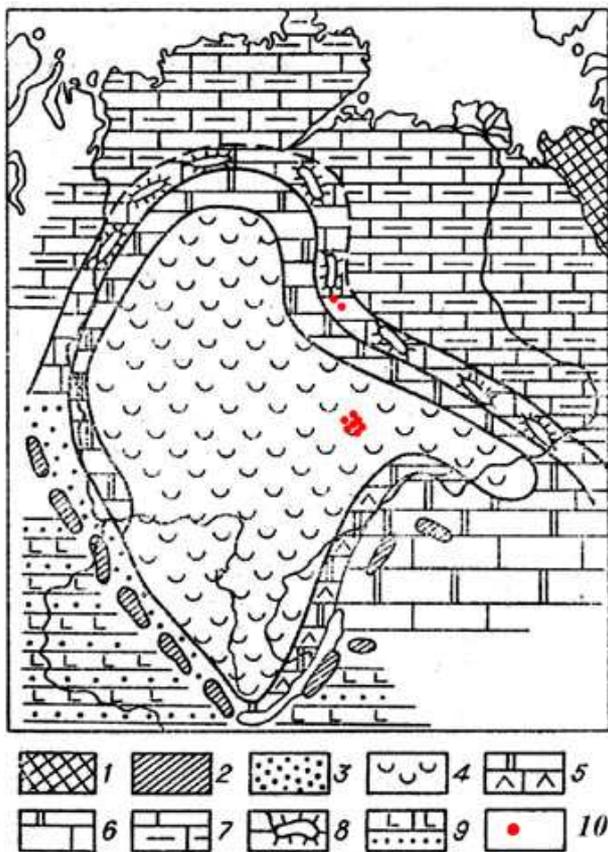


Рис. 39. Палеогеографическая схема Сибирской платформы для эпохи раннего кембрия (по М. Л. Жаркову, [1970]).

1 — суша; 2 — острова и горные сооружения геосинклинальной области; 3 — прибрежные участки морского солеродного бассейна (область развития терригенно-карбонатных пород); 4 — морской солеродный бассейн (область развития доломитов, ангидритов, каменной соли); 5—7 — участки эпиконтинентального моря: 5 — с повышенной соленостью (область развития доломитов и ангидритов), 6 — с соленостью от нормальной к повышенной (область развития доломитов и известняков), 7 — с нормальной соленостью воды (область развития известняков и сланцев); 8 — зона развития археоциато-водорослевых биогермов; 9 — геосинклинали (область развития карбонатно-эффузивных и эффузивно-терригенных отложений), 10 — места проведения ПЯВ.

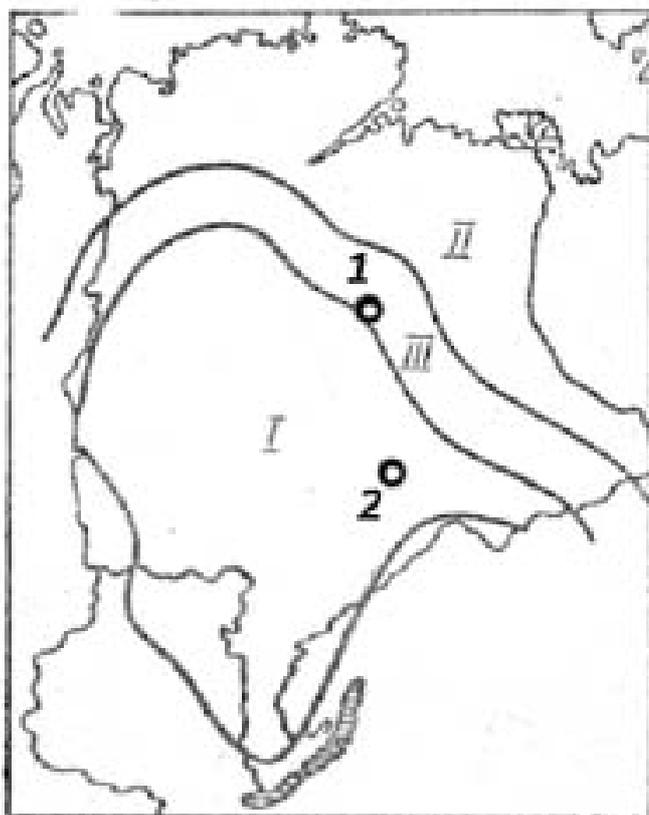


Рис.40. Палеогеографическое зонирование морских условий на территории Сибирской платформы в раннем кембрии по распространению ассоциаций трилобитов (по Л.Н Репиной, 1968) [Репина, Жаркова, 1985]. Кружками показы места проведения ПЯВ : 1-«Кратон-3» и «Кристалл», 2- группа ПЯВ на территории СБНГКМ (7 взрывов). I — море с повышенной соленостью; II — море с нормальной соленостью; III — переходная зона;

Эта зона являлась подводным барьером, разделявшим в венде и кембрии бассейны с разной соленостью и глубиной. В вендское время (635 млн лет) здесь формировались строматолитовые постройки – известковые или доломитовые стяжения остатков цианобактериальных матов на дне мелководного водоема (эдиакарий). В раннем кембрии (500-540 млн. лет) – это рифовые барьеры, где формировались археоциато-водорослевые биогермы. Однако в раннекембрийское время эта зона была приподнятой, о чем свидетельствует присутствие в породах этого времени оолитов, онколитов, косой слоистости, седиментационных брекчий, песчаных линз, прослоев мергелей, известняков с большим содержанием глины. То есть в это время в условиях переменных условий нормальной солености до высокосоленых вод в районе формировалась переслаивающаяся толща известняков и доломитов и их глинистых разностей (или толща пород терригенно-карбонатного состава) (рис. 18, 19).

В течение кембрия и раннего ордовика высота барьера и его положение изменялись. При его понижении в зону проникали воды с повышенной соленостью из I центральной зоны древнего моря, тогда происходило биохемогенное накопление известняково-доломитовых илов.

Вышеописанные палеогеографические условия объясняют выявленные низкие содержания нерастворимых остатков – в среднем 15-20 мас. %. Потери при прокаливании от 13-17 % до 45 %, что обусловлено высоким выходом углекислого газа  $\text{CO}_2$  из карбонатов. В макрокомпонентном составе карбонатных осадочных пород района большую долю занимают основания  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  – до 45 % (табл.10). Содержание  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в известняках и доломитах варьирует в широких пределах: от долей процентов до 38 и 6.5 % соответственно в зависимости от доли глинистой фракции в породе. Содержание железа в пересчете на  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  не превышает первых процентов 1.8 -2.6 %.

Удаленность от суши – питающих провинций и зон магматизма и оруденения, спокойные тектонические условия обусловили биохемогенное отложение морских карбонатных и глинистых частиц, обедненных тяжелыми металлами и редкими элементами (табл. 11). Из-за удаленности источников питания содержание терригенного материала в породах минимально. В этих карбонатных породах содержание микроэлементов и естественных радионуклидов контролируется в основном содержанием глинистых частиц.

Строматолитовые, эпифитоновые известняки и доломиты и органогенные биогермы венд-нижнекембрийского возраста с обильной трилобитовой фауной накапливались в условиях морского мелководья, в теплой обстановке. Известно, что строматолиты развиваются при достаточной прозрачности воды, что объясняет низкую долю терригенного

и глинистого материала в строматолитовых карбонатных отложениях. В отложениях биогерм, соответственно, очень низкие содержания тяжелых и редких элементов, которые по большей части связаны с глинистым и терригенным материалом. Типоморфными элементами морского осадконакопления являются Sr, Ba, и их содержание составляет: Sr – 134-355 г/т, Ba – 29-39 г/т. В глинистых известняках их содержания несколько повышаются Sr – до 430 г/т, Ba – до 140 г/т. По данным исследователей [Карбонаты, 1987] кальцит примерно на порядок лучше накапливает Sr, чем доломит из-за своих кристаллохимических особенностей. Возможно, с этим связано то, что в наших пробах доломитов содержание Sr несколько меньше, чем в известняках (табл.13). Содержание бария несколько выше в глинистых известняках, и барит мог быть связан с глинистой частью осадков.

Содержание Mn в морских отложениях, согласно данным Летниковой Е.Ф. [2005], связано с его осаждением в мелководных окислительных условиях. В глинистых известняках и доломитах южного склона Анабарской антеклизы содержание Mn составляло до 0.109 масс. %. Титан и цирконий связаны с устойчивыми минералами рутилом, цирконом, которые сносятся с питающих береговых областей, и по мере удаления от береговой зоны их содержание в карбонатных отложениях снижается, потому их содержания в среднем не превышают 300 г/т и 15 г/т соответственно.

Содержание тяжелых металлов и редких элементов в морских карбонатных отложениях южного склона Анабарской антеклизы, как правило, ниже, чем кларковые содержания (табл.13). Отношение Th/U в известняках и доломитах из-за низких содержаний тория низкое – всего на уровне 1.4, оно повышается до 2.9-3.0 при увеличении глинистости пород. Глинистая составляющая является основным фактором, контролирующим содержание микроэлементов, Th и U в породах.

В магматических породах района – в кимберлитах содержание микроэлементов выше чем в известняках и доломитах [Ягнышев и др., 2005, Василенко и др., 2006, Лапин и др., , 2013]. Кимберлиты по сравнению с кларком земной коры [Treatise..., 2003] обогащены Cr, Co, особенно сильно Ni – примерно 1060 г/т, при этом обеднены группой элементов Zn, Ga, Rb, Y, Zr, Pb, типоморфных для кислых пород. Содержание урана соответствует кларковому содержанию, а содержание тория – ниже кларков. В кимберлитах отмечается повышенное содержание Sr, Ba в кимберлитах. Содержание легких лантаноидов почти в 2 раза выше кларковых содержаний, но зато меньше тяжелых лантаноидов. Таким образом, из кимберлитов могут вымываться и мигрировать с водой Cr, Co, Ni, Sr, Ba, которые могут обогатить этими элементами сопряженные геохимические ландшафты.

**Таблица 10. Макрокомпонентный состав горных пород района ПЯВ на южном склоне Анабарской антеклизы Сибирской платформы (масс.%, отн. погрешность ≤15 %)**

Место (количество проб)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	MgO	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Нераств. осадок
Глинистые известняки средний и верхний кембрий												
1а	17	5,3	0,09	0,8	0,07	2,4	0,054	11	27	0,087	0,25	23
2а	21	5,3	0,10	0,9	0,23	3,1	0,082	6,2	30	0,109	5,1	28
3а	20	4,9	0,12	0,1	0,12	2,3	0,102	7,9	31	0,08	0,31	24
глинистые доломиты, средний и верхний кембрий												
4а	34	5,97	0,11	0,2	0,17	3,0	0,094	13	19	0,085	0,42	40
5а	23	5,39	0,12	2,4	0,18	2,4	0,109	17	22	0,080	1,8	31
6а	21	7,68	0,13	2,6	0,29	2,8	0,106	13	20	0,104	9,1	31
Магматические породы, кимберлиты												ППП %
Гр.«Удачная» (37) [Ягнышев и др., 2005]	17	3,9	3,3	15	0,05	0,051	0,071	24	14	0,39	3,5	19
Гр. «Удачная» западная (890)[Василенко и др. , 2006]	26	2,3	0,86	6,29	0,17	0,63	-	25	15	0,33	-	22
Гр. «Удачная» восточная (673) [Василенко и др. , 2006]	26	2,1	1,18	7,14	0,14	0,58	-	28,1	13	0,34	-	21
Якутская провинции (7537) [Василенко и др., 2006]	27	2,7	1,34	6,73	0,13	0,58	0,000	25,4	14	0,50	0	22
долериты (дайки)												
[Ягнышев и др., 2005]	50	15	1,25	11	2,6	0,84	0,157	6,4	9,7	0,13	3,87	17

Примечание: \* - количество проб

**Таблица 11. Микроэлементный состав осадочных пород района ПЯВ на южном склоне Анабарской антеклизы Сибирской платформы (г/т, отн. погрешность ≤10 %)**

№ пробы (Горная порода)	Be	V	Cr	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo
12 (известняк)	<1	6,9	15	5670	3,2	3,8	3,3	21	0,7	<0,5	<0,4	<0,3	15	320	1,8	5	1,7	0,1
221a (известняк)	1,2	10	25	6300	2,5	2,8	6,2	20	<0,5	<0,5	<0,4	<0,3	7,4	350	1,6	8	2,4	0,2
34 (доломит)	<1	9	18	840	1	12	3,2	20	1,2	0,7	<0,4	<0,3	8,9	230	2,4	7	1,7	0,1
39 (доломит)	<1	12	31	1190	1,8	10	4,3	18	<0,5	<0,5	<0,4	<0,3	3	130	1,6	3	1,7	0,2
212 (глинистые известняки)	1	15	35	1700	8,6	15	6,5	25	2,1	0,7	<0,4	<0,3	10	430	2,1	11	1,6	0,1
218 (глинистые известняки)	<1	18	96	1800	7,1	18	4,2	20	1,7	0,5	<0,4	<0,3	10	430	1,9	15	2,2	0,3

№ пробы (Горная порода)	Sn	Sb	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf
12 (известняк)	0,6	<0,2	35	5,9	13	0,9	4,9	0,8	0,38	0,9	0,2	1,0	нпо	нпо	нпо	0,3	0,03	
221a (известняк)	0,8	0,21	39	Но	Но	но	но	Но	но	но	Но	Но	но	но	но	но		
34 (доломит)	0,5	<0,2	29	7,5	14	1,8	5,1	1,2	0,33	1,1	0,3	1,4	0,30	0,6	0,10	0,5	0,07	
39 (доломит)	0,5	<0,2	38	6,9	12	1,1	4,8	0,8	0,29	1,1	0,2	1,1	нпо	нпо	нпо	0,47	0,06	
212 (глинистые известняки)	0,7	<0,2	120	10	19	2,3	8	1,8	0,45	1,9	0,3	1,9	0,39	1,1	0,15	0,85	0,12	3,9
218 (глинистые известняки)	0,7	0,21	142	9,3	18	1,9	7,9	1,9	0,44	1,9	0,3	2,0	0,43	1,0	0,13	0,92	0,15	

№ пробы (Горная порода)	Pb	W	Bi	Th	U	Th/U
12 (известняк)	3	1,5	0,14	1,8	1,2	1,5
221a (известняк)	3,5	1,3	0,13	1,5	1,1	1,4
34 (доломит)	4,9	1,5	0,14	2,2	1,3	1,7
39 (доломит)	3	1,2	0,23	2,1	1,5	1,4
212 (глинистые известняки)	4	1,5	0,18	2,5	1,8	1,4
218 (глинистые известняки)	3,5	1,5	0,14	3,5	1,2	2,9

Примечание: но – не определялось, нпо – ниже предела обнаружения

На водоразделах развиты маломощные грубые по составу остаточно-карбонатные и дерново-карбонатные почвы на элювии- делювии доломитов и известняков. Лесная подстилка мощностью до 10 см. Гумусовый горизонт очень маломощный. Общая мощность почв не превышает 15-20 см, глубже залегают элювиально-делювиальные крупнообломочные отложения. На склонах развиты дерново-карбонатные почвы, в нижних склонах чаще встречаются перегнойно-карбонатные типы почв с мощностью до 28 см. По берегам водотоков на рыхлых аллювиальных отложениях развиты аллювиальные светлогумусовые почвы.

Фоновые почвы отобраны на верховье р. Чукука, также отобраны почвы в левобережье руч. Улахан –Бысыттах (рис.41). На этих выбранных участках также отбирались поверхностные воды и донные осадки из местных мелких ручьев без названия.

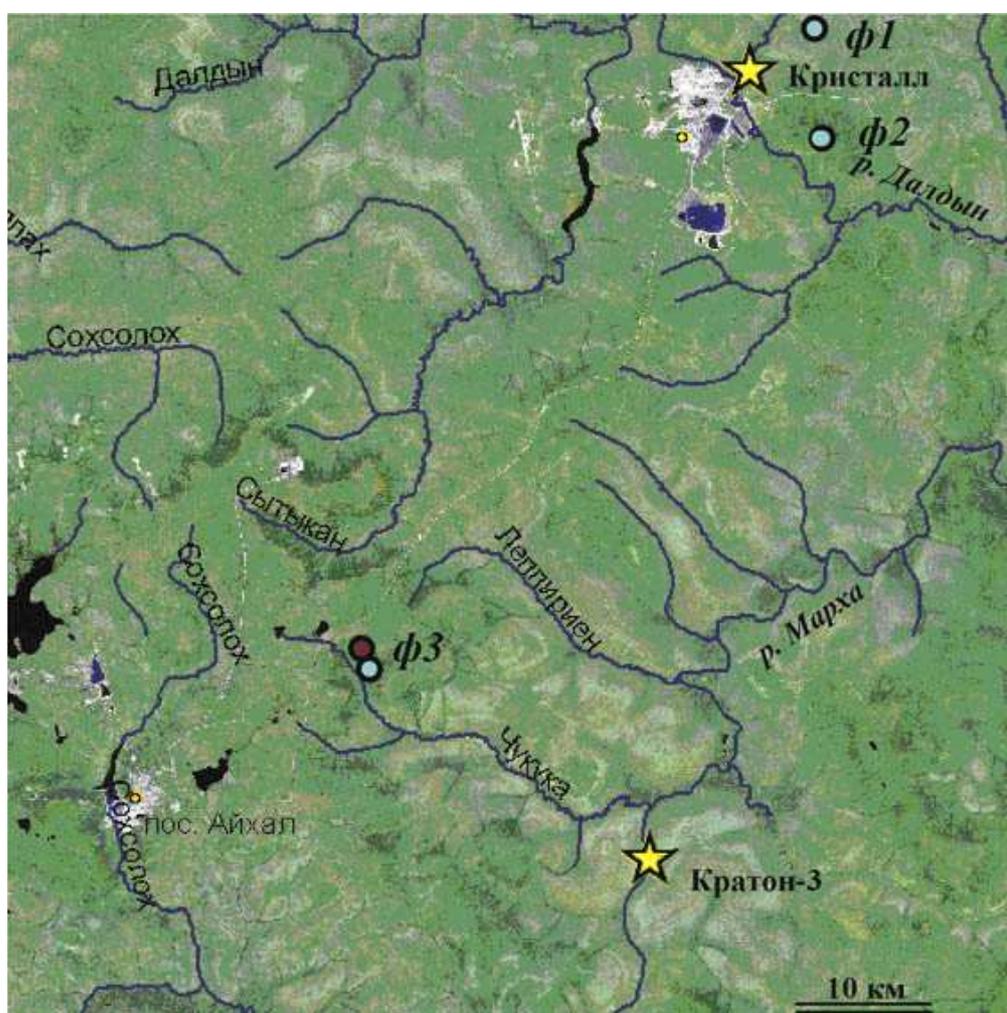


Рис.41. Схема расположения фоновых участков (ф1, ф2, ф3) в районе ПЯВ «Кристалл» и «Кратон-3». Голубым кружком показаны участки для отбора проб поверхностных вод и донных осадков, коричневым кружком – отбор фоновых проб почв и растительности.

Содержание микроэлементов и естественных радионуклидов в почвах ниже или примерно равно кларку континентальной земной коры (табл.12).

**Таблица 12. Содержание микроэлементов и естественных радионуклидов в почвах фоновых участков в районах ПЯВ, г/т (отн. погрешность ≤10 %)**

проба	Глубина, см	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu
Кларковое содержание*		<b>3840</b>	<b>97</b>	<b>92</b>	<b>775</b>	<b>50400</b>	<b>47</b>	<b>28</b>
Южный склон Анабарской антеклизы. Участок <i>φ1</i> район ПЯВ «Кристалл», дерново-карбонатные почвы, аллювиальные почвы								
12_A1	0-5	1300	30	50	135	14000	19	12
12_BC	5--10	3740	90	200	570	41300	62	28
Южный склон Анабарской антеклизы участок <i>φ3</i> район ПЯВ «Кратон-3», дерново-карбонатные почвы, бассейн. Р. Чукука								
6_A1	0--5	2700	62	100	610	29000	32	23
6_BC	5--10	4000	78	170	560	40200	52	41
Север Непско-Ботуобинской погребенной антеклизы, Район СБНГКМ, мерзлотные типичные и оподзоленные таежные почвы, на песчано-суглинистых отложениях, дерново-карбонатные и торфяно-болотные почвы в мелких долинах								
A1-10	0--10	6370	160	170	1550	55400	73	43
A1_43	0--10	5260	110	200	1120	35400	37	41
A1_44	0--10	5610	150	200	1020	40400	47	43
A1_66	0--10	5080	90	170	750	31500	47	38
Центрально-Якутская равнина, Район ПЯВ «Кратон-4» светло-гумусовые мерзлотные типичные таежные почвы на песчаных отложениях, в низинах – мерзлотные торфяно-болотные почвы								
116_A1	0--5	900	40	37	130	9000	9,7	18
116_Вс	5--10	750	20	-	-	3800	12	12
117_BC	5--10	620	20	15	120	8100	7	7,3
Продолжение 1 таблицы 12.								
	Глубина, см	Zn	Ga	Ge	Br	Rb	Sr	Y
Кларковое содержание*		<b>67</b>	<b>17.5</b>	<b>1.4</b>	<b>1.6</b>	<b>84</b>	<b>320</b>	<b>21</b>
Южный склон Анабарской антеклизы. район ПЯВ «Кристалл», дерново-карбонатные почвы								
12_A1	0-5	36	6	0	9	33	28	8
12_BC	5--10	79	14	2,0	4,9	89	50	21
Южный склон Анабарской антеклизы район ПЯВ «Кратон-3», дерново-карбонатные почвы								
6_A1	0--5	81	10	1	7	55	51	15
6_BC	5--10	105	15	2,4	12	79	72	23
Север Непско-Ботуобинской погребенной антеклизы, Район СБНГКМ, мерзлотные типичные и оподзоленные таежные почвы, на песчано-суглинистых отложениях, дерново-карбонатные и торфяно-болотные почвы в мелких долинах								
A1-10	0--10	68	14	2,2	-	95	260	26
A1_43	0--10	85	14	5,6	3,3	74	150	14
A1_44	0--10	104	14	2,0	1,2	93	230	26
A1_66	0--10	80	13	4,3	2,6	81	185	19
Предверхоанский краевой прогиб Район ПЯВ «Кратон-4», светло-гумусовые мерзлотные типичные таежные почвы на песчаных отложениях, в низинах – мерзлотные торфяно-болотные почвы								
116_A1	0--5	13	7,9	1,9	0,4	64	173	5,8
116_Вс	5--10	11	8,4	2,1	0,4	66	165	5,5
117_BC	5--10	5,2	3,8	1,5	4,8	26	72	3,1

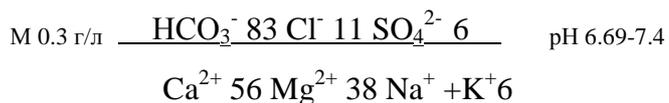
Продолжение таблицы 12								
	глубина	Zr	Nb	Mo	Ag	Cd	Sn	Sb
Кларковое содержание		<b>193</b>	<b>12</b>	<b>1.1</b>	<b>53*10<sup>-6</sup></b>	<b>0.09*10<sup>-3</sup></b>	<b>2.1</b>	<b>0.4</b>
Южный склон Анабарской антеклизы. район ПЯВ «Кристалл», остачно-карбонатные, дерново-карбонатные почвы								
12_A1	0-5	52	5	1	-	0,21	0,83	
12_BC	5--10	127	12	1,5	-	0,31	1,9	0,34
Южный склон Анабарской антеклизы район ПЯВ «Кратон-3», остаточо-карбонатные, дерново-карбонатные почвы								
6_A1	0--5	100	8	2	0	0	1,54	0
6_BC	5--10	143	12	2,5	0,19	0,25	1,71	0,41
Север Непско-Ботуобинской погребенной антеклизы, Район СБНГКМ, мерзлотные типичные оподзоленные таежные почвы, на песчано-суглинистых отложениях, дерново-карбонатные и торфяно-болотные почвы в мелких долинах								
ТЮ-2	0-10	178	8,2	2,0	0,69	0,72	2,16	0,83
ТЮ-3	скв 43	123	10	2,0	0,53	0,52	1,75	0,61
ТЮ-5	п44	233	11	2,1	0,99	0,94	2,25	0,91
ТЮ-6	скв 66	160	9,6	1,9	0,55	0,84	1,94	0,63
Предверхоанский краевой прогиб, район ПЯВ «Кратон-4», светло-гумусовые типичные таежные почвы на песчаных отложениях ,								
116_A1	0--5	54	1,95	1,18	0,41	0,35	0,85	3,8
116_Bc	5--10	93	1,07	1,15	0,18	0,4	-	4
117_BC	5--10	30	0,46	1,83	0,32	0,24	-	3,8

Продолжение таблицы 12.						
	Глубина, см	As	Pb	Th	U	Th/U
Кларковое содержание		<b>4.8</b>	<b>17</b>	<b>10.5</b>	<b>2.7</b>	<b>3.9</b>
Южный склон Анабарской антеклизы. Район ПЯВ «Кристалл», остаточо карбонатные, дерново-карбонатные почвы						
12_A1	0-5	1	5	2	1,0	2,2
12_BC	5--10	3,2	10	6,4	2,2	2,9
Южный склон Анабарской антеклизы Район ПЯВ «Кратон-3», остаточо карбонатные, дерново-карбонатные почвы						
6_A1	0—5	6	13	4	1,8	2,2
6_BC	5--10	9,6	13	6,9	2,0	3,5
Север Непско-Ботуобинской погребенной антеклизы, район СБНГКМ, мерзлотные средне-таежные почвы на песчано-суглинистых отложениях						
ТЮ-2	0-10	5,3	21	5,3	1,2	4,42
ТЮ-3	скв 43	1,4	24	3,8	1,1	3,45
ТЮ-5	44	-	37	6,6	2,1	3,14
ТЮ-6	скв 66	1,2	25	5,4	0,9	6,00
Предверхоанский краевой прогиб, район ПЯВ «Кратон-4», светло-гумусовые мерзлотные таежные почвы на песчаных отложениях , в низинах – мерзлотные торфяно-болотные почвы						
116_A1	0—5	-	12,2	2,2	0,42	5,2
116_Bc	5--10	-	9,7	1,9	1,3	1,5
117_BC	5--10	2,2	8,8	2,2	0,42	5,2

\* - кларковое содержание элемента континентальной земной коры [Treatise..., 2003]

Отмечается относительно низкое содержание Th в известняках и карбонатах, вследствие чего Th/U отношение низкое и равно ~2.2, тогда как отношение кларков континентальной земной коры равно 3.9. В почвах фоновых участков содержание Be, Co не выявлены, содержание Y на уровне кларка земной коры – до 21 г/т.

В бассейне р. Марха и ее левого притока р. Далдын на подстилающих доломитах и известняках района характерны пресные гидрокарбонатные магниевые-кальциевые поверхностные воды с минерализацией ~ 300 мг/л (табл.3) [Артамонова, 2012, 2013]:



При одинаковом ионном составе наблюдается последовательное снижение минерализации от малого водотока к большему, мг/л: во временных водотоках – до 430, ручьях – 330–390, р. Марха – 290–170, – что можно объяснить эффектом разбавления по мере увеличения расхода водотоков в этой цепи. Содержание микроэлементов в поверхностных водах, как правило, не выше нижних пределов обнаружения. Только в реке р. Марха и р. Далдын – главном левом притоке р.Марха отмечаются значимые концентрации микроэлементов: меди до 5 мкг/л, цинка – до 28 мкг/л. Реки Марха и Далдын являются основными крупными водными артериями района, где на поверхность выходят кимберлитовые трубки, дайки долеритов, трапповые тела, которые больше, чем вмещающие карбонатные породы, обогащены микроэлементами, тяжелыми металлами. В бассейне р. Далдын расположен г. Удачный, также горно-обогатительный комбинат, которые также, по-видимому, оказывают техногенную нагрузку на эти водотоки, в том числе поступление некоторых тяжелых металлов в водоток.

В поверхностных водах фоновых участков района ПЯВ «Кристалл» и «Кратон-3» содержание естественных радионуклидов весьма низкое – содержание тория ниже предела обнаружения, а концентрация U достигает 0.6 мкг/л. При этом отношение  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  соответствует природному – около 138. В пробах воды лантаноиды, Be, Y и Co не обнаружены (ниже предела обнаружения).

**Таблица 13.** Общий химический состав поверхностных вод фоновых участков районов ПЯВ (отн. погрешность ≤10 %)

	<b>pH</b>	<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>	<b>Ca<sup>2+</sup></b>	<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>
		Мг/л	Мг/л	Мг/л	Мг/л	Мг/л	Мг/л
<b>Бассейн р. Марха</b>							
Ручей на склоне .р. Марха	8,1	<0,125	0,25	23	11	7,5	<6
Ручей без названия	8,3	0,43	0,2	53	24	7,6	<6
р.Далдын	7,80	5	3,5	53	30	18	0,26
р. Марха	7,25	5	1,6	48	28	25	7,78
<b>Бассейн р. Улахан-Ботуобуйа</b>							
р. Улахан-Ботуобуйа	7,4	1,4	<0,05	25	9,9	7,5	<6
Ручей верховье Тэлгэспит	6,2	1,9	0,4	12	2,7	51	<6
верховье р. Тас-Юрях	7,1	3,1	0,1	14	3,8	37	<6
<b>Лено-Виллюйское междуречье</b>							
ручей оз.Арылах	6,15	3,6	0,0009	6,6	2,1	0,9	0,55
озеро Арылах	6,5	3,5	0,001	6,7	2,2	1,1	0,58

	<b>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup></b>	<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>CL<sup>-</sup></b>	<b>Fe</b>	<b>Ni</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>
	Мг/л	Мг/л	Мг/л	Мг/л	мкг/л	мкг/л	мкг/л
<b>Бассейн р. Марха</b>							
ручей на склоне .р. Марха	но*	216	7,9	<0,1	<0,5	<0,3	<0,1
ручей без названия	но	298	7,7	<0,1	<0,5	<0,3	<0,1
р.Далдын	19,7	220	55	0,1	<0,5	4	28
р. Марха	но	229	31	0,1	<0,5	5,0	9,0
<b>Бассейн р. Улахан-Ботуобуйа</b>							
р. Улахан-Ботуобуйа	но	85	7,5	0,75	<0,5	<0,3	2
ручей верховье Тэлгэспит	но	62	14	0,8	<0,5	<0,3	6
верховье р. Тас-Юрях	но	47	7,8	0,75	<0,5	<0,3	1
<b>Лено-Виллюйское междуречье</b>							
ручей оз.Арылах	но	65	8,2	0,05	1,3	0,7	1,6
озеро Арылах	но	79	7,1	0,06	1,6	0,8	1,1

	<b>Pb</b>	<b>Th</b>	<b>U</b>	$\frac{^{238}\text{U}}{^{235}\text{U}}$
	мкг/л	мкг/л	мкг/л	
<b>Бассейн р. Марха</b>				
ручей на склоне .р. Марха	<0,1	<0,01	<0,01	-
ручей без названия	<0,1	<0,01	<0,01	-
р.Далдын	1,2	<0,01	0,3	139
р. Марха	1,6	<0,01	0,6	138
<b>Бассейн р. Улахан-Ботуобуйа</b>				
р. Улахан-Ботуобуйа	<0,1	<0,01	0,09	138
ручей верховье Тэлгэспит	<0,1	<0,01	0,08	-
верховье р. Тас-Юрях	<0,1	<0,01	0,03	139
<b>Лено-Виллюйское междуречье</b>				
ручей оз.Арылах	0,41	<0,01	0,011	139
озеро Арылах	0,27	<0,01	<0,01	138

\*но – не обнаружено

Повсеместно в толще карбонатных венд-кембрийских пород Сибирской платформы распространены подземные хлоридные кальциевые, хлоридные натриевые рассолы с минерализацией до 600 г/л, с разной степенью метаморфизации.

Рассолы имеют морское происхождение как и карбонатные породы венда-кембрия Сибирской платформы. В ходе геологического времени рассолы подверглись преобразованию состава, или метаморфизации, состав из натрий хлоридного превратился преимущественно в натрий - кальциевые и кальциевые хлоридные высокоминерализованные (до 550 г/л) рассолы [Шварцев, 1973]:



При этом в бескислородных условиях отлагались доломиты, образовывались газы  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ .

Изучение сопутствующих микроэлементов в рассолах были начаты Шварцевым Л.Н. [1973]. Подземные рассолы Сибирской платформы необходимо рассматривать как жидкие руды Li, Sr, Rb, Br, Ba [Шварцев, 1973, 1998, 2010, Алексеев, 2009, Алексеев и др., 2012]. Дополнительно рассолы обогащены K, J, B, Mn [Анциферов, 1989, 2004]. В последнее время аналитическими исследованиями с использованием современных методов впервые в рассолах выявлены устойчивые содержания следующих элементов: Y – 5 мг/л, Zr - 50 мг/л [Вахромеев и др., 2001, 2008, Рябцев и др., 2003]; также определены (мг/л): Nb - 1.2 мг/л; Mo - 3; Th - 10; Ti - 100; V - 1.5; Cr - 2; Co - 1 мг/л; Cu - 3; Ni - 1; Mn - 100; Ba - до 250.

Воды сильно минерализованы и метаморфизованы, что указывает на их формирование в зоне затрудненного водообмена. В отличие от обычных вод нефтяных и газовых месторождений, вода содержит повышенное содержание магния и калия.

Таблица 14. Содержание полезных компонентов в рассолах Сибирской платформы [Вахромеев, 2008]

Полезные Компоненты	Промышленное содержание, мг/л*	Содержание в рассолах района, мг/л**
Калий	350-1000	8000-1500
Магний	1000-5000	1000-22000
Стронций	300-500	700-1300
Бром	150-250	3500-5000
Бор	200-500	150-1100
Йод	10-18	7-18
Литий	10-20	100-250
Рубидий	3-5	5-11
Цезий	1,0	0-0,3

Примечание: \* - По данным Бондаренко, 1967; Посохова, Толстихина, 1977; Крайнова, Швеца, 1980 г.\*\* - По данным Рябухи и др., 1982 .

В местах разлива подземные рассолы могут повлиять на геохимическую специфику ландшафтов, поскольку происходит загрязнение геохимических ландшафтов хлоридами кальция, натрия и сопутствующими микроэлементами: Sr, Br, B, I, Li Rb, Cs.

### **3.1.2. Район группы ПЯВ на Среднеботубинском нефтегазоконденсатной месторождении на северной части Непско-Ботубинской антеклизы,**

Район слагают осадочные галогенно-карбонатные породы. Осадконакопление шло в венде-кембрие в условиях внутреннего моря с повышенной соленостью, где в основном отлагались доломиты и ангидриты с прослоями каменной соли в пределах зона 1 (см. рис.39, 40). Подстилающими породами являются раннеюрские песчаные терригенные породы и прерывистый покров рыхлых четвертичных отложений, перекрывающие сверху кембрийские карбонатные породы (табл.15).

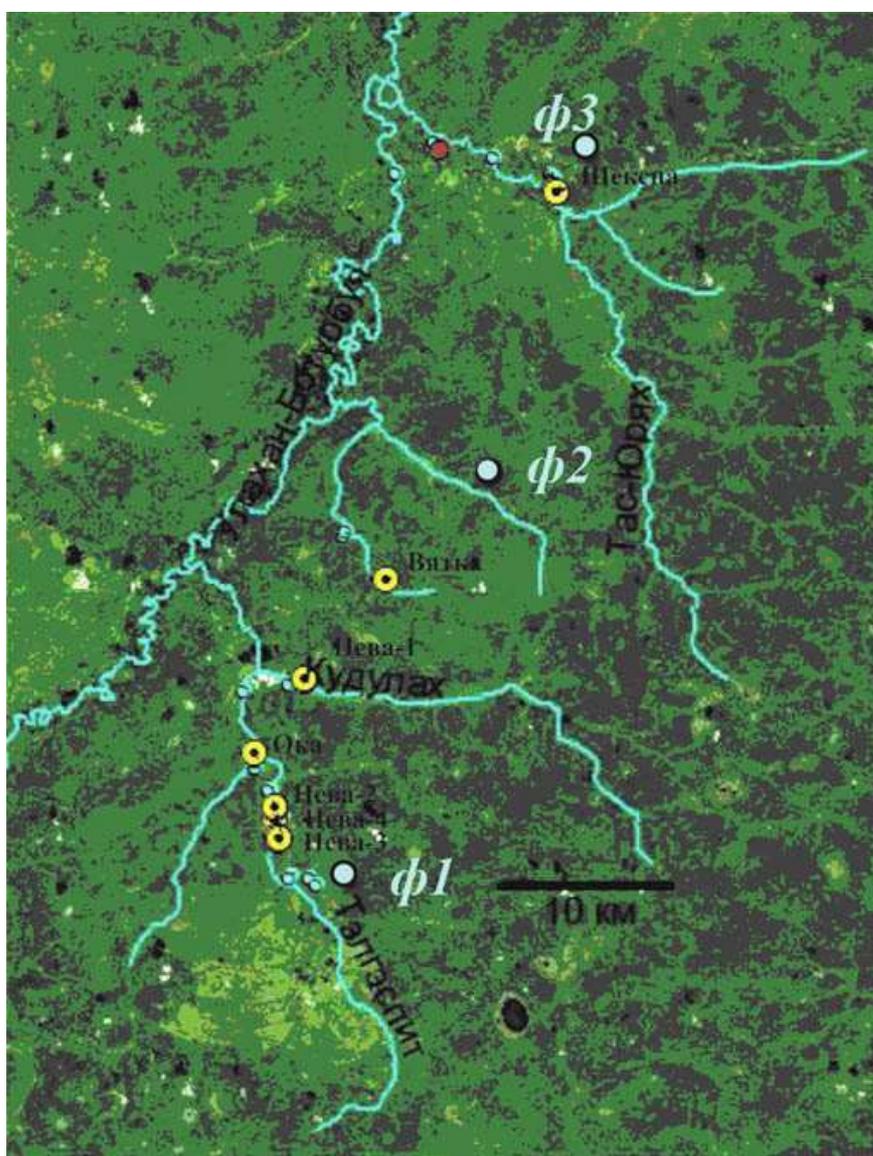


Рис.42. Схема расположения фоновых участков в СБНГКМ. Фоновый участки *ф1*, *ф2*, *ф3* показаны голубыми кружками, желтые кружки – устья боевых скважин ПЯВ.

Фоновые участки выбраны на верховье р.Тэлгэспит (рис. 42) на отдалении и выше по течению от объектов ПЯВ, где отбирались пробы воды, донных отложений, почв и растительности. В связи с непроходимостью болотистых таежных участков, фоновые участки выбраны рядом с таежной дорогой (для болотоходов) добывающей компании, по маршруту переездов с одной точки обследования до другою в ходей экспедиционных работ. Выявлено, что в подстилающих песчаниках и суглинках (состав макрокомпонентов приведен в табл.16) небольшие содержания тяжелых металлов и редких элементов (табл.17). Выявлено очень низкое содержание Y – на уровне кларка земной коры 21 г/т, Co – на уровне нижнего предела обнаружения 0.1 г/т или это элемент не выявлялся, Be – не выявлен в пробах отсутствие Be. Известно [Рехарский, 1972], что разные по составу породы являются источниками определенных групп элементов (см. табл. 15). Определенный вклад в геохимические ландшафты могут внести развитые в районе трапповые тела, представленные долеритами: V, Cu, Sc, Sb, Ag, Zn, Nb, Y.

**Таблица 15. Типичные элементы пород по В.И. Рехарскому [1972]**

Тип пород	Элементы
Ультраосновные	Ni, Cr, Co, Mg, Fe, Mn, Pd, Pt
Основные	V, Cu, Sc, Sb, Ag, Zn, Nb, Y
Средние	Ti, Br, P, Sr, As, Cd
Кислые	Sn, Pb, Zn, Be, Ba, Mo, U, W, F, Cl, Li, Rb, Th, Ta

На терригенных породах сформированы среднетаежные тяжелые суглинистые и легкие супесчаные мерзлотные таежные почвы мощностью до 20-30 см, в болотистых долинах характерны мерзлотные торфяно-болотные почвы мощностью до 50 см и больше с большим содержанием торфо-гуминового вещества. Содержание в почвах микроэлементов (табл.12) на уровне кларков или чуть выше. Be, Co в почвах и в подстилающих терригенных породах не обнаружены. Содержание Y в почвах и подстилающих терригенных породах на уровне кларка земной коры - 21 г/т. Необходимо отметить заметно повышенное содержание в почвах этого района Ti, V, Mn, Cr, Pb – выше кларков земной коры. Элементы Ti, V, Mn, Cr, Pb указывают на пестрый состав пород источников сноса терригенного материала. Район расположен в краевой зоне Сибирской платформы, и в мезозое питающие провинции располагались близко.

**Таблица 16. Макрокомпонентный состав подстилающих горных пород районов ПЯВ в пределах Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения Сибирской платформы (масс,% отн. погрешность ≤15 %)**

Свита, основные типы горных пород (пробы)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	MgO	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Нераств. осадок
Пески, нижняя юра												
Песчаники (4)	64	12	0,33	2,6	0,29	2,8	0,106	0,68	2,9	0,04	0,05	-
Кембрийские отложения												
доломитистые аргиллиты 91-1	25	7,7	0,3	2,6	0,29	2,8	0,113	13	19	0,104	2,1	35*
мергели 92а	18	6,6	0,31	2,4	0,23	3,1	0,082	14	19,5	0,109	5,1	27
каменная соль [Ягнышев 2005](3)	4,9	2,4	0,009	0,095	35	0,084	0,001	0,31	1,36	0,001	3,1	-
Магматические породы												
траппы [Ягнышев и др., 2005]	49	14	1,45	14	2,3	0,62	0,170	7,0	11	0,190	0,075	-
Долериты [Ягнышев, 2005]	47	15	1,28	13	2,0	0,33	0,19	6,7	11	0,11	0,021	-

*Примечание: \* - нерастворимый осадок определялся для карбонатных пород*

**Таблица 17.** Микроэлементный состав терригенных пород Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения (г/т, отн. погрешность ≤10 %)

№ пробы		V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga
		Кларк*	97	92	17,3	47	28	67
1-ф10	песчаник	77	120		15	20	42	10
21-ф10	песчаник	56	100		18	22	30	12
23-ф10	песчаник	62	110		15	20	35	9
13-в10	доломит	10	25	2,5	2,8	6,2	20	<0,5
17-в10	доломит	19	18	1	8	3,2	20	1,2

№ пробы		Ge	Br	Rb	Sr	Y	Zr	Nb
		кларк	1,4	1,6	84	320	21	193
1-ф10	песчаник	2,1	1,2	76	149	10,5	138	6,2
21-ф10	песчаник	3	1,2	84	165	13,4	142	4,2
23-ф10	песчаник	2,4	1,2	81	172	12,8	123	5,7
13-в10	доломит	<0,5		7,4	100	1,6	8	2,4
17-в10	доломит	0,7		8,9	94	2,4	7	1,7

№ пробы		Mo	Ag	Cd	Sn	Sb	Ba	La
		кларк	1,1	0,053	<b>0,09</b>	<b>2,1</b>	<b>0,4</b>	624
1-ф10	песчаник	1,8	0,3	0,24	1,2	0,42	170	8,4
21-ф10	песчаник	1,8	0,4	0,22	1,2	0,42	170	7,8
23-ф10	песчаник	1,8	0	0,3	1,2	0,42	170	7,5
13-в10	доломит	0,2	<0,3	<0,08	0,8	0,21	120	8,3
17-в10	доломит	0,1	<0,3	<0,08	0,5	<0,2	120	11,2

№ пробы		Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb
		кларк	63	7,1	27	4,7	1,00	4
1-ф10	песчаник	17	1,73	6,7	1,12	0,25	0,89	0,11
21-ф10	песчаник	16	1,50	6,1	0,99	0,20	0,92	0,16
23-ф10	песчаник	15	1,45	5,5	0,99	0,20	0,92	0,16
13-в10	доломит	12		5,9	1,33	0,35	1,30	0,22
17-в10	доломит	16		6,1	1,33	0,30	1,30	0,22

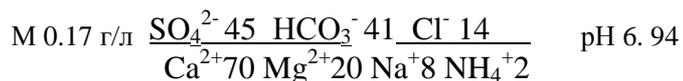
№ пробы		Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	W
		кларк	3,9	0,83	2,3	0,3	2	0,31
1-ф10	песчаник	0,74	0,15	0,42	0,070	0,47	0,070	
21-ф10	песчаник	0,90	0,16	0,45	0,065	0,47	0,067	
23-ф10	песчаник	0,90	0,16	0,45	0,065	0,47	0,067	
13-в10	доломит					0,435	0,058	1,3
17-в10	доломит					0,42	0,052	1,5

№ пробы		Pb	Bi	Th	U	Th/U
		кларк	<b>17</b>	<b>0,16</b>	10,5	2,7
1-ф10	песчаник	15		5,5	1,4	3,9
21-ф10	песчаник	15		5,5	1,4	3,9
23-ф10	песчаник	15		5,5	1,4	3,9
13-в10	доломит	3,5	0,13	1,5	1,1	1,4
17-в10	доломит	4,9	0,14	2,2	1,3	1,4

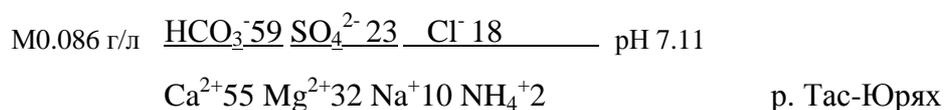
\* кларковое содержание элемента в верхней части континентальной земной коры [Treatise..., 2003]

Основными водотоками СБНГКМ являются р. Улахан-Ботуобуйа и ее притоки р. Тэлгэспит и р. Тас-Юрях.

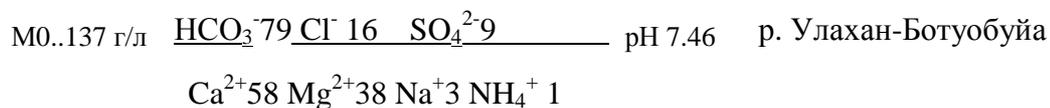
В районе 7-ми ПЯВ на территории СБНГКМ основными водотоками являются р. Улахан-Ботуобуйа и ее притоки р. Тэлгэспит и р. Тас-Юрях. Здесь на подстилающих юрских терригенных породах района в условиях заболоченных ландшафтов сформированы пресные гидрокарбонатно-сульфатные магниево-кальциевые поверхностные воды с минерализацией до 180 мг/л [Аргунова, Артамонова, 2014](табл.13):



Сероводород – один из главных газовых примесей подземных вод верхнего надсолевого и межсолевого разреза, его выход типичен для местных заболоченных ландшафтов, который, по-видимому, окисляется до сульфат-ионов в поверхностных условиях. Среднее содержание сульфатов в поверхностных водах СБНГКМ составляет – 24.8 мг/л, наиболее богаты сульфатами воды р. Тэлгэспит – в среднем 47.5 мг/л, болотистой р. Кудулах – в среднем 50.3 мг/л. Минерализация вод формируется в основном за счет гидрокарбонатов, сульфатов, катионов кальция и магния. В условиях быстрого течения и меньшей заболоченности на песчаных породах содержание сульфатов в р. Тас-Юрях уменьшается до 13 мг/л:



В р. Улахан-Ботуобуйа содержание сульфатов еще меньше – всего от 6.2 до 7.5 мг/л, по-видимому, это снижение концентраций является результатом разбавления. Тип речной воды становится гидрокарбонатным магний-кальциевым, среда слабощелочная:



В поверхностных водах фоновых участков района СБНГКМ содержание микроэлементов очень низкое, на уровне нижних пределов обнаружения, воды чистые, пресные -ультрапресные.

### 3.1.3. Район ПЯВ «Кратон-4»

Геохимические ландшафты в районе ПЯВ «Кратон-4» сформированы на кварц-полевошпатовых песчаниках. Фоновый участок выбран в 9 км к западу от объекта ПЯВ «Кратон-4» (см. рис.43).



**Рис.43.** Схема расположения фонового участка в районе ПЯВ «Кратон-4» (показан голубым кружком, ПЯВ «Кратон-4» - звездочкой).

На песчаных отложениях развиты почвы светло-гумусовые мерзлотные таежные, в низинах развиты мерзлотные торфяно-болотные почвы. Поскольку подстилающим кварц-полевошпатовым песчаникам характерны низкие содержания тяжелых металлов, естественных радионуклидов и микроэлементов (табл.19), то в местных почвах их также мало (табл.12).

**Таблица 18.** Макрокомпонентный состав подстилающих терригенных пород (нижняя юра) района ПЯВ «Кратон-4» в пределах зоне сочленения Вилуйской синеклизы и Предверхоянского краевого прогиба (масс.%, отн. погрешность  $\leq 15\%$ )

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
Песчаники (4)	76	5,7	0,10	1,1	1,0	2,4
Алевролиты (2)	73	6,2	0,10	1,2	1,1	2,6
	MnO	MgO	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	ППП
Песчаники (4)	0,01	0,12	0,39	0,01	0,07	16
Алевролиты (2)	0,01	0,09	0,31	0,01	0,06	17

*ППП – процент потери массы при прокаливании*

**Таблица 19. Микроэлементный состав песчаников и алевролитов в районе ПЯВ «Кратон-4» (г/т, отн. погрешность ≤ 10%)**

№		V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga
проба	кларк*	97	92	17,3	47	28	67	18
9-кр4	песчаники	35	30	2	10,5	15,8	10	8,2
13с_кр4	песчаники	42	37	2,2	12,2	18,2	12,9	7,9
14с_кр4	песчаники	22	-	1,6	9,2	11,5	10,9	8,4
11ф_кр4	алевролиты	31		2,3	12,3	11,6	13,2	8,2
12а_кр4	алевролиты	35		2,1	11,3	17,5	11,5	8,1

№		Ge	Se	Br	Rb	Sr	Y	Zr
проба	кларк	1,4		1,6	84	320	21	193
9-кр4	песчаники	2	0,3	0,4	63	175	5,9	81
13с_кр4	песчаники	1,9	-	0,39	64	173	5,4	54
14с_кр4	песчаники	2,1	0,49	0,44	66	165	5,6	93
11ф_кр4	алевролиты	2,1	0,42	0,42	65	171	5,6	127
12а_кр4	алевролиты	2,2	0,43	0,42	64	175	5,8	122

№		Nb	Mo	Ag	Cd	Sn	Sb	Ba
проба	кларк	12	1,1	0,053	0,09	2,1	0,4	624
9-кр4	песчаники	2,1	1	0	0,12	0	3,5	150
13с_кр4	песчаники	2,0	1,2	0,41	0,09	0,85	3,8	150
14с_кр4	песчаники	1,1	1,2	0,18	0,18	0	4	130
11ф_кр4	алевролиты	2,1	1,1	0,1	0,11		3	190
12а_кр4	алевролиты	2,5	1,1	0,1	0,12		3,2	200

Продолжение таблицы 19								
№		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd
проба	кларк	31	63	7,1	27	4,7	1	4
9-кр4	песчаники	8	16	1,65	6,5	1,1	0,22	0,9
13с_кр4	песчаники	8,4	17,0	1,73	6,7	1,12	0,25	0,89
14с_кр4	песчаники	7,8	15,9	1,50	6,1	0,99	0,20	0,92
11ф_кр4	алевролиты	8,2	17	1,6	6,4	1,1	0,22	0,9
12а_кр4	алевролиты	8,3	16,2	1,62	6,3	1,1	0,22	0,9

№		Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
проба	кларк	0,7	3,90	0,83	2,30	0,30	2,00	0,31
9-кр4	песчаники	0,14	0,82	0,15	0,43	0,07	0,47	0,07
13с_кр4	песчаники	0,11	0,74	0,15	0,42	0,070	0,47	0,070
14с_кр4	песчаники	0,16	0,90	0,16	0,45	0,065	0,47	0,067
11ф_кр4	алевролиты	0,12	0,81	0,15	0,42	0,065	0,47	0,07
12а_кр4	алевролиты	0,12	0,79	0,15	0,42	0,065	0,47	0,07

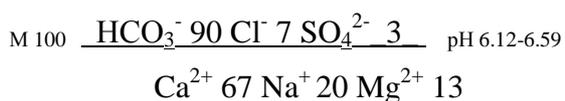
№		Hf	W	Pb	Th	U	T/U
проба	кларк	5,3	1,9	17	10,5	2,7	3,9
9-кр4	песчаники	2,2	0,36	7,5	1,5	0,42	3,6
13с_кр4	песчаники	1,9	0,53	9,1	1,6	0,42	3,8
14с_кр4	песчаники	2,7	0,34	6,8	1,4	0,42	3,4
11ф_кр4	алевролиты	1,9	0,42	8,2	1,9	0,42	4,5
12а_кр4	алевролиты	2,1	0,41	8,7	2,1	0,42	5,0

кларк\* - кларковое содержание элемента в верхней части континентальной земной коры [Treatise..., 2003]

В районе объекта МПЯВ «Кратон-4» на ровной слабохолмистой низменности с общим слабым уклоном в северо-западную сторону с высотами 80-100 абс.м подстилающими породами являются мезозойские пески с высокой пористостью, на которых произрастает сосновый лес, на низинах произрастает лиственничная тайга. На поверхности развиты тукуланы – небольшие песчаные пустыни, а также среднетаежные ландшафты с доминированием лиственниц по низинам, а по возвышенностям – сосен. В подстилающих песчаниках и алевролитах очень низкие содержания тяжелых металлов, редкоземельных элементов и естественных радионуклидов (табл.16). Отношение Th/U близко в кларковом отношении – от 3.4 до 5.0. Очень низкие содержания Th, U (по сравнению с кларками земной коры), что указывает на удаленность от питающих зон.

На этих песчаниках сформированы маломощные светло-гумусовые мерзлотные типичные таежные почвы, обедненные органическим материалом. По берегам многочисленных озер развиты мерзлотные торфяно – болотные почвы. Содержание естественных радионуклидов, редких микроэлементов в почвах намного меньше кларковых содержаний в земной коре – примерно в 5 раз меньше Th и U (табл.12). В почвах Th/U отношение равно от 1.5 до 5.2.

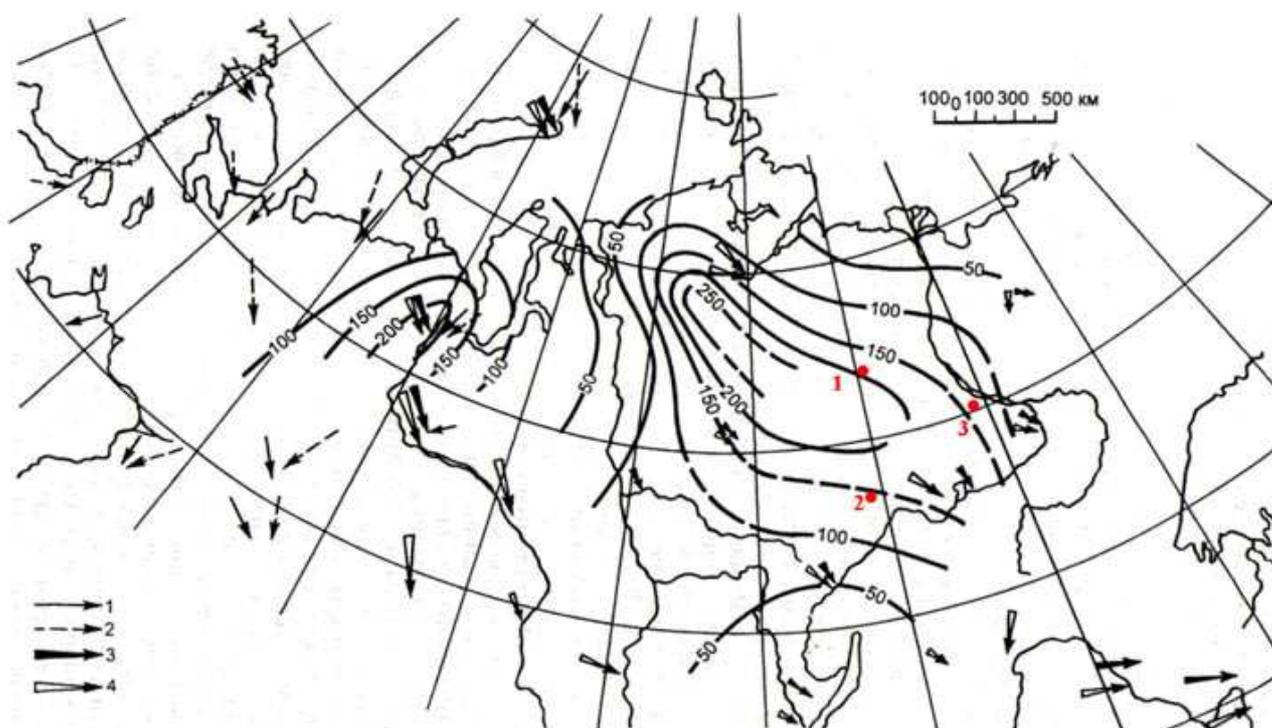
В районе распространено множество озер, соединенных сетью ручьев, крупные водотоки отсутствуют. Вода в них нейтральная рН ~ 6.36, пресная со средней минерализацией ~ 100 мг/л и относится хлоридно-гидрокарбонатному магниевому-натриево-кальциевому типу поверхностных вод (табл.13):



Воды близки к ультрапресным, концентрации микроэлементов на уровне нижних пределов обнаружения методом ICP-MS или чуть больше (табл.15). Таким образом, на терригенных породах Центрально-Якутской равнины отсутствуют какие-либо геохимические аномалии и геохимические ландшафты характеризуется весьма низкими содержаниями микроэлементов, концентрация естественных радионуклидов в поверхностных водах часто ниже пределов обнаружения (по сравнению с кларками земной коры, так и с почвами других рассматриваемых в данной работе участков).

### 3.2. Фоновые уровни содержания техногенных радионуклидов.

Фоновые уровни техногенных радионуклидов геохимических ландшафтов на фоновых участках районов исследования формировались в 1949-1962 гг. вследствие глобальных выпадений при наземных ядерных испытаниях. Западная Якутия, где расположены почти все рассматриваемые в работе объекты ПЯВ, находилась в следе выпадений с Новоземельского испытательного полигона (рис.44). Территория Якутии расположена по направлению доминирующих северо-западных ветров, особенно в зимний период. Влияние Семипалатинского испытательного полигона на Якутию было менее значительным из-за их удаленности друг от друга и доминирования направлений ветров в другую сторону (рис.45) [Радионуклидное загрязнение..., 2004].



**Рис. 44.** Карта выпадений  $^{95}\text{Zr}+^{95}\text{Nb}$ , построенная по данным измерений 1962 г. Стрелки – направления ветра на высотах 0-15 км: 1 – 23.10.1961, 2 – 24.10.1961, 3 – 30.10.61, 4 – 31.10.1961 г. [Радионуклидное загрязнение..., 2004], красными точками и цифрами: 1 – ПЯВ «Кристалл», «Кратон-3», 2 – группа ПЯВ на Среднеботуобинском месторождении, 3 – ПЯВ «Кратон-4».

Значительные выпадения радионуклидов глобального масштаба наблюдались после крупных аварий на ядерных объектах, как например, после Чернобыльской аварии в 1986 г [Израэль и др., 1990]. Вклад Чернобыльского следа в общем загрязнении составляет не более 6 % [Израэль и др., 1990]. В 2011 г. летом во мхах около района ПЯВ «Кратон-4» автором были выявлены заметные следы аварии на Фукусиме –  $^{134}\text{Cs}$  с периодом полураспада в 2.065 года. Многими исследователями замечено мозаичное распределение техногенных радионуклидов [Израэль и др., 1990, Яблоков, 2003, 2009, Рихванов, 2009].

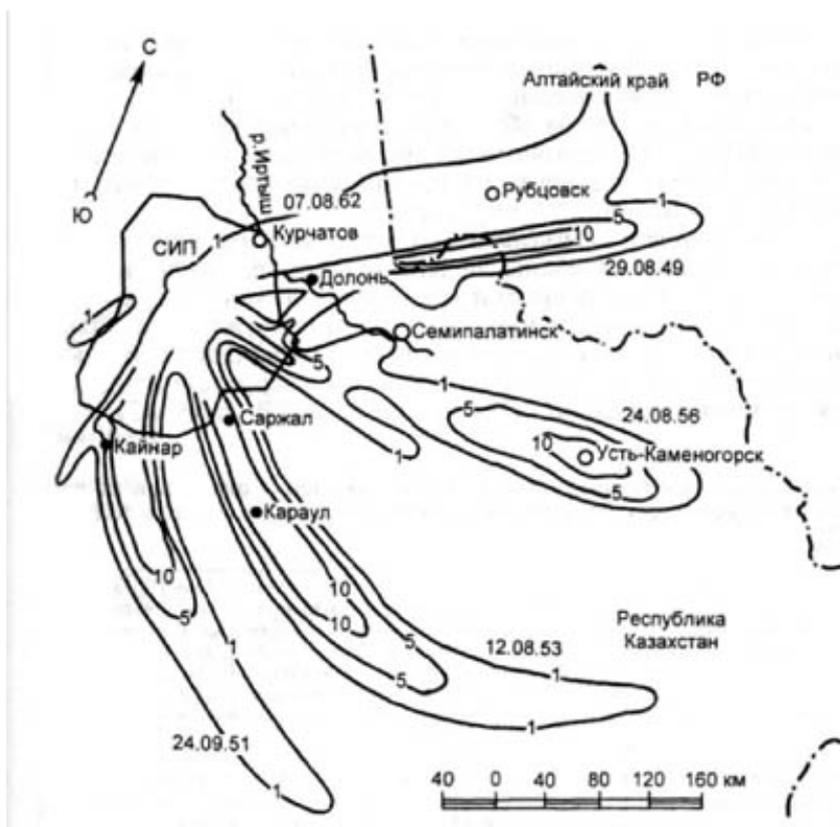


рис.45. Положение основных дозообразующих следов наземных ядерных взрывов, осуществленных на Семипалатинском испытательном полигоне, с указанием доз  $\gamma$ -излучения на местности до полного распада радиоактивного вещества (Рентген)[Радионуклидное загрязнение..., 2004]

Первые данные фоновых уровней техногенных радионуклидов в почвах Центральной Якутии получены группой исследователей ИГМ СО РАН [Сухоруков и др., 2001], а также большой объем работ проводил ИБК СО ОРАН [Собакин, 2010]. Показано, что уровень загрязнения радиоцезием коррелирует с количеством осадков на местности. В зоне с максимальным среднегодовым количеством атмосферных осадков присуще наибольшее содержание  $^{137}\text{Cs}$ . Так, на территории Якутии наиболее сильно загрязнены почвы на Алданском нагорье и Хребет Улахан-Чистай, а наименьше всего — в почвах тундровой зоны [Собакин, 2010]. Корреляционный анализ выявил статистически достоверную положительную корреляционную связь ( $r = 0.94$ ,  $P = 0.95$ ) между средним количеством осадков и средней плотностью загрязнения почв  $^{137}\text{Cs}$  [Собакин, 2010].

Современные фоновые содержания техногенных радионуклидов в почвах и других компонентах среды сформировались в годы наземных ядерных испытаний, но впоследствии во многом определялись процессами их переотложения, миграции и т.п. под действием экзогенных и биогенных факторов. Например, интенсивный дренаж песчаных почв в низовье р. Виллой (около района ПЯВ «Кратон-4») привел к миграции радионуклидов из почв, потому их фоновые содержания в почвах крайне низки, активности изотопов Pu – ниже детектируемых активностей. Фоновые уровни техногенных радионуклидов в почвах приведены в таблице 20.

Региональное фоновое загрязнение техногенными радионуклидами районов ПЯВ соотносится с данными, полученными соискателем и другими исследователями в Центральной Якутии [Сухоруков и др., 2001], и с глобальным уровнем, и, следовательно, сформировано в период ядерных испытаний в 1949-1962 гг

**Таблица 20. Фоновые активности техногенных радионуклидов в районах ПЯВ (мКи/км<sup>2</sup>, отн.погрешность ≤ ±10%) в бассейне р. Вилюй:**

Типы почв и подстилающих горных пород	<sup>137</sup> Cs	<sup>90</sup> Sr	<sup>239, 240</sup> Pu
Региональный фон [Рамзаев и др., 2004]	13.5	10	-
суглинистые дерново-карбонатные почвы, бассейн р. Марха [Собакин, 2010]	14.7–24.4	-	-
мерзлотные таежные почвы, бассейн р. Улахан-Ботуобуйа	4–7	5–9	-
Мерзлотные таежные оподзоленные почвы на песках и супесях, низовье р. Вилюй	0–4	нда	нда
Мерзлотные таежные почвы на суглинках, низовье р. Вилюй	10-12	13-20	0-0.74

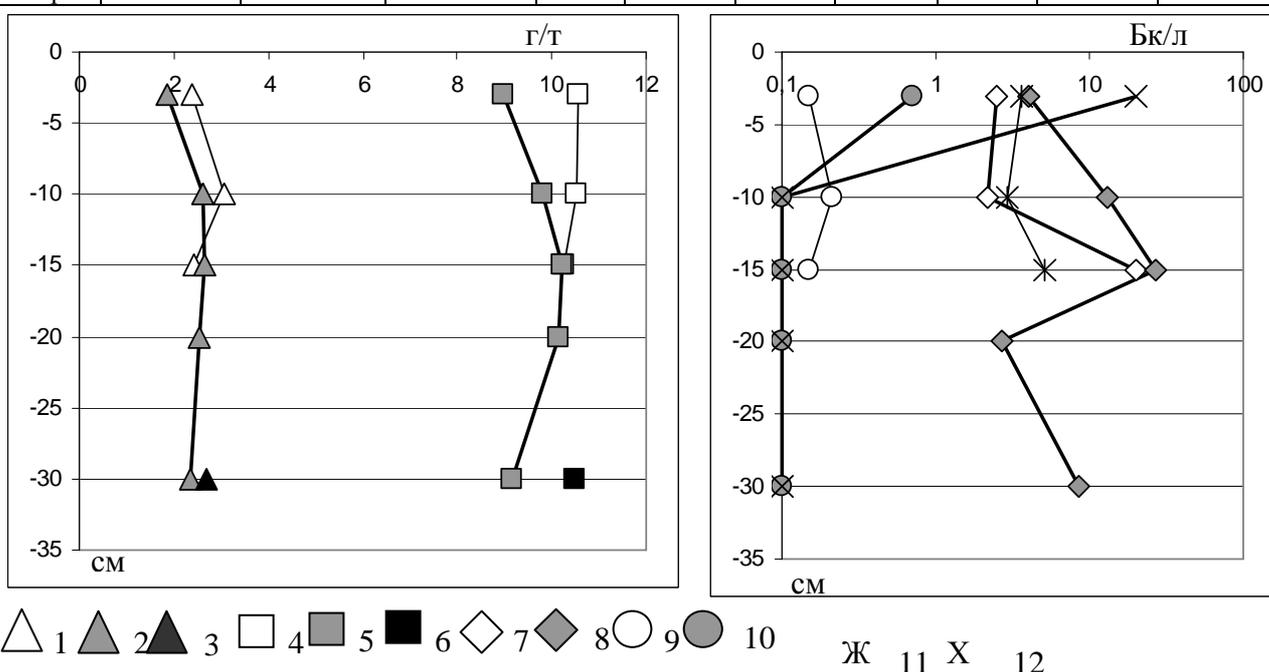
Примечание: нда – ниже детектируемой активности, - не определялось.

В целом региональное фоновое загрязнение <sup>137</sup>Cs значительно ниже фона в 40 мКи/км<sup>2</sup>, установленного для Сибири [Страховенко, 2011]. Наибольшая активность радионуклида характерна в суглинистых дерново-карбонатных почвах бассейна р. Марха. Наименьшая активность радиоцезия характерна для хорошо дренируемых почв, развитых на песках и супесях в районе ПЯВ «Кратон-4».

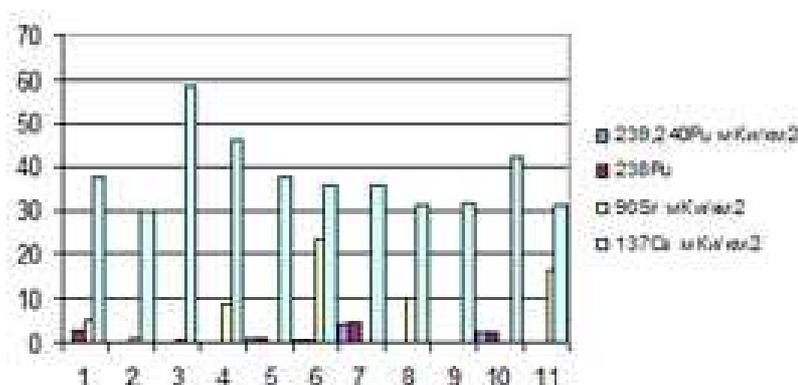
Для оценки регионального загрязнения техногенными радионуклидами выбран участок ровного северного лугового (степного) ландшафта в долине р. Лена. Суглинистые мерзлотные почвы сформированы на суглинистых отложениях высокой террасы, в последние 100 лет не входили в зону подтопления, и здесь по предположению автора процессы накопления веществ, включая аэрозольные выпадения, выражены явно, при этом процессы эрозии почв не установлены. В них установлены все техногенные радионуклиды, их уровни не превышают региональные фоновые. . В ненарушенном почвенном профиле весь <sup>137</sup>Cs и <sup>239, 240</sup>Pu аккумулярованы только в верхнем слое 0-3 см. При этом <sup>90</sup>Sr показывает, как обычно, большую подвижность в почвенном профиле и проникновение и накопление в иллювиальном горизонте почв как в нарушенном почвенном , так в естественном почвенном профилях на глубину до 30 см (рис.46, табл.21).

**Таблица 21. Содержание радионуклидов в почвах фонового участка в долине Туймаада, в 30 км южнее г. Якутск**

№ пробы	участок	Почв. горизонт	Глубина, см	$^{238}\text{U}$ , г/т	$^{232}\text{Th}$ , г/т	$\text{K}_2\text{O}$ , вес. %	$^{137}\text{Cs}$ , Бк/кг	$^{90}\text{Sr}$ , Бк/кг	$^{239,240}\text{Pu}$ , Бк/кг	$^{238}\text{Pu}$ , Бк/кг
1111	1 наруш. Почвы	A0	1--3	2.4	10.5	2.4	3.6	2.5	0.15	<0.1
1112	1 наруш. Почвы	A1	3--10	3.1	10.5	2.5	2.9	2.2	0.21	<0.1
1113	1 наруш. Почвы	С иллюв.	10--15	2.4	10.2	2.4	5.1	<b>20</b>	0.15	<0.1
1114	2 луг	A0	1--3	1.9	9.0	2.4	<b>20.2</b>	4	<b>0.71</b>	0.1
1115	2 луг	A1	3--10	2.6	9.8	2.5	< 2.0	13	0.1	<0.1
1116	2 луг	С иллюв.	10--15	2.6	10.2	2.5	< 2.0	<b>27</b>	0.1	<0.1
1117	2 луг	--- ---	15--20	2.5	10.2	2.4	< 2.0	2.7	<0.1	<0.1
1118	2 луг	--- ---	20--30	2.3	9.1	2.4	< 2.0	8.5	<0.1	<0.1
Кларк				2.7	10.5	2.8				



**Рис. 46.** Распределение радионуклидов в почвенном профиле: 1 –U, 4 – Th, 7 –  $^{90}\text{Sr}$ , 9 –  $^{239,240}\text{Pu}$ , 11-  $^{137}\text{Cs}$  и на естественном лугу: 2 –U, 5 – Th, 8 –  $^{90}\text{Sr}$ , 10 –  $^{239,240}\text{Pu}$ , 12 –  $^{137}\text{Cs}$  фонового участка долины Туймаада (август, 2011 г.). кларковое содержание в земной коре: 3 – U, 6 – Th.



**Рис. 47.** Площадное загрязнение почв техногенными радионуклидами на территории Центральной и Западной Якутии (мКи/км<sup>2</sup>).

В 2010-2014 гг. в р. Лена, выше на 1 км выше по течению от г. Ленска, в верховье р.Марха, Р. Вилюй, р. Алдан выше г. Томмот, оз. Лаха, оз. Мюрю Центральной Якутии были отобраны пробы воды для определения в них активности трития и других техногенных радионуклидов. Выявлено, что активность трития составляет 5–7 Бк/л, что сравнимо с глобальным фоном в пределах относительной погрешности жидкостно-сцинтилляционного метода анализа (табл.22).

**Таблица 22. Содержание трития в поверхностных водах фоновых участков Якутии**

№ пробы	Место	Удельная активность, Бк/л
		<sup>3</sup> H
110	в р. Лена в 1 км выше г. Ленск, июль 2010 г	7±2
33	Р. Марха выше моста	6±2
12	Р. Вилюй выше г. Верхневиллюйск	5±2
23	Р. Алдан выше г. Томмот на 1 км	5±2
51	Оз. Арылах Кобяйский улус	4±3
139	Озеро Мюрю Усть-Алданский улус Центральная Якутия	6±2

В 30 км к югу от г. Якутска отобраны поверхностные воды из обмелевшего озера. Потому автор считает, что в целом в пробе воды мы видим результаты концентрирования на испарительном геохимическом барьере, потому радиостронция в 1.5 больше, чем, например, уровень регионального фона в бассейне р. Обь-Теча, равного 0.005 Бк/л [Крышев, Сазыкина, 2009]. В пробе воды изотопы Pu не найдены (они ниже детектируемой активности), зато содержание U достигает 0.96 мкг/л (табл.23).

В р. Лена активность трития около г. Ленск (2010 г.) составляет (7±2.4) Бк/л и около г. Якутск (2011 г.) – (6±2) Бк/л, и принят нами за региональный фон. Этот фон соответствует глобальному фону, равному 5 Бк/л (в рамках относительной погрешности метода) [Рихванов, 2009], фоновой активности трития в р. Енисей [Bondareva, Zhizhaev, 2010], в р. Обь-Теча [Крышев, Сазыкина, 2009]. Региональная фоновая активность <sup>90</sup>Sr в поверхностных водах – от 0.005±0.0004 до 0.008±0.0007 Бк/л соответствует глобальному, изотопы Pu - ниже детектируемой активности (<2·10<sup>-5</sup> Бк/л).

**Таблица 23. Содержание техногенных и естественных радионуклидов в поверхностных водах фонового участка долины Туймаада, в 30 км южнее г. Якутск**

№ пробы	Удельная активность, Бк/кг (Бк/л)				Мкг/л		<sup>238</sup> U/ <sup>235</sup> U
	Sr-90,	Pu- 239,240	Pu-238	<sup>3</sup> H	Th	U	
1	0,008	<0,00002	<0,00002	7±2	<b>0.02</b>	<b>0.96</b>	<b>139.2</b>

### 3.3. Выводы.

1. Подстилающие породы в районах изучаемых ПЯВ представлены кембрийскими известняками и доломитами и их глинистыми разностями, также мезозойскими терригенными отложениями.

Мелководные морские условия на большом удалении от питающих провинций в венде-кембрии обеспечили главным образом биохемогенный тип осадконакопления с низким содержанием тяжелых металлов, редкоземельных элементов и естественных радионуклидов. В карбонатных породах района содержание Cu составляет всего 3.2 - 6.2 г/т, Zn 18 - 21 г/т, Pb 3 - 5 г/т, что ниже кларков земной коры в среднем в 6.5, 3.3, 4.8 раза соответственно. В этих породах содержание Co 1-8.6 г/т, Y 1.6-2.5 г/т, что ниже кларков земной коры в среднем 7.3 и 11.3 раза, а содержание Be – не выявляется (только в единичной пробе выявлен на уровне предела обнаружения). Суммарное содержание редкоземельных элементов 29-48 г/т, что ниже суммы кларков редкоземельных элементов в земной коре в среднем в 4 раза. Содержание U составляет всего 1.2-1.8 г/т или в 2 раза ниже кларков земной коры, Th 1.5-3.5 г/т или в среднем в 5 раз ниже кларкового содержания в земной коре. Отмечается небольшой рост содержания элементов в глинистых карбонатах по сравнению с чистыми карбонатными породами.

2. Подстилающие породы на территории Среднеботуобинского месторождения представлены терригенными породами, в которых содержание Cu, Pb, Th, U до 2 –раз больше, чем в карбонатных породах района ПЯВ «Кристалл» и «Кратон-3», но в целом также низкие содержания тяжелых металлов, редкоземельных элементов, U, Th – в 2-3 раза и более раз ниже кларков в земной коре.

3. На Вилюйской гемисинеклизе (в зоне перехода в Предверхооянский прогиб) на низовье р.Вилюй, где расположен объект ПЯВ «Кратон-4», подстилающие песчаники более обеднены тяжелыми металлами и микроэлементами по сравнению с терригенными породами Среднеботуобинского месторождения. В песчаниках содержание Cu составляет всего 11.5 - 17.5 г/т, Zn 10 – 13.2 г/т, Pb 7.5 – 9.1 г/т, что ниже кларков земной коры в среднем в 2, 5.8, 2.1 раза соответственно. В этих породах содержание Co 2-2.3 г/т, Y 3.6-3.9 г/т, что ниже кларков земной коры в среднем 8.6 и 3.7 раза, а Be – не выявлено). Суммарное содержание редкоземельных элементов 36-38 г/т, что ниже суммы кларков редкоземельных элементов в земной коре в среднем в 4 раза. Содержание U составляет всего 0.4 г/т, Th 1.5-2.1 г/т.

4. Кимберлиты могут быть источниками поступления редких элементов, тяжелых металлов Cr, Co, Sr, Ba, TR, в геохимические ландшафты, а выходы подземных рассолов на поверхность земли могут привести в геохимические ландшафты Cl, Ca, Na, Sr, Vt, B, I, Li, Rb, Cs.

4. В почвах районов ПЯВ фоновое содержание редкоземельных элементов ниже или на уровне кларков земной коры, отношение  $La+Ce/Yb+Lu \approx 18-34$ ,  $Ce/Eu \approx 38-53$ , тогда как отношение кларков земной коры  $La+Ce/Yb+Lu \approx 40.7$  и  $Ce/Eu \approx 63$ .
5. Региональное фоновое загрязнение искусственными радионуклидами соответствует глобальному уровню и сформирован в период ядерных испытаний в период до 1962 г., и оценивается:  $^{137}Cs - 13.5 \text{ мКи/км}^2$ ,  $^{90}Sr - 10 \text{ мКи/км}^2$  [Рамзаев и др., 2004]. Более высокий фон загрязнения  $^{137}Cs$  наблюдается в бассейне р. Марха - от 14.7 до 24.4  $\text{мКи/км}^2$  [Собакин, 2010], в бассейне р. Улахан-Ботубуйа ниже - от 4 до 7  $\text{мКи/км}^2$ , а  $^{90}Sr - 5-9 \text{ мКи/км}^2$ . В междуречье рр. Вилюй и Лена на промывных песчаных наблюдается наиболее низкий фон  $^{137}Cs$  от 0 до 4  $\text{мКи/км}^2$ , на суглинистых почвах  $^{90}Sr$  13-20  $\text{мКи/км}^2$ ,  $^{137}Cs$  от 10-12  $\text{мКи/км}^2$  <sup>239</sup>,  $^{240}Pu$  от 0 до 0.74  $\text{мКи/км}^2$ . В целом региональный фон загрязнения по  $^{137}Cs$  значительно ниже фона в 40  $\text{мКи/км}^2$ , установленного для Сибири [Страховенко, 2011].
6. В поверхностных водах бассейна р. Вилюй, в р. Лена активность трития составляет 5-7 Бк/л и принят за региональный фон. Этот фон соответствует глобальному фону, равному 5 Бк/л. Региональная фоновая активность  $^{90}Sr$  в поверхностных водах составляет от  $0.005 \pm 0.0004$  до  $0.008 \pm 0.0007$  Бк/л и соответствует глобальному фону. Изотопы Pu в поверхностных водах фоновых участков не найдены (ниже детектируемой активности  $< 2 \cdot 10^{-5}$  Бк/л).

## Глава 4. Основные характеристики объектов ПЯВ и расчетные модели механического разрушения вмещающей геологической среды.

### 4.1. Классификация ПЯВ.

Государственная программа СССР №7 «Ядерные взрывы для народного хозяйства» была начата 15.01.1965 г., в рамках которой было проведено 124 взрыва с использованием 135-ти ядерных взрывных устройств (ЯВУ) общей мощностью 1.6 Мт в ТЭ [Мирные..., 2001, с. 35]. При заложении ЯВУ в специальной скважине (рис.42, а) и последующем взрыве различают 4 вида ПЯВ: 1) камуфлетные, 2) неполного камуфлета, 3) рыхления и 4) экскавационные (на выброс) по результатам взрывов в зависимости от глубины заложения и мощности ЯВУ.

*Камуфлетный взрыв* – взрыв полного внутреннего действия, без нарушений на поверхности земли и выхода активности на поверхность земли. Вокруг центра взрыва образуется котловая полость за счет расплавления и испарения пород. При условии превышения прочности пород на сжатие  $\sigma_*$  (Па) над пластовым давлением  $\rho gH$  (Па):  $\sigma_* > \rho gH$ , где  $\rho$  – плотность пород ( $\text{г/см}^3$ ),  $g$  -  $9.8 \text{ м/с}^2$ ,  $H$  – глубина (м) радиус *полости* оценивается экспериментально полученной формулой

$$R_{\text{п}} = E^{1/3} \frac{354,6}{(\rho \cdot C_p^2 \cdot \sigma)^{1/9}} \quad (1)$$

где  $R_{\text{полости}}$  – радиус полости взрыва (м),  $E$  – мощность взрыва (кт в ТЭ);  $\rho$  – плотность пород ( $\text{г/см}^3$ ),  $C_p$  – скорость звука (м/с);  $\sigma$  – прочность пород на сжатие (Па) [Адушкин, Спивак, 2007].

Вокруг под действием ударной волны возникает *зона дробления*, радиус  $R_{\text{дроб.}}$  оценивается по формуле:

$$R_{\text{дроб.}} = R_{\text{полости}} \left( \frac{\rho C_p^2}{4\sigma_*} \right)^{1/3} \quad (2)$$

Радиус *зоны трещиноватости* оценивается по формуле:

$$R_{\text{трещин}} = R_{\text{дробления}} \left( \frac{\sigma_*}{2(\sigma_{\text{откол}} + \rho gH)} \right)^{1/2} \quad (3)$$

$\sigma_{\text{откол}}$  - прочность пород на откол или растяжение в рассматриваемом случае приравнен  $\sigma_{\text{откол}} = 0.01 \text{ ГПа}$ .

**Таблица 24.** Основные технические параметры объектов ПЯВ и расчетные размеры зон механического разрушения вмещающих пород

№ п/п	№ р**	Дата	Название и № боевой скважины	Назначение	Мощность, кт в ТЭ	Глубина, м	$H_{п},$ м/кт <sup>1/3</sup>	Рп, м полости	Рдр, м	Ртр, м	Нсто, м	Роз, м
1	409	02.10.1974	„Кристалл“	СП	1.7	98	82	12-13	45-60	96-123*	72-96*	180-240
2	452	05.11.1976	„Ока“ Сква. 42	ПНО	15	1520	616	25-28	54-66	104-126	152-223	370-490
3	490	09.08.1978	„Кратон-4“	ГСЗ	22	574	205	29-32	112-133	168-199	186-249	420-560
4	492	24.08.1978	„Кратон-3“	ГСЗ	22	577	206	29-32	112-133	168-199	186-249	420-560
5	500	08.10.1978	„Вятка“ Сква. 43	ПНО	15	1529	620	25-28	54-66	104-126	152-223	370-490
6	534	08.10.1979	„Шексна“ Сква. 47	ППГ	15	1541	625	25-28	54-66	104-126	152-223	370-490
7	598	10.10.1982	„Нева-1“ Сква. 66	ПНОПГ	15	1501	609	25-28	54-66	104-126	152-223	370-490
8	679	07.07.1987	„Нева-2“ Сква. 68	ПНОПГ	15	1527	619	25-28	54-66	104-126	152-223	370-490
9	681	24.07.1987	„Нева-3“ Сква. 61	ПНОПГ	15	1515	614	25-28	54-66	104-126	152-223	370-490
10	684	12.08.1987	„Нева-4“ Сква. 101	СЕ	3.2	815	553	15	-	-	90-120	220-290

*Сокращения:* СП – для создания плотины; ГСЗ – как источник волн для геосейсмондирования; ПНО – для повышения нефтеотдачи продуктивного пласта; ППГ – для повышения притоков газа; ПНОПГ – для повышения нефтеотдачи и притоков газа из продуктивного пласта; СЕ – для создания подземной емкости.  $H_{п}$  – приведенная глубина, м/кт<sup>1/3</sup>; Рп – радиус полости взрыва, м; Рдр – радиус зоны дробления вокруг полости взрыва; Ртр – радиус зоны трещиноватости вокруг полости взрыва, Нсто – высота столба обрушения, м; Роз – радиус откольной зоны на поверхности

*Примечание:* \* - глубина взрыва меньше расчетных размеров этих зон.

\*\* - номер из общего реестра ядерных взрывов в СССР.

На определенном этапе развития взрыва в центре взрыва падает давление и горный массив начинает двигаться внутрь (навстречу полости, разрушая полость). Этот эффект типичен для взрывов в прочных породах, не очень явно выражен для малопрочных грунтов и отсутствует в пластических грунтах (глина, соль) и не учитывается эмпирическими формулами. Как раз за счёт этого эффекта формируется *зона камуфлетности* (зона со сжимающими напряжениями и повышенной плотностью) в интервале  $3-10R_{\text{полости}}$  от центра взрыва, которая препятствует выходу радиоактивности. Эта зона камуфлетности и частично полость взрыва разрушаются на поздних временах за счет прихода волны разгрузки от свободной поверхности (сотни мс) и за счет образования *столба обрушения* (секунды-часы). Волна разгрузки на границе земля-воздух образует *откольную зону* с глубиной разрушений пород  $\sim 10-30 \text{ м/кг}^{1/3}$  и радиусом на дневной поверхности  $\sim 100-200 \text{ м/кг}^{1/3}$ . Высота столба обрушения оценивается в  $(6-8) R_{\text{полости}}$  [Адушкин, Спивак, 2007]. Максимальные разрушения сплошности геологической среды ориентированы в направлении дневной поверхности. При полном камуфлетном взрыве столб обрушения не достигает зоны откола (рис.8, б, стр.33), тогда как при неполном – эти зоны смыкаются (рис.8, в, стр.33), что приводит к образованию деформации поверхности эпицентра и к слабому истечению котлового газа. Экспериментально выявлено, что минимальная приведенная глубина, необходимая для обеспечения камуфлетности взрыва, должна быть равна  $80-95 \text{ м/кг}^{1/3}$  в зависимости от типа вмещающих пород [Адушкин, Спивак, 2007]. Основные параметры ПЯВ и зон разрушения приведены в табл.24.

При меньшей глубине развивается *взрыв рыхления* (рис.8, г): столб обрушения достигает поверхности земли, массив пород выше центра взрыва подвергается перемещению, создавая холмы вспучивания и (или) провальные воронки в зависимости от исходных физико-химических свойств горных пород, полость взрыва разрушается, но не вскрывается, происходит штатное истечение котлового газа (1- 4 % от общей активности). При еще малой глубине завески ЯВУ получается взрыв на выброс со вскрытием полости взрыва (рис.8, д).

При взрыве образуется широкий спектр техногенных радиоактивных изотопов: 1) *осколки вынужденного деления* тяжелых делящихся материалов, представлены первоначально 80-тью изотопами 35-ти химических элементов от Zn до Gd; 2) *радионуклиды*, образовавшиеся в результате *взаимодействия нейтронов* с материалами вмещающей геологической среды и инженерных конструкций ( $^3\text{H}$ ,  $^{60}\text{Co}$  и др., т.н. наведенная активность). Также в полости содержатся: 3) *несгоревшие остатки делящихся* ( $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{235}\text{U}$ ) и 4) *термоядерных* ( $^3\text{H}$ ) материалов и 5) *радионуклиды* ( $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{U}$ ), используемые в *конструкции ЯВУ* [Титаева, 2000, Мирные ..., 2001].

Вклад каждого радионуклида в общую активность, образовавшуюся при взрыве, зависит от многих факторов, среди которых фактор времени после взрыва и периода полураспада изотопов являются основными. В течение первого года после взрыва основная масса короткоживущих изотопов наведенной и осколочной активности распалась. Далее, в течение длительного периода времени (до 100 лет после взрыва) одним из основных вкладчиков общей активности является именно  $^3\text{H}$ , и только потом долгоживущие осколочные радионуклиды  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ . За истекший период активность трития уменьшилась примерно в пять раз по сравнению с начальной, а общая осколочная активность снизилась на несколько порядков. Со временем доля в общей радиоактивности несгоревших при взрыве делящихся материалов возрастает, это, главным образом, изотопы  $\text{Pu}$  и продуктов их естественного распада ( $^{241}\text{Am}$ ) с очень длительным периодом полураспада.

Для снижения радиационного загрязнения от взрывов рыхления и на выброс специально были разработаны «чистые» ЯВУ с уменьшенной долей заряда из тяжелых изотопов, при взрыве которого доля продуктов осколочного деления снижалась с 5-6 % до 1 % [Мирные..., 2001].

#### **4.2. Аварийный ПЯВ рыхления «Кристалл» и расчетная модель механического воздействия на геологическую среду.**

В начале 1970-х годов началась отработка кимберлитовой трубки «Удачная», был построен одноименный рабочий город, обогатительная фабрика. Необходимо было срочно построить хвостохранилище для складирования отходов алмазодобывающей промышленности – измельченных хвостов кимберлитов. В рамках государственной программы №7 было запланировано провести серию из 8-ми ПЯВ рыхления поперек долины ручья Улахан-Бысыттах для строительства плотины хвостохранилища длиной 1800 м шириной по гребню 85 м, высотой 27-30 м.

При взрыве «Кристалл» был применен именно «чистый» (с уменьшенной долей заряда из тяжелых изотопов) заряд малой мощности в 1.7 кт в ТЭ на приведенной глубине в 82 м/кт<sup>1/3</sup> (глубина 98 м) 02.10.1974 г. [Мирные..., 2001]. Но вопреки расчетам насыпь получилась высотой всего 14 м, и от последующих взрывов отказались (хвостохранилище было построено позднее в долине руч. Правый Киенг обычным способом) (рис.43, в).

ПЯВ «Кристалл» отнесен к аварийным взрывам: на 1.75 сек был выброшен кусок обсадной трубы и начался ранний выход вещества из полости взрыва по затрубному пространству, на 4-ой секунде взрыва купол выброса грунта достиг максимальной высоты 60 м, в период с 6.2 сек до 12.5 сек произошел штатный прорыв газов на поверхность (т.н. базисная волна), несущих с собой примерно 4 % общей активности (рис.50). Радиоактивный

след протянулся по азимуту  $70^\circ$  на несколько километров, часть примыкающего к эпицентру лесного массива погибла. После взрыва объем холма составил  $1.6 \cdot 10^5 \text{ м}^3$ , средняя высота – 10

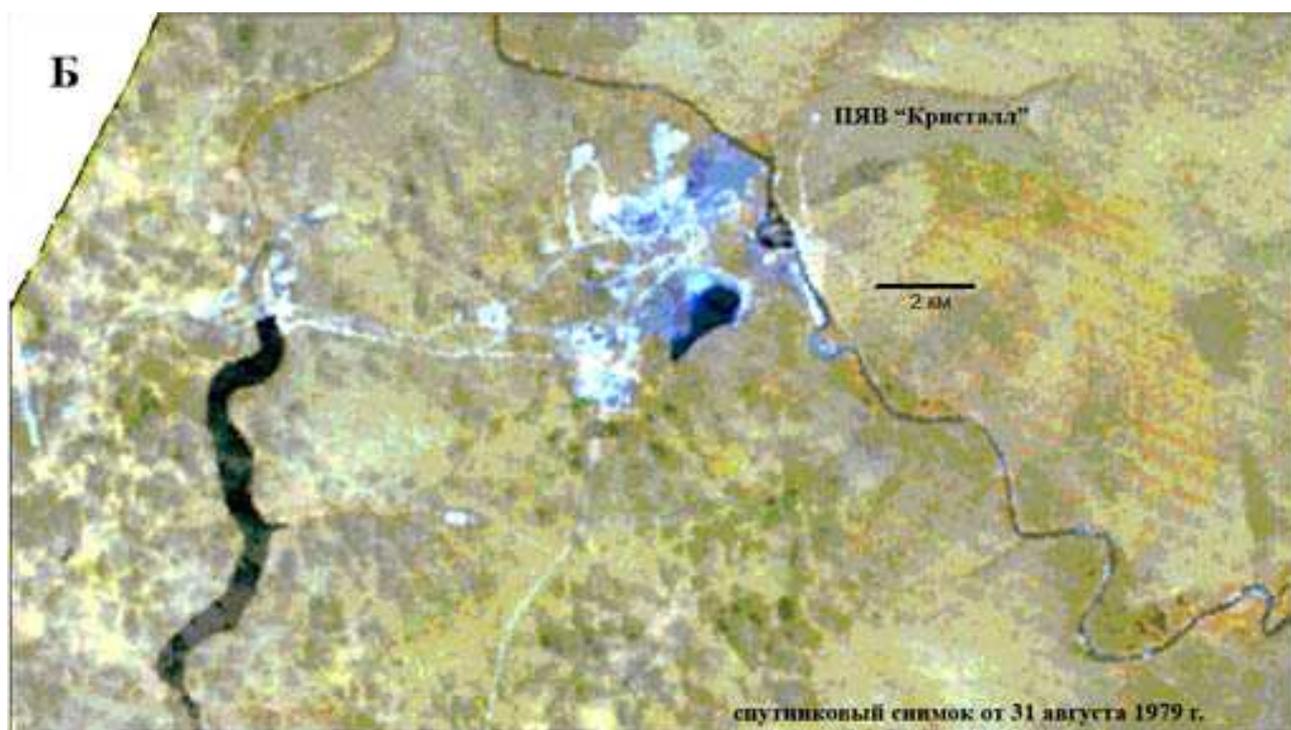
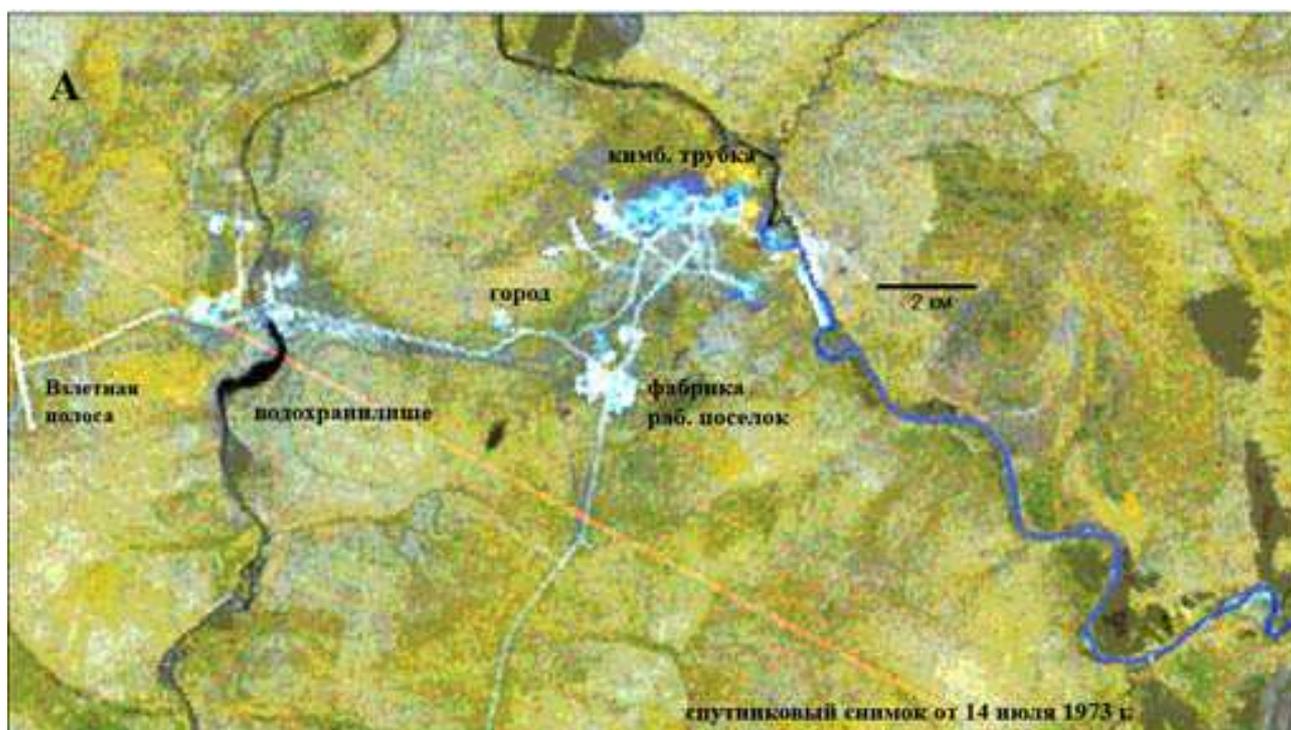


Рис.48. Космоснимок района кимберлитовой трубки Удачная 14.07.1971 г.(А) и 31.08.1979 г. (Б).



Рис.49. Этапы развития техногенеза в районе кимберлитовой трубки «Удачная» по космоснимку 2001 г. и вид на саркофаг в эпицентре ПЯВ «Кристалл», созданный из пустых пород карьера кимберлитовой трубки «Удачная», вокруг огорожена санитарно-защитная зона, очищенная от деревьев, мохово-лишайникового и верхней части почвенного покрова. На переднем плане – руч. Улахан –Бысыттах, фото с отвала около карьера кимберлитовой трубки «Удачная». Фото В.Е. Захарова, 2007.

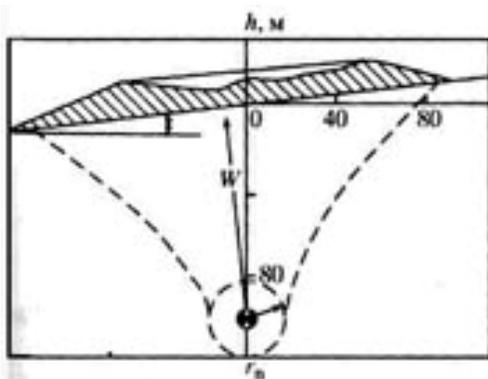
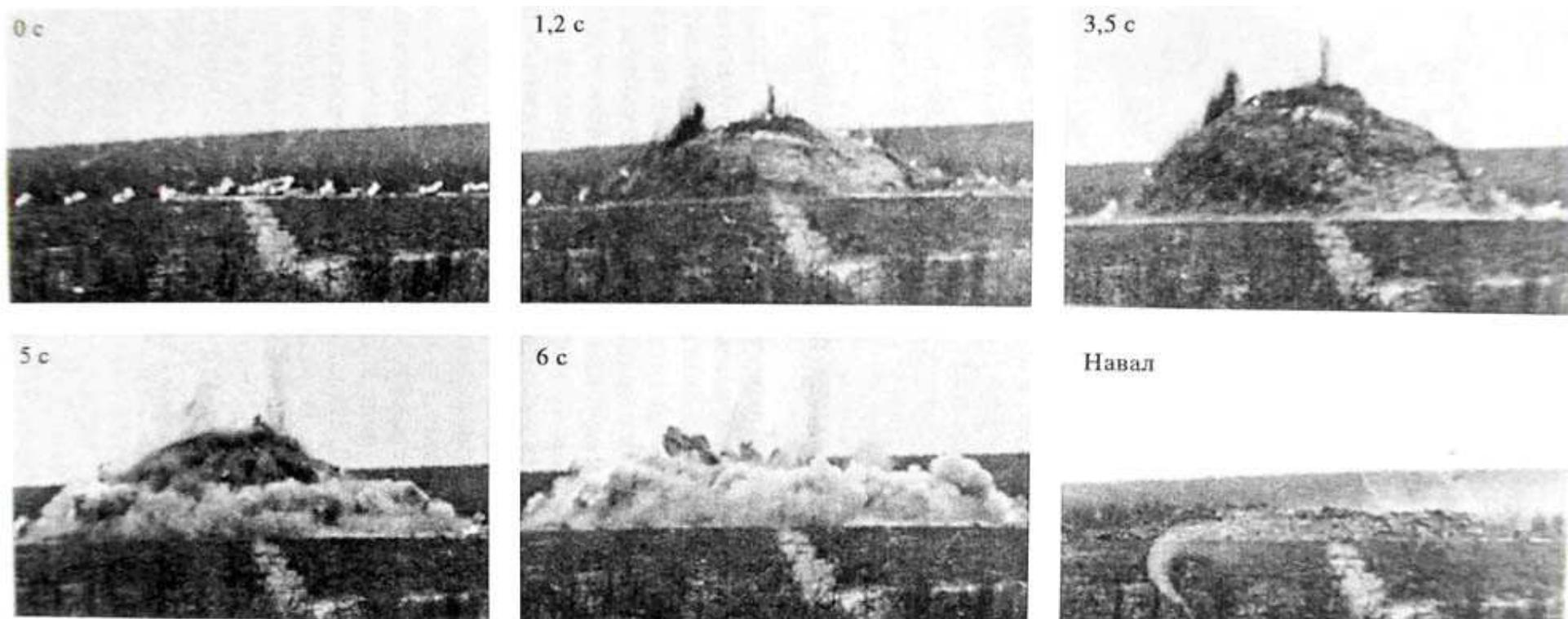


Рис. 50. Развитие купола взрыва рыхления «Кристалл» (3,5 с – максимальное поднятие купола взрыва, 6 с – выход базисной волны) [Адушкин, Спивак, 2007] Слева – схема купола разрушенного массива многолетнемерзлых пород.

м, диаметр основания – 200 м. По расчетам по формуле (1) радиус полости взрыва составил

$$R_{\text{полости}} = E^{1/3} \frac{354,6}{(\rho C_p^2 \sigma_{\text{сжатия}})^{1/9}}, \quad (1)$$

12 м, затем полость обрушилась под весом породы через 17 ч. с образованием провала по центру насыпи радиусом 50 м, глубиной 5 м. Объем провала составлял примерно в  $10^4 \text{ м}^3$ , что соответствует расчетному объему полости взрыва в  $0,7 \cdot 10^4 \text{ м}^3$  при ее радиусе 12 м [Артамонова и др., 2012] и подкрепляет заключение об обрушении полости. В центре воронки под действием прорвавшихся газов возник холм высотой 3 м (рис.50). Из-за малой глубины взрыва в 98 м столб обрушения и зона откола соединились. В 1990 г. на месте воронки обнаружено озеро глубиной до 6 м диаметров 60 м [Бурцев, Колодезникова, 1997]. Массив пород от центра взрыва к поверхности земли был поколот и разрушен. Зона колотой породы напоминает формой перевернутый конус объемом  $\sim V = 4/3 \cdot \pi D^2 \cdot H = 1025730 \text{ м}^3$ , основанием которого служит образовавшийся при взрыве холм (рис.50). Механическое воздействие взрыва в глубину от центра взрыва остается открытым вопросом. В 1992 г. над эпицентром взрыва создан «саркофаг» – каменный навал высотой до 20 м площадью 3,28 га (с радиусом 100 м) (рис.49Б). Объект ПЯВ «Кристалл» находится сейчас в 3.5 км от карьера кимберлитовой трубки «Удачная» (рис.43, в).

В полости взрыва ПЯВ «Кристалл» согласно расчетов ВНИИЭФ РФЯЦ через год общая активность составляла 22 тыс. Ки, а на поверхность земли выброс активности составил  $\sim 4 \%$  от общей активности, что, по нашим оценкам, равнялось  $\sim 880$  Ки. Радиоактивный след протянулся по азимуту  $70^\circ$  до нескольких км [Голубов и др., 2004].

Согласно оценке другого источника, объем активности, вышедшего на поверхность при взрыве, был ниже: не более 1 % продуктов взрыва, при этом через 2 часа после взрыва на расстоянии 500 м от эпицентра взрыва мощность экспозиционной дозы  $\gamma$ -излучения составляла 0.3 Р/ч, а через сутки 0.04 Р/ч [Мирные..., 2001]. Через 35 лет (на 02.10.2009 г.) активность в полости взрыва за счет естественного распада снизилась до 2.9 тыс. Ки, а на поверхности снизилась соответственно до  $\sim 116$  Ки. (рис.51)

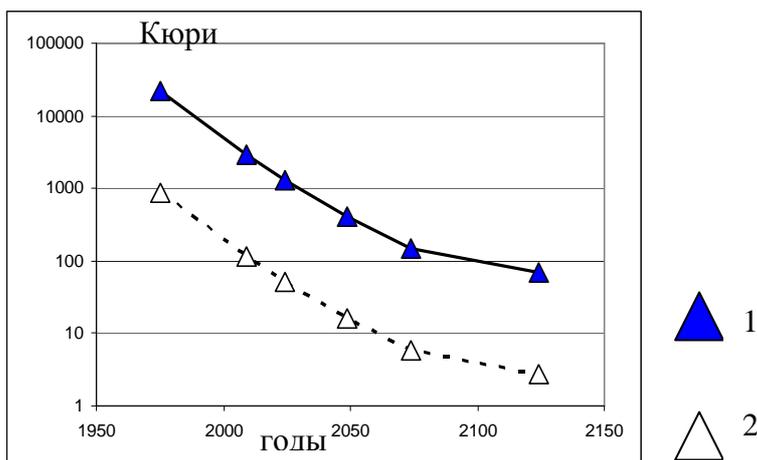


Рис.51. График расчетного снижения активности за счет естественного распада в полости взрыва «Кристалл» (1) и радиоактивного вещества (4 % от общей активности), вышедшей на поверхность земли при взрыве (2) [Данные отчета ИТМФ РФЯЦ по дог. № 2485-5-96/2009]

### 4.3. Аварийный ПЯВ «Кратон-3» и расчетная модель механического воздействия на геологическую среду.

Объекты мирных ПЯВ являются сложными геотехногенными системами с длительной историей развития, начиная с момента сильного термобарического и радиационного воздействия на вмещающую геологическую среду и последовавшими процессами релаксации вот уже более 20-30 лет. Полости этих взрывов нужно рассматривать как неконтролируемые неизолированные подземные пункты размещения особых радиоактивных отходов. Необходимость изучения состояния недр у объектов ПЯВ не подлежит сомнению. Только зная современное состояние этих геотехногенных систем, можно делать прогнозы и предпринимать необходимые меры по снижению экологических рисков, связанных с этими опасными объектами.

ПЯВ «Кратон-3» мощностью 22 кт в ТЭ в качестве источника сейсмических волн для глубинного сейсмического зондирования земли по заказу Министерства геологии СССР был произведен 24 августа 1978 г. в 38 км к востоку от пос. Айхал на правом берегу р. Марха. Заряд мощностью 22 кт был размещен в скважине в кровельной части среднекембрийских глинистых и мергелистых известняков и доломитов на глубине 577 м (рис.19, 52).

Для предотвращения выхода радиоактивных продуктов взрыва была специально сооружена цементная забивка общей длиной интервала в стволе боевой скважины в 180 м, остальной объем скважины был заполнен водой (это была обычная практика заполнения водой стволов скважин, тогда как несжимаемая вода в стволе боевой скважины, по мнению автора, могла выполнять функции пробки, толкающей цементные пробки изоляции).

При бурении скважины в интервале глубин 190+230 абс.м было отмечено поглощение промывочной жидкости. Для герметизации этого интервала бал проведена закачка глинисто-цементного раствора. При опрессовке открытого ствола окончательно пробуренной скважины было выявлено, что скважина продолжает поглощать раствор, так как давление в скважине поднять не удалось. По данным резистивометрии поглощающий горизонт был

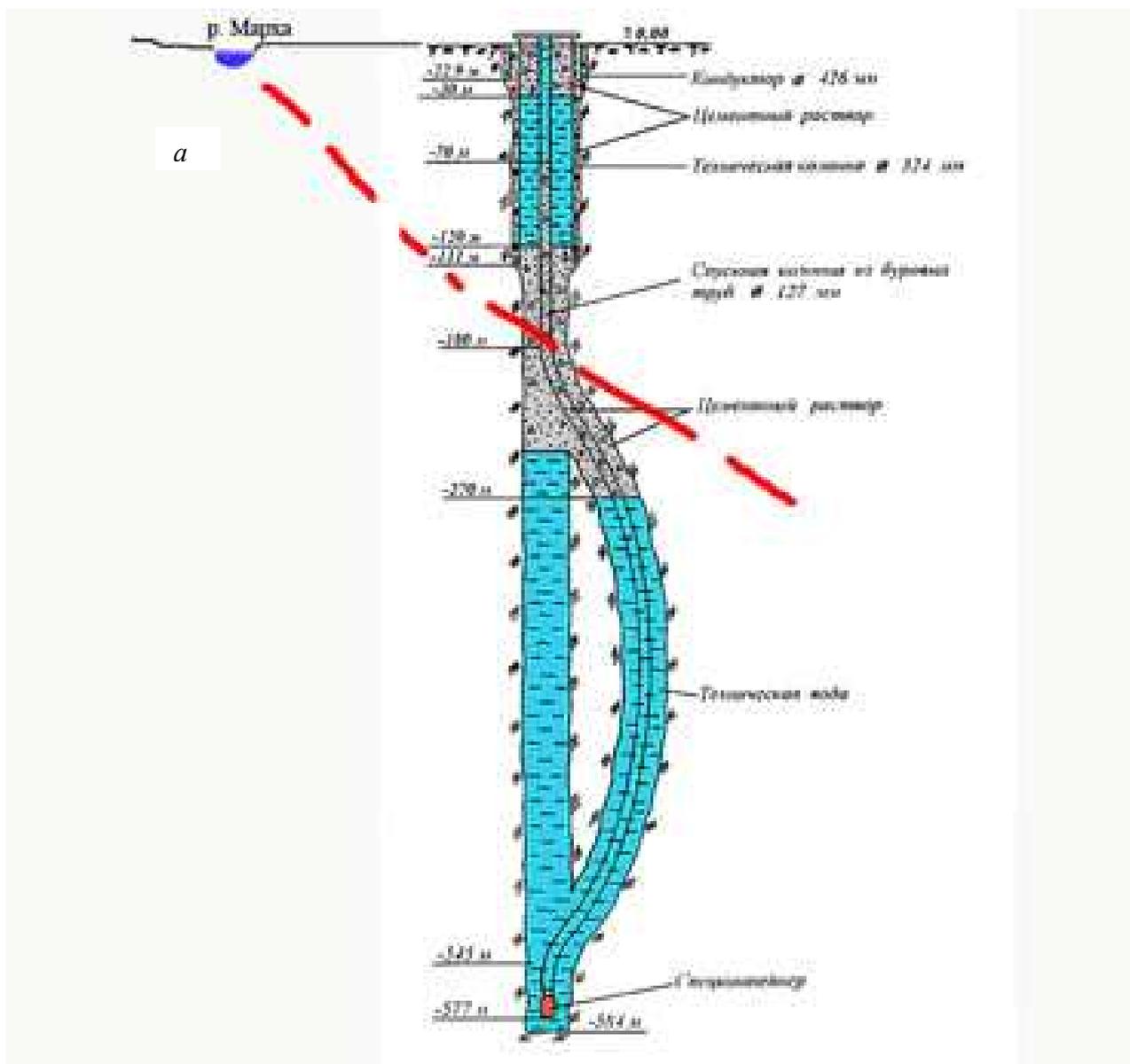


Рис. 52. Конструкция боевой скважины «Кратон-3» на момент взрыва. Голубым показано наполнение ствола скважины водой, красной штрих-линией – зона тектонического разлома (а), фрагменты разлетевшихся конструкций боевой скважины в 300 м к югу от устья, фото Артамоновой, 2008 г.(б)

уточнен в интервале глубин 165+186 м. С целью ликвидации зоны поглощения трижды устанавливались изоляционные мосты путем закачки цементного раствора через специально спускаемые до зоны поглощения заливочные трубы. Интервалы установки мостов приведены ниже.

Герметичность скважины проверяли путем опрессовки водой, пытались достичь 40 атмосфер, но такое давление не достигалось, после разбуривания первого моста давление в скважине поднялось до 15 атм и после прекращения подачи воды в течение 4 мин упало до 0.

### Интервалы установки изоляционных мостов на скважине «Кратон-3»

Номер моста	Интервалы установки, м		Дата установки/разбуривания
	расчетный	фактический	
1	150-190	140-210	01.06.78 / 03.06.78
2	150-190	119-175	04.06.78 / 06.06.78
3	120-220	160*	08.06.78 / 09.06.78

\* Нижняя граница не установлена.

После двух неудачных попыток была проведена герметизация в 3-й раз, но ее результаты не получилось проверить, поскольку при разбуривании цементного моста на отметке 180 м произошла неуправляемая зарезка нового ствола скважины, который соединился со старым стволом на глубине 545 м. Максимальное расстояние между стволами не превышает 5 м. Новый ствол скважины был закончен бурением на глубине 585 м. В дальнейшем проверка скважины на герметичность не производилась (рис. 52).

Таким образом боевая скважина получилась со сдвоенными двумя стволами и непроверенными пробками цементной герметизации.

Приведенная глубина взрыва  $H/E^{1/3} = 206 \text{ м/кт}^{1/3} \gg 80-95 \text{ м/кт}^{1/3}$  с большим запасом превышает критичные приведенные глубины взрыва  $80-95 \text{ м/кт}^{1/3}$ , что обеспечивает полную камуфлетность взрыва, исключая прорыв радиоактивных продуктов взрыва на поверхность земли. Прогнозировалось только позднее (часы) малоинтенсивное истечение изотопов Kr и Xe. Тем не менее, на первой же минуте после взрыва над скважиной появился вертикально восходящий столб дыма и пара, вверх полетели кабели, колонна труб, бетонная забивка. Через разгерметизированную скважину вырвались радиоактивные продукты взрыва в виде газо-пылевого облака. Куски металлических труб боевой скважины, пробитых осколками, в 2008 г. найдены в 300 м к югу от ее устья (рис.52, б).

Согласно заключения Госкомиссии, нарушения в технологии забивки боевой скважины привели к частичной разгерметизации боевой скважины и аварийному выбросу через устье скважины ~2 % общей активности в виде радиоактивных газов и пылевых частиц [Радиационная..., 1980 (Приложение3), Мирные..., 2001].

Через один год общая активность в полости взрыва составляла 240 тыс. Ки, а через 31 год (на 02.10.2009 г.) она снизилась до 14.7 тыс. Ки в результате естественного распада [отчет ИТМФ РФЯЦ по дог. с ИГМ СО РАН №№ 2485-5-96/2009]. Значит, общая

радиоактивность вещества, попавшего из зоны взрыва на поверхность земли, по нашим оценкам, составляла примерно 4800 Кюри в 1979 г. и 294 Кюри в 2009 г. соответственно (рис.53). Радиоактивное газопопылевое облако двигалось в северо-восточном направлении и его основная активность пришлась на первые 3–4 км, что привело к гибели прилегающего массива северной тайги. Погибший лес, так называемый мертвый лес, до сих пор представляет собой сухостой лиственницы Гмелина (*Larix Gmelinii*), со слабой порослью низкорослых кустарников; почти повсеместно развит мохово-лишайниковый покров (род *Cladina*, род *Dicranum*, *Hylocomium* и др.).

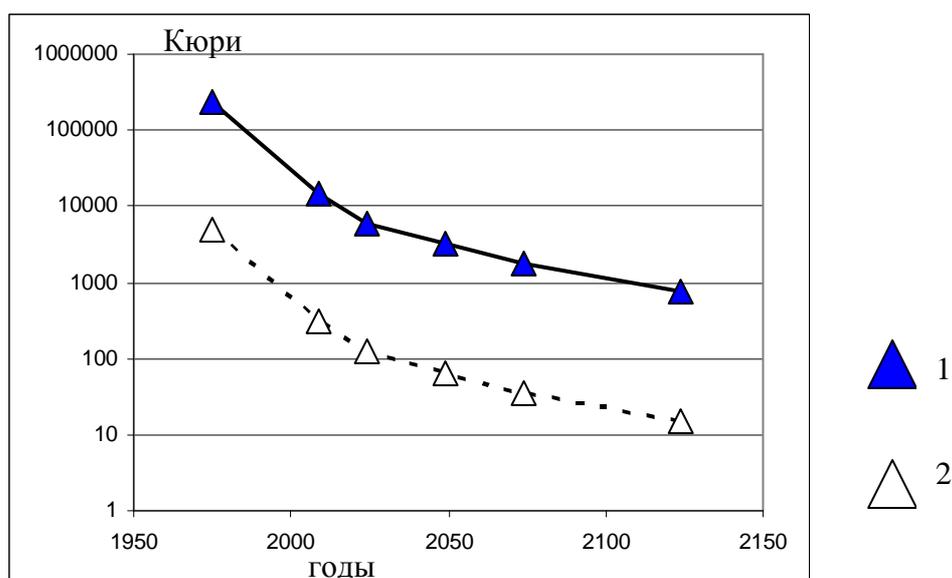


Рис.53. График расчетного снижения активности в результате естественного распада в полости взрыва «Кратон-3» (1) и на радиоактивного вещества ( $\approx 2\%$  от общей активности), вышедшей на поверхность при взрыве, (2). [Данные отчета ИТМФ РФЯЦ по дог. № 2485-5-96/2009]

В 1981 г. на этой территории были проведены дезактивационные работы: в 10-15 м к западу от устья боевой скважины был сооружен котлован объемом около 4000 м<sup>3</sup>, в котором захоронили загрязненное буровое оборудование, технику и верхний слой почв с рабочей площадки. В 2006 г. над озером, образовавшимся над устьем боевой скважины и могильником, была сформирована насыпь из аллювия местного ручья высотой примерно 1.5 м и площадью 0.731 га. В период с 1981 до 1990-х годов секретный объект «Кратон-3» оставался без наблюдения. В 1984 г. якутские геологи «открыли» участок тайги с радиоцезиевой аномалией непонятного происхождения, однако дальнейшие исследования по этому факту не проводились. С 1993 г. на объекте МПЯВ «Кратон-3» начались радиоэкологические исследования [Бурцев, Колодезникова, 1997].

Известно, что вдоль р. Марха на поверхность выходит зона тектонического разлома [Микуленко и др., 2006] северо-западного простирания с углом падения 55° на северо-восток. А устье боевой скважины расположено всего в 160 м от берега реки. По мнению автора, в интервале глубин 165+186 м (поглощающий горизонт) была пройдена бурением трещиноватая зона тектонического разлома, выходящего на земную поверхность по руслу р. Марха. По-видимому, перед взрывом так и не была достигнута полная герметизация этого поглощающего проводящего участка разреза.

Какую роль сыграли в развитие аварийной ситуации: 1) двойной ствол боевой скважины и его кривизна, 2) заполнение ствола боевой скважины водой, 3) явно недостаточная герметизация поглощающего горизонта на интервале 165+186 м глубины – может прояснить 3D математическое моделирование взрыва с использованием современных методов программирования. Можно предположить, что асимметричность геологической среды (наличие проводящей структуры разлома), асимметричность ствола боевой скважины и могли стать роковыми факторами для развития аварийного сценария. Водное заполнение ствола скважины тоже порождает вопросы: а не сыграла ли вода роль упругого поршня, выбившего цементную пробку, ведь упругость и несжимаемость воды являются одни из ее физических свойств.

Разгерметизации боевой скважины, несомненно, осложнила картину события, но при оценке зон механического воздействия взрыва на геологическую среду объекта «Кратон-3» на данном этапе не учитывалась.

Размер полости взрыва (её объем или радиус) является одним из основных характеристик действия подземного ядерного взрыва. Для оценок размеров полости воспользовались формулой Родионова [Адушкин, Спивак, 2007] при условии превышения прочности пород на сжатие  $\sigma^*$  (Па) над пластовым давлением  $\rho gH$  (Па):  $\sigma^* > \rho gH$ , где  $\rho$  – плотность пород ( $\text{г/см}^3$ ),  $g$  - 9.8 ( $\text{м/с}^2$ ),  $H$  – глубина (м). Формула правильно передает зависимость радиуса полости от свойств грунта: от прочности на сжатие  $\sigma^*$  и акустической жесткости  $\rho C_p^2$ :

$$R_{\text{полости}} = E^{1/3} \frac{354,6}{(\rho C_p^2 \sigma_{\text{сжатия}})^{1/9}}, \quad (1)$$

где  $R_{\text{полости}}$  – радиус полости взрыва (м),  $E$  – мощность взрыва (кт в ТЭ);  $\rho$  – плотность карбонатных пород ( $\text{г/см}^3$ ),  $C_p$  – скорость звука (м/с);  $\sigma_{\text{сжатия}}$  (или  $\sigma^*$ ) – прочность пород на сжатие (Па).

Радиус полости взрыва согласно формулы 1 составляет от 29 до 32 м для скорости звука ( $C_p$ ) от 5400 до 3500 м/с. При оценке принимались плотность карбонатных пород  $\rho=2.38 \text{ г/см}^3$ ,  $\sigma_{\text{сжатия}}$  (или  $\sigma^*$ ) = 0.1 ГПа. Математическое моделирование показало, что полость

сформировалась уже на время 30-40 мс, её радиус составлял 24 м, что близко к расчетам по экспериментальным формулам (в пределах  $\pm 20\%$ ).

Радиус зоны дробления  $R_{\text{дроб.}}$ , равная 112-133 м, получена по формуле:

$$R_{\text{дроб.}} = R_{\text{полости}} \left( \frac{\rho C_p^2}{4\sigma_*} \right)^{1/3} \quad (2),$$

Радиус зоны трещиноватости, равный 168-199 м, оценен по формуле [3]

$$R_{\text{трещин}} = R_{\text{дробления}} \left( \frac{\sigma_*}{2(\sigma_{\text{откол}} + \rho g H)} \right)^{1/2} \quad (3)$$

$\sigma_{\text{откол}}$  - прочность пород на откол или растяжение в рассматриваемом случае приравнен  $\sigma_{\text{откол}} = 0.01$  ГПа.

Отметим условность этих зон. В реальности, это означает, что в этих зонах происходит нарушение сплошности среды и возникновение блочного иерархического состава разрушенной геологической среды. Выделенные зоны механического разрушения имеют асимметричную форму и максимальные изменения ориентированы в направлении дневной поверхности, также большую роль в развитии этих зон имеют искусственно созданные ослабленные участки в массиве [Адушкин, Спивак, 2007]. Какую роль сыграла разгерметизация стволовой части скважины на формирование зон механического поражения на объекте «Кратон-3» остается еще открытым вопросом, который, возможно, будет выяснен путем ретроспективного 3D-математического моделирования процесса взрыва.

Согласно математических расчетов [Отчет ИГМ., 2009], на расстоянии 100 м от центра взрыва максимальное смещение породы достигало 0.42 м, максимальное радиальное давление – 0.8 ГПа, на расстоянии 200 м – 0.17 м и 0.13 ГПа соответственно.

На определенном этапе развития взрыва в его центре падает давление и горный массив начинает двигаться внутрь (навстречу полости). Этот эффект типичен для взрывов в прочных породах, не очень явно выражен для малопрочных грунтов и отсутствует в пластических грунтах (глина, соль) и не учитывается эмпирическими формулами. Как раз за счёт этого эффекта, согласно расчетам, в массиве сформировалась зона камуфлетности (зона со сжимающими напряжениями и повышенной плотностью) в интервале 100 – 300 м от центра взрыва, которая препятствует выходу радиоактивности из полости взрыва. В промежуток времени 30-60 мс в 100 м от центра взрыва давление резко упало и на время 70-80 мс «наступило» возвратное движение массива, т.е. грунт начал двигаться внутрь (навстречу полости), скорость стала отрицательной. На расстоянии в 200 м давление падает и идет возвратное движение грунта в промежутке времени с 55 до 90 мс. Эта зона камуфлетности разрушается на поздних временах за счет прихода волны разгрузки от

свободной поверхности (сотни мс), образующей откольную зону и за счет образования столба обрушения (секунды-часы).

В диапазоне глубин заложения взрыва  $\sim 100-200 \text{ м/кт}^{1/3}$  характерен откол поверхностного слоя грунта. При приведенной глубине  $206 \text{ м/кт}^{1/3}$  по расчетам глубина зоны откола от дневной поверхности на объекте «Кратон-3» составила около 120 м. Площадь откольной зоны на дневной поверхности описывается диаметром  $300-400 \text{ м/кт}^{1/3}$  ( $300 \cdot 22^{1/3} - 400 \cdot 22^{1/3}$ ) или радиусом 420 – 560 м для взрыва «Кратон-3».

Высота столба обрушения оценивается в (6-8)  $R_{\text{полости}}$  [Адушкин, Спивак, 2007], что с учетом прочностных свойств известняков оценивается нами  $\sim 186 - 249$  м, но реальная высота столба обрушения неизвестна. Следует отметить, что размеры столба обрушения зависят от многих параметров геологической среды и термодинамики продуктов взрыва.

Принципиальное влияние на время обрушения и сам факт обрушения оказывает геологическое строение массива, в первую очередь, тектонические разломы и трещиноватость пород. В рассматриваемом случае в интервале 391–412 м выше точки заложения заряда (центра взрыва) (или на глубине 165–186 м) при проходке боевой скважины была зафиксирована трещиноватая водопоглощающая зона, которую мы связываем с тектоническим разломом северо-восточного простирания. Достиг ли столб обрушения этой разломной зоны – остается открытым вопросом.

#### **4.4. Камуфлетный ПЯВ «Кратон-4» и расчетная модель механического воздействия на геологическую среду.**

Подземный ядерный взрыв «Кратон-4» мощностью 22 кт в ТЭ был произведен в штатном режиме качестве источника волн для сейсмозондирования земли 9 августа 1978 г. на глубине 567 м прогиба в толще нижнемеловых песчаников переходной зоны Виллюйской синеклизы и Предверхоянского прогиба. В районе проведены эпизодические радиоэкологические обследования по госзаказу Республики Саха (Якутия), В 1992 году в масштабе 1:25000 была покрыта с воздуха площадь размером  $310 \text{ км}^2$  с использованием модернизированной станции СКАТ-77, способной фиксировать загрязнение цезием - 137 на уровне глобального фона (Колтин, 1992). В результате проведенных работ цезиевых аномалий не обнаружено, и его отсутствие подтверждено пешеходными радиометрическими измерениями на участке проведенного ПЯВ «Кратон-4» и на прилегающей территории в радиусе 3-5 км от боевой скважины отрядов Якутского госуниверситета (Степанов В.Е.) в 1993-1994 гг. и в 2001 г. (Ложников Б.Н.). Все показатели измерений в 2001 г. были ниже предельных значений, установленных НРБ-99 и СП 2.6.1.258-99, на основании которых был сделан вывод об отсутствии оснований для предположения техногенного загрязнения в

результате проведения ПЯВ. Публикации по оценке радиоэкологического состояния района ПЯВ «Кратон-4» отсутствуют. Вместе с тем Микуленко с соавторами [2006] проведен анализ геолого-географических условий расположения объекта ПЯВ «Кратон-4» с прогнозом доминирующих направлений движения подземных вод, в том числе возможно загрязненных радионуклидами из полости взрыва.

Объект «Кратон-4» расположен в труднодоступном безлюдном месте на берегу озера «Сордонгнох», ближайший населенный пункт в 20 км – пос. Тыайа с населением всего в 300 человек. Рельеф в районе слабохолмистый равнинный, с общим слабым уклоном к северо-востоку, абсолютные высоты - 80-100 абс.м, район относится к Центрально -Якутской равнине. На поверхность выходят мезозойские нелитифицированные сыпучие пески с высокой пористостью, на которых произрастает сосновый лес. В районе распространено множество озер, соединенных сетью ручьев. Болотистые водотоки со слабым течением текут в северо-восточном направлении и разгружаются в р. Виллой.

По аналогии с практически одинаковым по мощности и глубине взрывом «Кратон-3» можно предположить примерно такую же активность в полости взрыва: ~ 240 тыс. Ки после 1 года, а через 31 год (на 02.10.2009 г.) ~ 14.7 тыс. Ки, из расчета, что снижение произошло за счет только естественного распада. В интервале глубин 502,0 ÷ 35,6 м установлен цементный мост. Устье скважины оборудовано заглушкой АТФ65\*350 с глухими фланцами. На устье скважины установлена бетонная тумба (рис.54).



Рис.54. Общий вид на устье боевой скважины объекта МПЯВ «Кратон-4» (слева – крупным планом) (фото Артамоновой С.Ю., сентябрь 2011 г.)

#### 4.5. Группа ПЯВ на территории Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения

С 1976 по 1987 годы на территории Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения было проведено в штатном режиме 7 ПЯВ (рис.23, б, табл.20, 22). Шесть взрывов, каждый мощностью в 15 кт в ТЭ, были проведены на глубине примерно 1500 м, в глинистых доломитах сокуканской свиты в пределах III подсолевого водоносного комплекса для повышения нефте- и газопритоков из осинского продуктивного пласта, развитого у кровли данного водоносного комплекса (рис.25, 27).Седьмой взрыв «Нева-4» мощностью 3.2 кТ в ТЭ был проведен на глубине 815 м в соляном пласте толбочанской свиты нижнего кембрия для создания емкости – хранилища нефтепродуктов. На промышленных площадках, за исключением «Нева-4», на расстоянии примерно 100 м друг от друга было подготовлено по две скважины: боевая предназначалась для закладки зарядного устройства и последующего взрыва, вторая скважина – разведочная. Скважины вскоре после взрывов вскрывались для наблюдений и испытательных работ.

С помощью экспериментальных формул оценены зоны механического воздействия взрывов на вмещающую геологическую среду. Приведенные глубины заложения зарядов для 6-ти МПЯВ  $H_{пр} = H/E^{1/3} = 1500 \text{ м}/15^{1/3} \text{ кт}^{1/3} = 608 \text{ м}/\text{кт}^{1/3}$  и для  $H_{пр} = 815/3.2^{1/3} \text{ кт}^{1/3} = 553 \text{ м}/\text{кт}^{1/3}$  обеспечивали типичный камуфлетный взрыв. Несмотря на то, что цементные пробки скважин были подготовлены для каждого взрыва по индивидуальной схеме (табл.22), все взрывы были проведены в штатном режиме без выхода радиоактивности на поверхность. Размер полости взрыва (её объем или радиус) является одним из основных характеристик действия подземного ядерного взрыва. Для оценок размеров полости воспользовались формулой Родионова [Адушкин, Спивак, 2007] при условии превышения прочности пород на сжатие  $\sigma_*$  (Па) над пластовым давлением  $\rho gH$  (Па):  $\sigma_* > \rho gH$ , где  $\rho$  – плотность пород ( $\text{г}/\text{см}^3$ ),  $g$  -  $9.8 \text{ м}/\text{с}^2$ ,  $H$  – глубина (м). Формула правильно передает зависимость радиуса полости от свойств грунта: от прочности на сжатие  $\sigma_*$  и акустической жесткости  $\rho C_p^2$ :

$$R_{\text{полости}} = E^{1/3} \frac{354,6}{(\rho C_p^2 \sigma_{\text{сжатия}})^{1/9}}, \quad (1)$$

где  $R_{\text{полости}}$  – радиус полости взрыва (м),  $E$  – мощность взрыва (кт в ТЭ);  $\rho$  – плотность карбонатных пород ( $\text{г}/\text{см}^3$ ), нами принята  $\rho = 2.38 \text{ г}/\text{см}^3$ ,  $C_p$  – скорость звука (м/с);  $\sigma_{\text{сжатия}}$  ( $\sigma_*$ ) – прочность пород на сжатие  $1000 \text{ кг}/\text{см}^2$  (100МПа). Радиус полости взрывов, за исключением МПЯВ «Нева-4», согласно формуле 1 составляет от 25.3 до 27.9 м для скорости звука ( $C_p$ ) от 5400 до 3500 м/с.

Радиус зоны дробления  $R_{\text{дроб.}}$ , равная 54 – 66 м для 6-ти МПЯВ, получена по формуле:

$$R_{\text{дроб.}} = R_{\text{полости}} \left( \frac{\rho C_p^2}{4\sigma_*} \right)^{1/3} \quad (2)$$

Радиус зоны трещиноватости, равный 104-126 м для 6-ти МПЯВ (за исключением «Нева-4»), оценен по формуле [3]

$$R_{\text{трещин}} = R_{\text{дробления}} \left( \frac{\sigma_*}{2(\sigma_{\text{откол}} + \rho g H)} \right)^{1/2} \quad (3)$$

$\sigma_{\text{откол}}$  - прочность пород на откол или растяжение в рассматриваемом случае приравнен  $\sigma_{\text{откол}} = 100 \text{ кг/см}^2$  (или 10 МПа).

Выделенные зоны механического разрушения, как правило, имеют асимметричную форму и максимальные изменения ориентированы в направлении ослабленных участков в массиве [Адушкин, Спивак, 2007]. Высота столба обрушения оценивается в (6-8)  $R_{\text{полости}}$ , что с учетом прочностных свойств доломитов и каменной соли оценивается нами от 152 до 223 м. Следует отметить, что размеры столба обрушения зависят от многих параметров геологической среды и термодинамики продуктов взрыва. По нашим оценкам, на объекте «Нева-1» столб обрушения наиболее близко подходит к подошве траппов – расстояние между ними составляет около 80 м, на объекте «Вятка» - расстояние от столба обрушения до траппов составляет всего около 120 м, для остальных объектов – примерно от 220 м до 290 м. Эти расстояния имеют важное значение в связи с проблемой вероятного возникновения проводящих геоструктур **«полость взрыва – столб обрушения – контактные зоны траппов – тектонические разломы – поверхность земли»** для переноса радионуклидов в геологической среде.

Для ПЯВ «Нева-4», проведенного в соляном пласте, должны быть применены формулы, учитывающие не упругие, а пластические свойства вмещающих пород. По неопубликованным данным Министерства охраны природы Республики Саха (Якутия) расчетный радиус подземной емкости составляет примерно 15 м, а ее объем – примерно  $9 \pm 2$  тыс. м<sup>3</sup>.

В эпицентрах камуфлетных взрывов вокруг боевых скважин формируются ослабленные проницаемые зоны, как результат процессов:

- откола массива пород под действием отраженной волны от границы двух физических сред «порода – воздух» [Адушкин, Спивак, 2007];
- механических деформаций околоскважинного пространства и конструкций боевой скважины под действием ударной волны при взрыве;
- формирования столба обрушения под действием силы тяжести и «всплывания» подземных полостей [Машуков и др., 1997];

- процессов выветривания и разрушения цементных пробок в боевой скважине и коррозии металлических конструкций скважины в поствзрывной период;
- деградации многолетнемерзлых пород под тепловым воздействием взрыва и последствий изменения температурного режима в механически разрушенных породах.

В силу вертикальности стволов боевых скважин и субгоризонтальной поверхности земли устье боевой скважины и эпицентры камуфлетных МПЯВ, рассматриваемых в данной работе, практически совпадают. Первые исследования на объектах «Нева-1» и «Вятка» [Ковалев, Ложников, 2004] выявили концентрическое строение «ослабленных» зон вокруг устьев боевых скважин по закономерному-концентрическому распределению плотности потоков радона. Выявленное концентрическое строение ослабленной зоны вокруг боевой скважины вполне ожидаемо: ударная волна от точечного источника при отражении от субгоризонтальной дневной поверхности в условиях горизонтально-слоистой (плоско-однородной) геологической среды приводит к формированию концентрической откольной зоны вокруг устья боевой скважины.

К сожалению, нам недоступна информация о реальных размерах зон разрушения геологической среды, полученная при попытках вскрытия боевых скважин (табл.18). Со времени проведения взрывов добыча углеводородов из осинского продуктивного горизонта не велась (за исключением опытных откачек из разведочных скважин, и единственной опытной откачки из боевой скважины объекта «Нева-3» и обратной закачки полученных флюидов в подземную емкость объекта «Нева-4» в 1989 г.). Полость взрыва ПЯВ «Нева-4» не использовалась по назначению, согласно расчетов, она вероятнее всего обвалилась из-за пластичного наплыва солей.

#### **4.6. ВЫВОДЫ**

1. Размеры зон разрушения вмещающих пород, в основном, зависят от мощности взрыва (в 1/3 степени согласно эмпирических формул [Адушкин, Спивак, 2007]), а камуфлетность взрыва зависит от глубины и мощности взрыва.

2. Первый в Якутии ПЯВ «Кристалл» (02.10.1974 г.) мощностью 1.7 кт в ТЭ был взрывом рыхления – единственным взрывом рыхления в бывшем СССР для создания плотины хвостохранилища. Этот был один из 10-ти ПЯВ, проведенных в многолетнемерзлых породах, ПЯВ «Кратон-3», по предположению, в охлажденных породах, а остальные 8 ПЯВ – ниже криолитозоны.

3. Согласно проведенным расчетам наиболее сильное разрушение вмещающих пород вызвали взрывы «Кратон-3» и «Кратон-4» с мощностью в 22 кт в ТЭ на глубине примерно 577 и 574 м. Наименьшее разрушение, по предположению, вызвал ПЯВ «Нева-4», который был проведен в толще каменной соли, поскольку каменная соль отличается пластичностью,

способностью залечивать трещины, а при взрыве в неупругой среде разрушение породы должно быть существенно меньше.

4. Механическое разрушение горных пород и термическое воздействие ПЯВ привели к формированию вертикальной разуплотненной ослабленной зоны вокруг боевой скважины, состоящей из зоны дробления радиусом до 130 м и зоны трещинообразования радиусов до 200 м вокруг полости взрыва, столбов обрушения высотой до 250 м (возможно, и более м), у поверхности земли – из откольной зоны.

2. Два взрыва «Кристалл» и «Кратон-3» отнесены к аварийным взрывам из-за выхода радиоактивного вещества во время взрыва. Остальные 8 ПЯВ – камуфлетные, проведены в штатном режиме.

## Глава 5. Техногенная флюидопроницаемая геоструктура «ослабленная зона вокруг боевой скважины ПЯВ», как основной проводник радионуклидов на поверхность земли

### 5.1. Проявление ослабленной зоны вокруг боевой скважины на поверхности земли и состояние многолетней мерзлоты.

В эпицентрах камуфлетных взрывов вокруг боевых скважин формируются ослабленные флюидопроницаемые зоны, как результат целого ряда процессов:

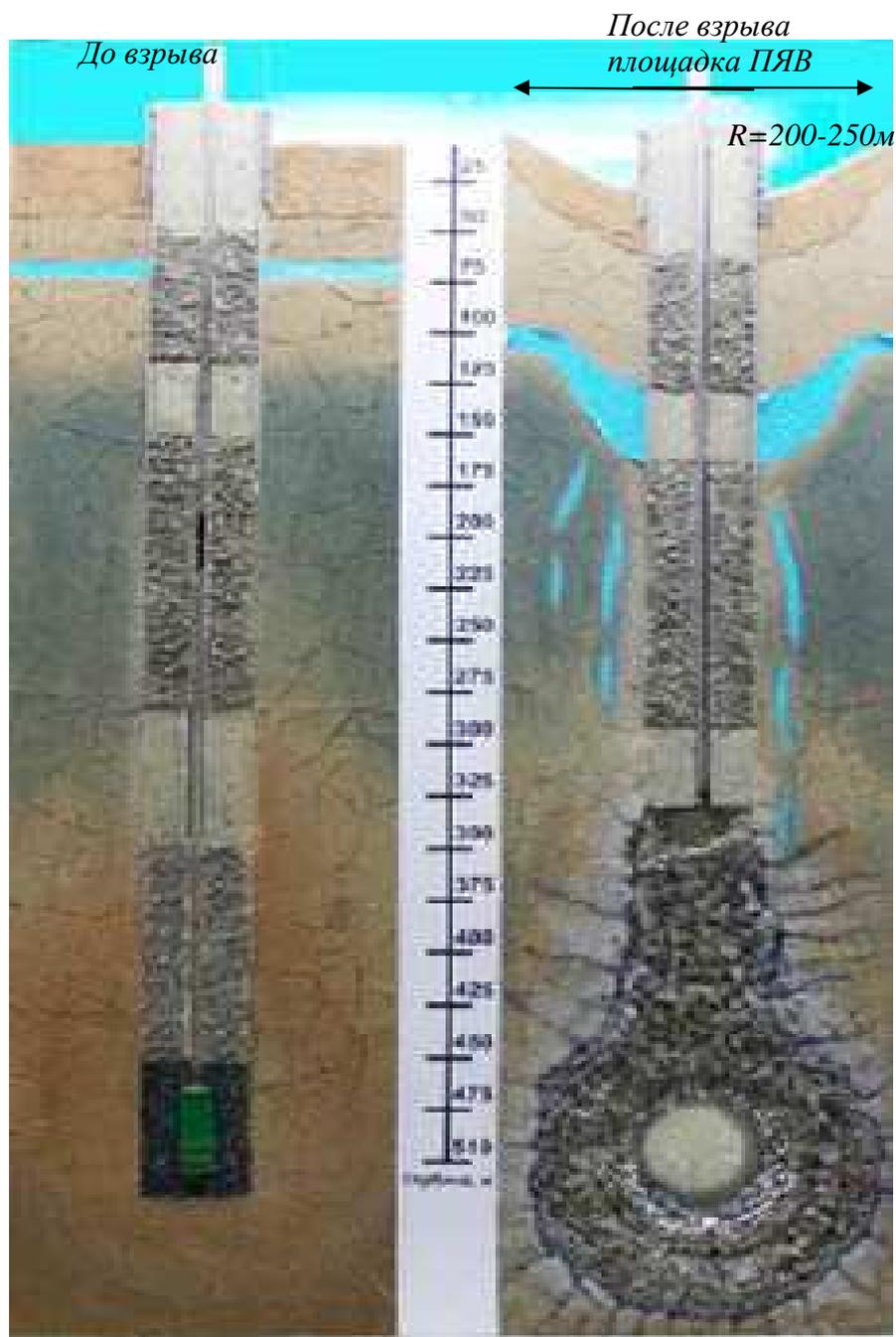
- откола массива пород под действием отраженной волны от границы двух физических сред «порода –воздух» [Адушкин, Спивак, 2007];
- механических деформаций околоскважинного пространства и конструкций боевой скважины под действием ударной волны при взрыве;
- формирования столба обрушения под действием силы тяжести и «всплывания» подземных полостей [Машуков и др., 1997];
- процессов выветривания и разрушения цементных пробок в боевой скважине и коррозии металлических конструкций скважины в поствзрывной период;
- деградации многолетнемерзлых пород под тепловым воздействием взрыва и последствий изменения температурного режима в механически разрушенных породах.

В силу вертикальности стволов боевых скважин и субгоризонтальной поверхности земли устье боевой скважины и эпицентры камуфлетных МПЯВ, рассматриваемых в данной работе, практически совпадают. Территория в пределах зоны откола – в 200-250-метровой округе вокруг устьев боевых скважин, названа *площадкой ПЯВ* (рис. 55).

При ПЯВ при достижении ударной волной границы «литосфера – атмосфера» формируется волна разгрузки, которая направляется обратно от свободной поверхности (сотни мс) и по ходу формирует *столбы обрушения* (секунды-часы), разрушает зону камуфлетности. Волна разгрузки на границе поверхности земли образует *откольную зону* с глубиной разрушений пород  $\approx 10-30 \text{ м/кт}^{1/3}$  (то есть:  $(10-30 \text{ м}) * E^{1/3}$ , где E – мощность взрыва, кт в ТЭ) и радиусом на дневной поверхности  $\approx 150-200 \text{ м/кт}^{1/3}$ . Концентрическая волна приводит к формированию концентрических разрывов в откольной зоне, которые хорошо видны на фото (рис.56).

Высота столба обрушения оценивается в (6-8)  $R_{\text{полости}}$  [Адушкин, Спивак, 2007]. Максимальные разрушения сплошности геологической среды ориентированы в направлении дневной поверхности. При полном камуфлетном взрыве столб обрушения не достигает зоны откола (рис.8, б), тогда как при неполном – эти зоны смыкаются (рис.8, в), что приводит к образованию деформации поверхности эпицентра и к слабому истечению котлового газа.

В условиях криолитозоны важным фактором для возникновения неоднородностей в геологической среде и флюидопроницаемых геоструктур является не только механическое, но термическое воздействие ПЯВ на мерзлоту, приводящее к деградации многолетней мерзлоты. Деградация многолетней мерзлоты проявляется через развитие специфического криогенного рельефа – полигонально- холмистого рельефа (байджарахового) (см.рис.61) .



**Рис.55.** Схема образования ослабленной зоны вокруг боевой скважины после взрыва.



**Рис.56.** Проседание поверхности в пределах ослабленной зоны вокруг боевой скважины после камуфлетного взрыва на осадочных породах Семипалатинского полигона (фото из интернета, видно концентрическое строение разрывов - разуплотнения разрушенных пород)

Натурные наблюдения выявили, что на площадках ПЯВ развит мелко- и крупнопolygonально - холмистый («байджараховый») термокарстовый рельеф. Такой рельеф формируется вследствие вытаивания polygonально-жильных льдов, а в ложбинах между холмов нередко собирается вода (см. рис. 57-60). Около устьев боевых скважин формируются низины с заполненные водой (термокарстовые озера)(рис.57), оборудование скважин деформируется из-за подвижек поверхности земли, понижения уровней земли происходит в результате вытаивания подземных льдов или термокарстовых процессов, как это видно на площадке ПЯВ «Ока» (рис.59). Термокарстовый рельеф ярче выражен в долинах водотоков, сложенных из льдистых рыхлых отложений, как, например, на площадке объекта «Ока», расположенном в заболоченной долине р. Тэлгэспит, на площадке объектов «Кристалл», расположенном на нижнем склоне руч. Улахан-Бысытта и на площадке объекта «Кратон-3» - на нижнем склоне р.Марха соответственно. Механическое разрушение многолетнемерзлых пород под воздействием ПЯВ, по-видимому, способствовало переносу тепла по трещинам как из зоны взрыва, так и привносу атмосферного тепла в летний сезон. Усиление потоков тепла через многолетнемерзлые породы могло дать начало термокарстовым процессам. Равновесие температурного режима льдистых многолетнемерзлых пород отличается низкой устойчивостью [Климовский, Готовцев, 1994],



Рис.57. Вид на полигонально-мелкохолмистую поверхность в пределах ослабленной зоны на объекте ПЯВ «Кристалл» с восточной стороны в июле 2012 г. Мелкополигональный рельеф с грязевыми медальонами по центру полигонов.



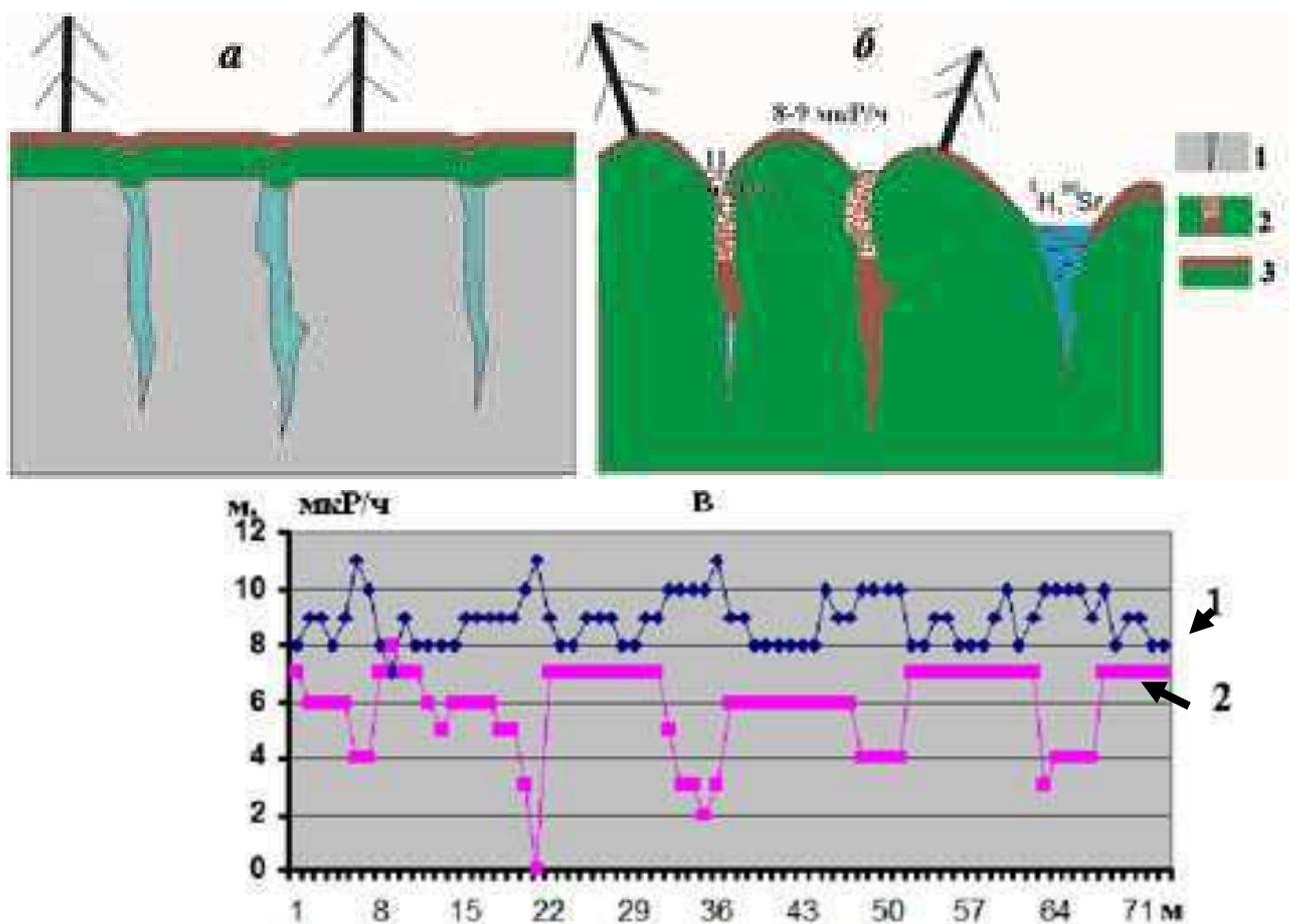
Рис.58. Полигонально-холмистый рельеф около устья аварийного ПЯВ «Кратон-3» (фото с интернет-ресурсов, 1993 г., фото Рамзаева . Слева от устья боевой скважины – термокарстовое озеро.



Рис.59. Боевая и разведочная скважины ПЯВ «Ока» (2010 г.)



Рис.60. Вид на крупно-полигонально-холмистый рельеф площадки ПЯВ «Ока». Наверху (а) видна боевая скважина, по центру – остатки оборудования (металлолом).



**Рис.61.** Формирование полигонально-холмистого рельефа (а, б) на площадках ПЯВ. Условные обозначения: 1 – полигонально-жильные льды в многолетнемерзлых породах; 2 – заполнение трещин и ложбин мелкоземом и водой в сезонно-талом горизонте; 3 – сезонно-талый слой (сверху почвенный покров). Мощность экспозиционной дозы  $\gamma$ -излучения на термокарстовой поверхности, мкР/ч (1), перепады рельефа относительно отметки устья боевой скважины, м (2)

и даже небольшое воздействие может привести к началу необратимых процессов деградации многолетней мерзлоты. Уничтожение привычного ландшафта (растительности и почвенного покрова) на площадке ПЯВ, изменившего альбедо поверхности, также могло стать дополнительным фактором, способствующим деградации мерзлоты [Качурин, 1961, Климовский и др., 2002]. Радиометрическая съемка площадки ПЯВ «Ока» показала повышение мощности экспозиционной дозы  $\gamma$ -излучения в сухих ложбинах между участками (рис.61, в). Сделано предположение, вытаивание полигонально-жильных льдов формирует флюидопроницаемую сеть в многолетнемерзлых породах, открывая путь для эманации подземных газов и просачиванию подмерзлотных подземных вод.



Рис. 3. Схема корреляции аномалий ППР. Участок «Вятка» (скв. 43)

**Рис. 62.** Концентрическое распределение аномалий плотности потока радона (мБк/м<sup>2</sup>·с) на площадке ПЯВ «Вятка»

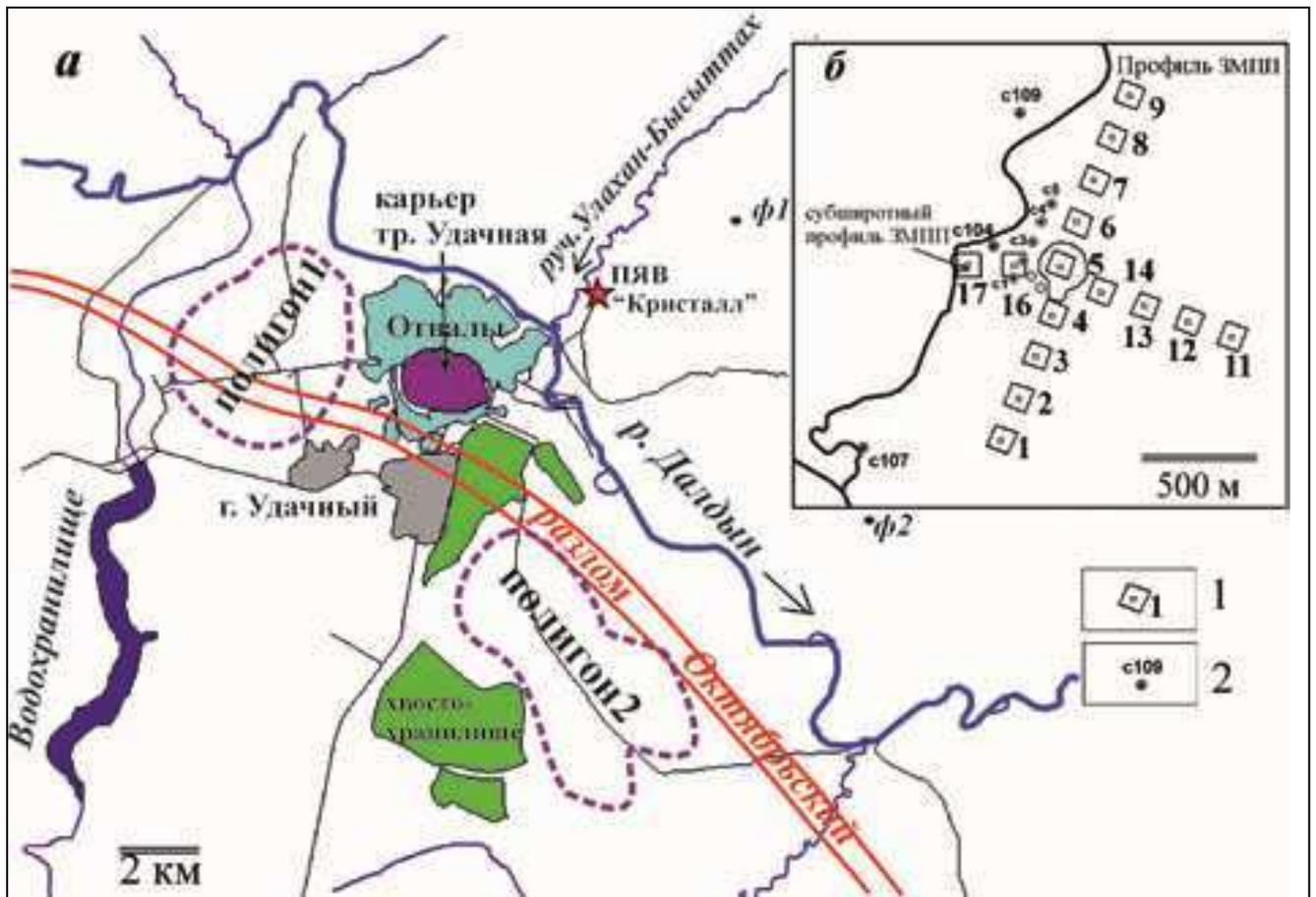
Ослабленная зона вокруг боевых скважин имеет концентрическое строение: как разуплотнение пород, так и деградация мерзлоты по этим зонам. Данное предположение подтверждается данными исследователей [Ковалев, Ложников, 2004]: выявлено, закономерно-концентрическое распределение плотности потоков радона вокруг боевой скважины ПЯВ «Вятка»(рис.62). Это вполне объяснимо: ударная волна от точечного источника при отражении от собгоризонтальной дневной поверхности в условиях горизонтально-слоистой (плоско-однородной) геологической среды приводит к формированию концентрической откольной зоны вокруг устья боевой скважины.

## 5.2. Ослабленная зона вокруг боевой скважины на примере ПЯВ «Кристалл» по данным геофизического зондирования методом переходных процессов

Зондирование методом переходных процессов (ЗМПП) поставлено по двум взаимно-перпендикулярным профилям, проходящим через эпицентр взрыва – пикет 5 (рис. 63). Субмеридиональный профиль 1 (пикеты 1–9) ориентирован по азимуту 16°. Субширотный профиль 2 (пикеты 11–17) состоит из двух участков – короткого (пикеты 5, 16, 17) с азимутом 83° и более длинного (пикеты 11–14) с азимутом 103°. Измерения переходных характеристик выполнены симметричной квадратной установкой «петля в петле». Размер генераторной петли из медного провода с сечением 6 мм<sup>2</sup> составлял 100×100 м, приемной с сечением 1 мм<sup>2</sup> – 50×50 м. Среднее расстояние разбежки между пикетами составляло 100 м. На пикете №5, расположенном над саркофагом ПЯВ «Кристалл» проводилось 3-кратное измерение в разные дни полевых работ, результаты ЗМПП при этом совпали.

*Субмеридиональный профиль 1.* Кривые кажущегося удельного сопротивления  $\rho_{\tau}$ , измеренные на субмеридиональном профиле показаны на рис.64, а. Кривые всех пикетов, кроме пикета 5, и немного пикета 6, совпадают, что свидетельствует о преимущественно однородном геоэлектрическом строении местной геологической среды. Кривые  $\rho_{\tau}$  на пикете 5 (в эпицентре взрыва) и на пикете 6 (в 100 м севернее от эпицентра) могут быть классифицированы как аномальные. На ранних временах регистрации ( $t < 3$  мс) кривая  $\rho_{\tau}$  пикета 5 не отличается от остальных, т.е. верхняя часть геологической среды здесь похожа на верхнюю часть на прочих пикетах профиля. Однако на поздних временах ( $t > 5$  мс) наблюдается значительное понижение значений кривой  $\rho_{\tau}$ , что указывает на глубоководную высокопроводящую геоэлектрическую аномалию.

В 100 м севернее от эпицентра взрыва на пикете 6, наоборот, на ранних временах от 0.2 до 1 мс отмечается небольшое понижение, а на средних временах от 10 до 12 мс – повышение значений  $\rho_{\tau}$  по сравнению с нормальными кривыми. На поздних временах ( $t \geq 12.5$  мс) кривая  $\rho_{\tau}$  сливается с фоновыми, или нормальными. Это указывает на то, что на участке пикета 6 верхняя часть геологической среды более проводящая и (или) меньше мощность слоя с высоким УЭС. Для средних глубин характерны породы с более высоким УЭС по сравнению с породами соответствующих глубин на флангах профиля. Эти выводы подтверждаются результатами инверсии – решения обратной задачи - данных ЗМПП и построения соответствующей геоэлектрической модели среды. Примеры инверсии данных зондирования для пикетов 3 и 5 показаны на рис.65.

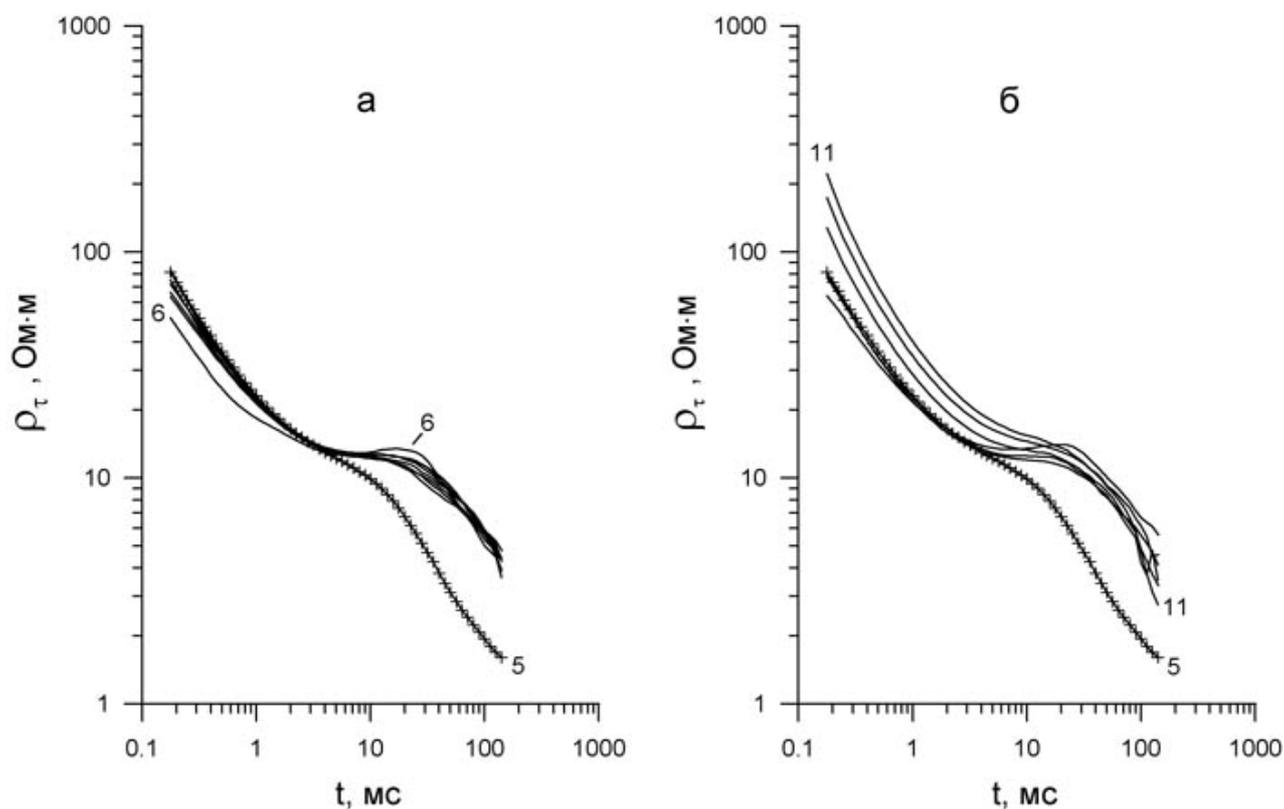


**Рис.63.** Положение ПЯВ «Кристалл» в окрестностях г. Удачный (на основе космоснимка Landcat 2001 г.)(а), и схема ЗМПП на объекте ПЯВ «Кристалл»(б).

Условные обозначения: 1 - генераторные петли пикетов ЗМПП, 2- наблюдательные скважины.

Примечание: полигон 1, полигон 2 – границы полигонов подземного захоронения рассолов (1 - Октябрьский; 2- Киэнгский),  $\phi 1$ ,  $\phi 2$  – фоновые участки

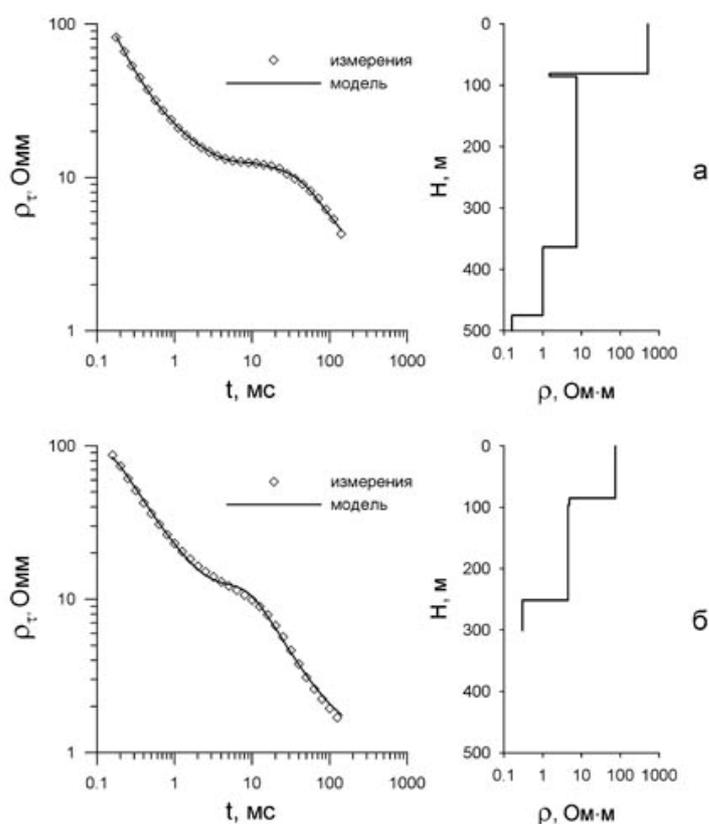
На каждом пикете верхний слой имеет мощность  $h_1$  от 70 до 130 м и сопротивление  $\rho_1$  в диапазоне от 50 до 120 Ом·м, причем в целом УЭС слоя повышается в направлении с севера на юг. На пикете 3 наблюдается участок с наиболее высоким сопротивлением в 514 Ом·м. Ниже выделяется слой с низким УЭС  $\rho_2 = 1.5-5.8$  Ом·м, мощность которого вырастает на южном фланге профиля с 4.95 до 58.6 м. Добавление в модель среды этого маломощного второго слоя улучшает качество подбора, т.е. уменьшает среднеквадратичное расхождение между измеренными и модельными переходными характеристиками (рис.65, а). Третий слой имеет удельное сопротивление  $\rho_3$  от 7.5 до 9.1 Ом·м и мощность  $h_3 = 211 - 360$  м (за исключением пикета П5). Ниже залегает высокопроводящий четвертый слой,  $\rho_4 = 0.7 - 4.5$  Ом·м, за исключением П6, где аномально высокое сопротивление в 28.8 Ом·м. Основание характеризуется низким электрическим сопротивлением 0.16-1.2 Ом·м.



**Рис.64.** Кривые кажущегося удельного сопротивления  $\rho_{\tau}$ , измеренные на субмеридиональном (а) и субширотном (б) профилях на объекте ПЯВ «Кристалл». Цифры у кривых соответствуют номерам пикетов на рис. 63.

*Субширотный профиль 2.* Данные по этому профилю схожи с данными 1-го профиля (рис.64, б), т.е. в субширотном направлении проявляется та же закономерность, что и на профиле 1: под эпицентром взрыва также наблюдается аномальная четырехслойность, по флангам профиля наблюдается та же пятислойная структура (табл.23).

Нормальный геоэлектрический разрез фланговых частей профиля (без учета центральной части) соответствует горизонтально-слоистой модели с верхним слоем с большим УЭС, нижними двумя проводящими слоями, между которыми расположен плохопроводящий слой, и всё это подстилает очень высокопроводящее основание.



**Рис.65.** Кривые кажущегося удельного сопротивления (слева) и геоэлектрические модели (справа) на объекте «Кристалл»: *а* – на фланге субмеридионального профиля – в 400 м южнее от эпицентра ПЯВ (пикет 3), *б* – в эпицентре (пикет 5).

**Таблица 25. Мощности (м) и удельные электрические сопротивления пород (Ом·м) (в скобках) по результатам ЗМПШ района ПЯВ «Кристалл»**

Пикет	Н	Л1 ( $\rho_1$ )	С1 ( $\rho_3$ )	Л3 ( $\rho_4$ )	С2 ( $\rho_5$ )	С3 ( $\rho_6$ )
<b>Субмеридиональный (I) профиль</b>						
П1	317.8	80 ( <b>110</b> )	39 (5.3)	240 (8.5)	91.1 (4.3)	(1.2)
П2	315.5	77 ( <b>120</b> )	59 (5.8)	210 (8.3)	126 (1.45)	(0.25)
П3	318.3	81 ( <b>510</b> )	5.0 (1.5)	280 (7.6)	111 (1.0)	(0.16)
П4	306.5	82 ( <b>82</b> )	13.9 (3.5)	285 (7.5)	111 (1.1)	(0.42)
П5 *	314.0	85 (74)	11.3 (5.0)	155 (4.5)		(0.3)
П6	304.5	69 (56)	10.4 (3.3)	320 (9.1)	43.4 (29)	(0.4)
П7	302.5	94 (57)	6.6 (1.6)	350 (8.3)	12.4 (1.3)	(0.51)
П8	302.5	90 (54)	9.4 (2.3)	360 (8.6)	(0.8)	
П9	300.8	87 (53)	8.9 (2.4)	360 (8.6)	(0.7)	
<b>Субширотный (II) профиль</b>						
П11	348.3	131 ( <b>690</b> )	6.5 (1.5)	330 (8.2)	(1.2)	(1.2)
П12	345.0	119 ( <b>340</b> )	6 (1.4)	360 (8.4)	(1.4)	
П13	328.5	106 ( <b>180</b> )	4.6 (1.2)	350 (7.8)	(0.9)	
П14	317.0	86 ( <b>82</b> )	17.7 (3.6)	340 (8.2)	(0.8)	
П5 *	314.0	74 ( <b>98</b> )	25.9(8.2)	152 (4.3)		(0.3)
П16	289.3	92 (52)	6.4 (1.6)	400 (10)	5.3 (2.4)	(0.7)
П17	283.8	93 (66)	5 (1.2)	340 (7.8)	14.1 (1.7)	(0.7)

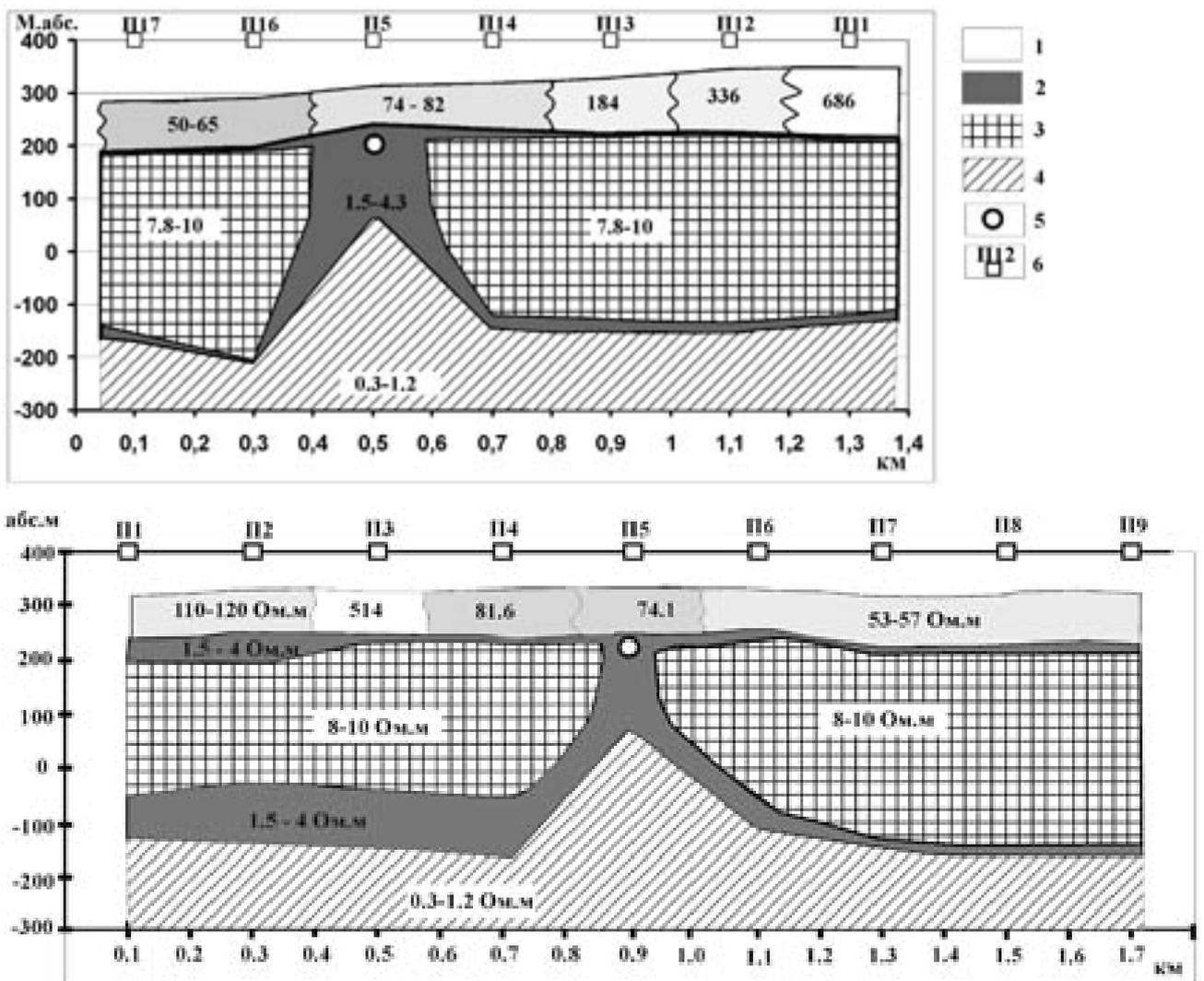
*Примечание:* Н – высота над уровнем моря, абс.м. Л1 – многолетнемерзлые породы с тальми участками; С1 – верхнекембрийский водоносный горизонт с рассолами; Л3 – слой морозных верхнекембрийских пород; С2 – I среднекембрийский водоносный горизонт с рассолами, С3 – сильнопроводящая основная часть I среднекембрийского водоносного горизонта. \* - пикет ЗМПШ в эпицентре взрыва.

Обсуждение результатов: геологическое строение района и его отражение в результатах ЗМПП. Для каждой экспериментально измеренной ЗМПП кривой  $\rho_{\tau}(t)$  подобрана максимально совпадающая с ней модельная кривая  $\rho_{\tau}(t)$ , формируемая определенными геоэлектрическими слоями с заданными значениями удельного электрического сопротивления, мощностью и в определенной последовательности. Эти слои путем интерполяции были скоррелированы между пикетами обоих профилей и соотнесены с реальными геологическими слоями в соответствии с нашим представлением о строении геологической среды района (рис.64, 66 табл. 25). Инверсия данных ЗМПП проводилась хорошо совпала с детальным геологическим строением района (для чистоты эксперимента). Как нельзя хорошее совпадение полученной геоэлектрической модели с реальными геологическими (криолитологическими, гидрогеологическими) параметрами среды, основанными на данных скважин и разреза на карьере кимберлитовой трубки «Удачная» [Кобылкина, 2005, Микуленко и др, 2006; Алексеев, 2009] является верификацией модели автора и показывает достоверность разработанной модели объекта ПЯВ и вмещающей геологической среды.

В начале рассмотрим фланговые части профилей ЗМПП, принимая их за нормальные геоэлектрические модели верхней части геологического разреза района, не затрагивая их центральные части у эпицентра ПЯВ. На флангах обоих профилей геоэлектрическая модель состоит из 4 слоев: верхнего слоя с высоким электросопротивлением, двух высокопроводящих слоев, между которыми расположен слабо проводящий слой большой мощности – до 400 м, и все эти слои подстилаются очень высокопроводящим основанием (рис.66). Верхний слой с наиболее высокими значениями удельного электрического сопротивления  $\rho_1$  52–690 Ом·м интерпретирован, как слой многолетнемерзлых пород (ММП), и соответствует справочным данным [СП11-105-97, 2004] для суглинистых пород, что соотносится с составом местных горных пород - глинистых известняков и доломитов. Мощность ( $h$ ) этого слоя ММП выдержанная – среднее  $h_{1cp}$  – 84 м при среднем  $\rho_{1cp}$  – 76 Ом·м. На приводораздельных ландшафтах УЭС около 180 - 690 Ом·м, что указывает на сохранность многолетней мерзлоты с температурами -2--6° С [там же]. По мере приближения к эпицентром взрыва на нижнем склоне руч. Улахан-Бысыттах УЭС пород снижаются примерно на 1 порядок (особенно в 100 -200 м севернее от устья скважины на пикете №6) до 52-98 Ом·мс температурой пород около 0° С – становятся влажными, потому лучше проводят электрический ток.

Допущение маломощного высокопроводящего слоя под слоем ММП с математических соображений оказалось совершенно не случайным, а отвечающим

реальному строению местной геологической среды: слой с  $\rho_2$  1.2 – 5.8 Ом·м,  $\rho_{2cp}=3.1$  Ом·м,  $h_{2cp} = 14$  м отнесен нами к верхнекембрийскому водоносному горизонту и обозначен как С-1 (табл.25). Водоносный горизонт С-1 по результатам ЗМПП находится на уровне 190-200 абс. м, и эти уровни практически совпадают с измеренными гидрогеологическими уровнями подземных вод в скважинах [Климовский, Готовцев, 1994, Кобылкина, 2005, Алексеев, 2009] (рис.66). В слое С-1 наблюдается прямая корреляция между  $h_2$  и  $\rho_2$ : чем больше мощность слоя, тем больше электросопротивление пород, коэффициент корреляции составляет 0.91. Возможно, при увеличении мощности горизонта С-1 снижается его удельная водонасыщенность, приводящая к некоторому росту электрического сопротивления в слое. По данным ЗМПП в 600-800 м к югу от эпицентра взрыва (пикеты 1 и 2, рис.66, табл.25)



**Рис.66.** Геоэлектрическая модель района ПЯВ «Кристалл» по данным ЗМПП. Условные обозначения: 1 – верхний слой Л1 (от светло-серого до белого) – многолетнемерзлые породы с УЭС от 52 до 690 Ом·м (чем светлее тем выше УЭС); 2 – подземные водоносные горизонты С-1 наверху и С-2 внизу с низкими УЭС; 3 – слой морозных пород Л3; 4 – нижнее высокопроводящее основание С-3; 5 – полость взрыва; 6 – пикет ЗМПП и его номер.

мощность горизонта С-1 увеличивается, что согласуется с реальными измеренными гидрогеологическими данными скважин. Оценим соответствие УЭС  $\rho_2$  слоя С-1 минерализации вод верхнекембрийского водоносного горизонта. Как известно [Кобранова,1986], удельное электрическое сопротивление водонасыщенных осадочных пород  $\rho_{\Pi}$  связано с их пористостью  $k_{\Pi}$  (в долях единицы) и удельным сопротивлением воды  $\rho_e$ , насыщающей породу, соотношением (формула Арчи):  $\rho_{\Pi} = a \frac{\rho_e}{k_{\Pi}^m}$ , где  $a \cong 1$ ,  $m$  (показатель цементации) – константа, определяемая экспериментально. Для хорошо сцементированных терригенных и карбонатных пород с межзерновой пористостью  $m=2$ , а в трещиноватых породах  $m$  можно приравнять к 1. Приняв в качестве вероятной оценки пористости карбонатных пород величину  $k_{\Pi} = 0.1$ , при  $\rho_{2cp} = 3.1$  Ом·м получаем, что сопротивление воды, насыщающей породы слоя С-1, должно составлять 0.31 Ом·м. Минерализация водных растворов с таким сопротивлением при температурах порядка 0°C (при пересчете на NaCl) составляет примерно 45-50 г/дм<sup>3</sup>, что в целом согласуется с данными гидрогеохимического опробования скважин.

Ниже С-1 расположен слабопроводящий геоэлектрический слой ЛЗ (табл.25) со средним  $\rho_{3cp} = 8.35$  Ом·м и  $h_{3cp} = 323$  м, и судя по интервалу глубин и геоэлектрических свойств пород слоя, он соответствует морозным глинистым известнякам и доломитам мархинской свиты (см. рис.18). Удельное электрическое сопротивление  $\rho_3$  на порядок меньше, чем  $\rho_1$  (МПП), но в 3-7 раза больше  $\rho_2$  (С-1), и потому породы этого слоя занимают промежуточное положение по своим геоэлектрическим свойствам. Мощность слоя ЛЗ, как и его удельное электрическое сопротивление на флангах профилей ЗМПП выдержанная.

Ниже слоя ЛЗ выявлен высокопроводящий геоэлектрический слой С-2 (табл.25) со средним  $\rho_{4cp} = 1.86$  Ом·м. Мощность слоя С-2  $h_4$  в субширотном профиле 2 составляет всего несколько метров, тогда как в субмеридиональном профиле 1 его мощность увеличивается на южном фланге до 126 м. Судя по интервалу глубин и геоэлектрических свойств пород слоя, С-2 соответствует верхней части I среднекембрийского водоносного горизонта криопэгов и рассолов в кавернозно-поровых коллекторах известняково-доломитовой пачки среднего кембрия (см. рис.18). Методом ЗМПП ниже слоя С-2 усматривается очень сильнопроводящее основание со средним  $\rho_{5cp} = 0.56$  Ом·м, которое как раз является основной частью кавернозно-поровых коллекторов I среднекембрийского водоносного горизонта. Общая мощность С-2 и С-3 методом ЗМПП не определена, но уровни С-2 и С-3 соответствуют измеренным гидрогеологическим данным скважин (см. рис.18, 6б). Данное совпадение геоэлектрической модели строения геологической среды по данным фланговых частей профилей ЗМПП с гидрогеологическими уровнями, выявленными в скважинах

района, указывает на верную интерпретацию измеренных геоэлектрических данных и адекватность разработанной на их основе геоэлектрической модели.

Внутри I среднекембрийского водоносного горизонта с глубиной электросопротивление пород  $\rho$  уменьшается, т.е. электропроводимость возрастает: она в С-3 в 3.3 раза выше, чем в С-2. А электропроводимость С-3 в 4.7 раза выше электропроводимости верхнекембрийского водоносного горизонта С-1:  $\rho_{2cp} = 3.1 > \rho_{4cp} = 1.86 \gg \rho_{5cp} = 0.56$  Ом·м (табл.25). Этот факт также согласуется с опубликованными данными о возрастании минерализации подземных вод с 90 г/дм<sup>3</sup> в С-1 до 300 г/дм<sup>3</sup> в С-3 и большей водообильности среднекембрийского водоносного горизонта по сравнению с верхнекембрийским [Алексеев, 2009, Климовский, Готовцев, 1994, Микуленко и др., 2006].

Среднее сопротивление I среднекембрийского водоносного горизонта составляет  $\rho_{5cp} = 0.56$ . Столь высокую электропроводность можно объяснить насыщенностью высокоминерализованными растворами. Известно, что для плотных сцементированных пород, содержащих трещины либо другие «прямые» каналы, величина  $m$  существенно меньше двух (в пределе  $m \rightarrow 1$ ), т.е. значения, характерного для таких пород в отсутствие трещин. Если принять  $m = 1$ , то при  $k_{п} = 0.1$   $\rho_{вср} = 0.056$  Ом·м. При температурах ниже 0°C соответствуют концентрациям рассолов NaCl порядка несколько сотен г/л, что вполне близко к реальным измеренным данным минерализации рассолов этого водоносного горизонта. Тот факт, что для разумной интерпретации данных ЗМПП необходим показатель цементации, близкий к единице, косвенным образом свидетельствует о том, что для среднекембрийского водоносного комплекса характерен кавернозно-поровый тип коллекторов.

Для начала рассмотрим изменения слоя многолетнемерзлых пород. В 1990 году в эпицентре взрыва было обнаружено термокарстовое озеро диаметром 60 м и глубиной до 6 м [Бурцев, Колодезникова, 1993], свидетельствующее о возникновении талика над местом взрыва. В результатах ЗМПП можно увидеть лишь слабые следы деградации слоя ММП:

- кривая  $\rho_{\tau}$  на пикете 6 указывает на снижение мощности ММП на ~ 20% по сравнению  $h_{1cp}$  – до 68.8 м в 100 м к северу от саркофага (табл.25).

- в субширотном профиле на центральных пикетах 5 и 14 явно видно относительное снижение мощности ММП по сравнению с его флангами и повышение ~ на 20 м кровли нижезалегающего верхнекембрийского водоносного горизонта С-2 (см. рис.66, табл.25). Возможно, отсыпка озера пустой породой в 1992 и 2006 гг. и формирование саркофага мощностью до 20 м в условиях резкоконтинентального климата оказались достаточными для восстановления мерзлоты в эпицентре взрыва, что согласуется с результатами

моделирования воздействия курганов на наращивание мерзлоты за счет поднятия сезонно-талого слоя [Киселев и др., 2004, Пантелеев и др., 1991].

Северо-западнее от саркофага – в сторону руч. Улахан-Бысыттах сопротивление ММП  $\rho_1$  снижается ~ 25 % от среднего  $\rho_{1\text{ср}}$ , или до 50-56 Ом·м при сохранении мощности  $h_1$  ~ 90 м. В субширотном профиле наблюдается постепенное увеличение  $h_1$  с 90 до 130 м и одновременное увеличение электросопротивления  $\rho_1$  в 14 раз – от 51.5 до 686 Ом·м от долины руч. Улахан-Бысыттах к водораздельному склону (см. рис.66). В качестве вероятной причины этих трендов  $\rho_1$  и  $h_1$  можно предположить хорошую сохранность мерзлоты в приводораздельных ландшафтах и ее деградацию у эпицентра ПЯВ в долине руч. Улахан-Бысыттах.

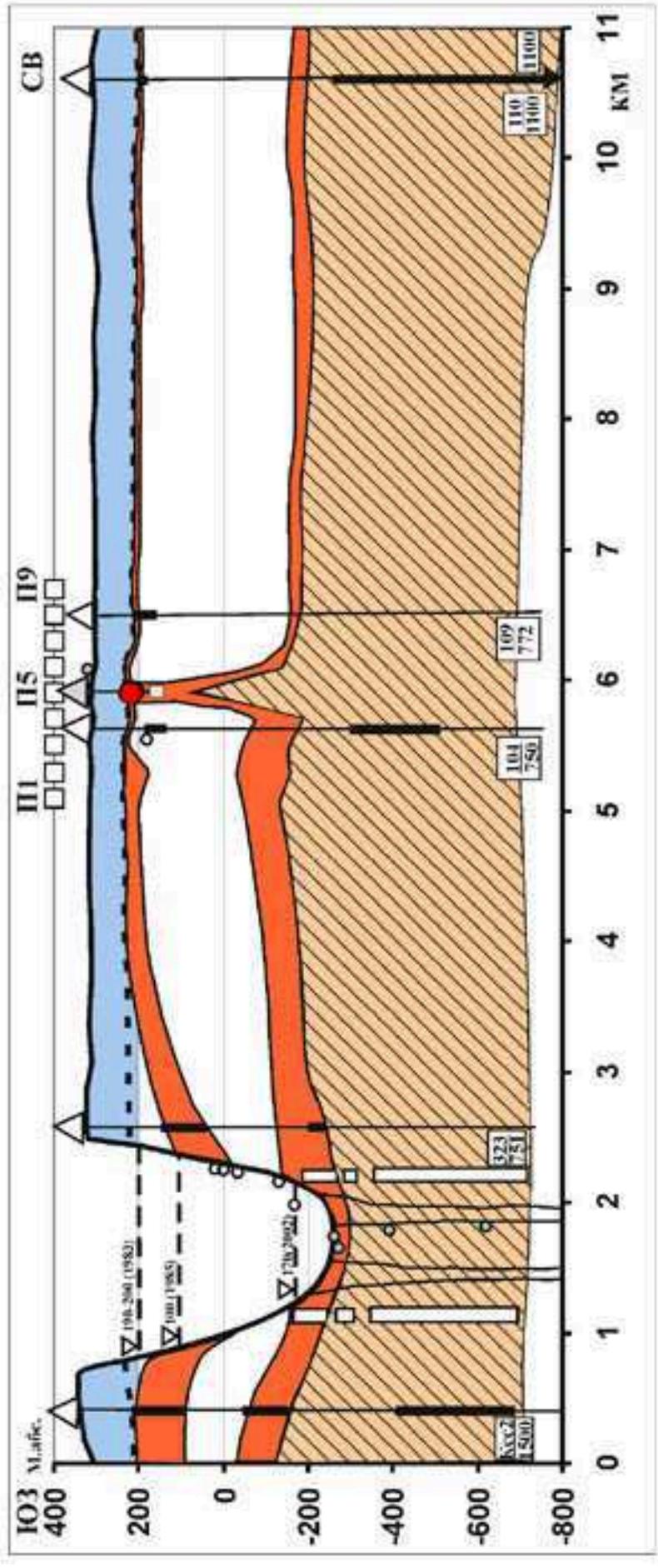
Рассмотрим сейчас центральные части наших профилей ЗМПП. Здесь выявляется аномальное распределение электросопротивления в геоэлектрическом разрезе (рис.66, табл.25). На глубине наблюдаем поднятие именно уровней I среднекембрийского водоносного горизонта к центру взрыва, а не образование линзы в верхнекембрийском водоносном горизонте у обрушенной полости взрыва, поскольку глубинным породам на пикете 5 присущи такие низкие значения УЭС, создаваемые только рассолами с минерализацией ~ 300 г/л, соответствующими метаморфизованным рассолам среднекембрийского водоносного горизонта. Скачок уровней составляет для слоя С-2 – 300 м и более, для С-3 – 200-260 м, что вполне допустимо при появлении ослабленных (трещиноватых) зон в породах вследствие ПЯВ и существующем в I среднекембрийском водоносном горизонте напоре над кровлей – 360 - 730 м [Алексеев, 2009]. По-видимому, взрыв рыхления «Кристалл» привел к образованию проницаемой геоструктуры не только выше взрыва, но и ниже, по которой произошло просачивание вверх до 300 м напорных подземных рассолов I среднекембрийского водоносного горизонта. После взрыва подземные воды должны были устремиться по вновь возникшим проводящим структурам под действием взрывной волны, в дальнейшем просачивание рассолов по этим путям поддерживалось, по-видимому, градиентом пластовых давлений, также капиллярными, осмотическими силами. Гидрогеологические аномалии, установленные ЗМПП, подтверждаются нашими данными о выходе подземных рассолов на поверхность в пределах ослабленной зоны вокруг боевой скважины или, по-другому, – на площадке ПЯВ (см. ниже). В итоге поднявшиеся по ослабленной зоне вокруг боевой скважины воды этого горизонта в виде купола поднялись до верхнекембрийского водоносного горизонта как раз у центра (полости) взрыва (см. рис.66, 67), что предполагает радиоактивное загрязнение подземных вод и рассолов.

Нас в первую очередь интересуют объемы и зоны изменений в геологической среде под воздействием ПЯВ, а не столько на поверхности. Понятия о камуфлетной полости, зонах смятия и других зонах механического воздействия, возникающих при камуфлетном взрыве [Адушкин, Спивак, 2004, 2007] в нашем случае не применимы из-за близповерхностных условий взрыва, при которых давление в породах при взрыве было намного меньше, но значительно больше свободный выход энергии к поверхности, приведший к большому механическому разрушению приповерхностных пород. По расчетным данным радиус полости взрыва составил 12 м (табл.24), затем полость обрушилась под весом подброшенной взрывом и затем упавшей породы. Вся зона от центра взрыва к поверхности земли была поколото. Зона колотой породы напоминает формой перевернутый конус, основанием которого служит образовавшийся при взрыве холм диаметром  $D=200$  м, а высотой - глубина взрыва ( $H=98$  м). Объем колотой породы можно оценить:  $V = 4/3 \cdot \pi D^2 \cdot H = 1025733 \text{ м}^3$ . Вопрос о размере и форме зоны механического воздействия ПЯВ «Кристалл» в глубину от центра взрыва остается открытым.

Таким образом, необходимо заключить, что с помощью геофизического метода ЗМПП выявлено, что нормальный геоэлектрический разрез участка ПЯВ «Кристалл» соответствует четырехслойной модели с проводящим основанием, который как нельзя хорошо совпал с реальным геологическим разрезом района. Верхний слой с сопротивлением десятки – сотни Ом·м, нижняя граница которого залегает на уровне +190 – +200 абс. м, образован карбонатными многолетнемерзлыми породами верхнего кембрия.

Маломощный второй слой со средним сопротивлением 3.1 Ом·м на глубинах от +200 абс.м до +190 абс.м абс. соответствует маловодному верхнекембрийскому водоносному горизонту со средней минерализацией вод  $\sim 90 \text{ г/дм}^3$ . Третий слой со средним электрическим сопротивлением 8.35 Ом·м и выдержанной средней мощностью 323 м в геологическом отношении истолкован как морозные глинистые известняки и доломиты мархинской свиты верхнего кембрия.

Четвертый высокопроводящий геоэлектрический слой с очень высокопроводящим основанием с удельным сопротивлением 0.2 – 1.2 Ом·м соответствуют I-му среднекембрийскому водоносному горизонту с рассолами с минерализацией до 300 г/л. Размеры геологической среды, на которую непосредственно оказал воздействие ПЯВ «Кристалл», оцениваются от  $\sim 80$  до  $\sim 400$  м в глубину и в  $\sim 200$  м по горизонтали.



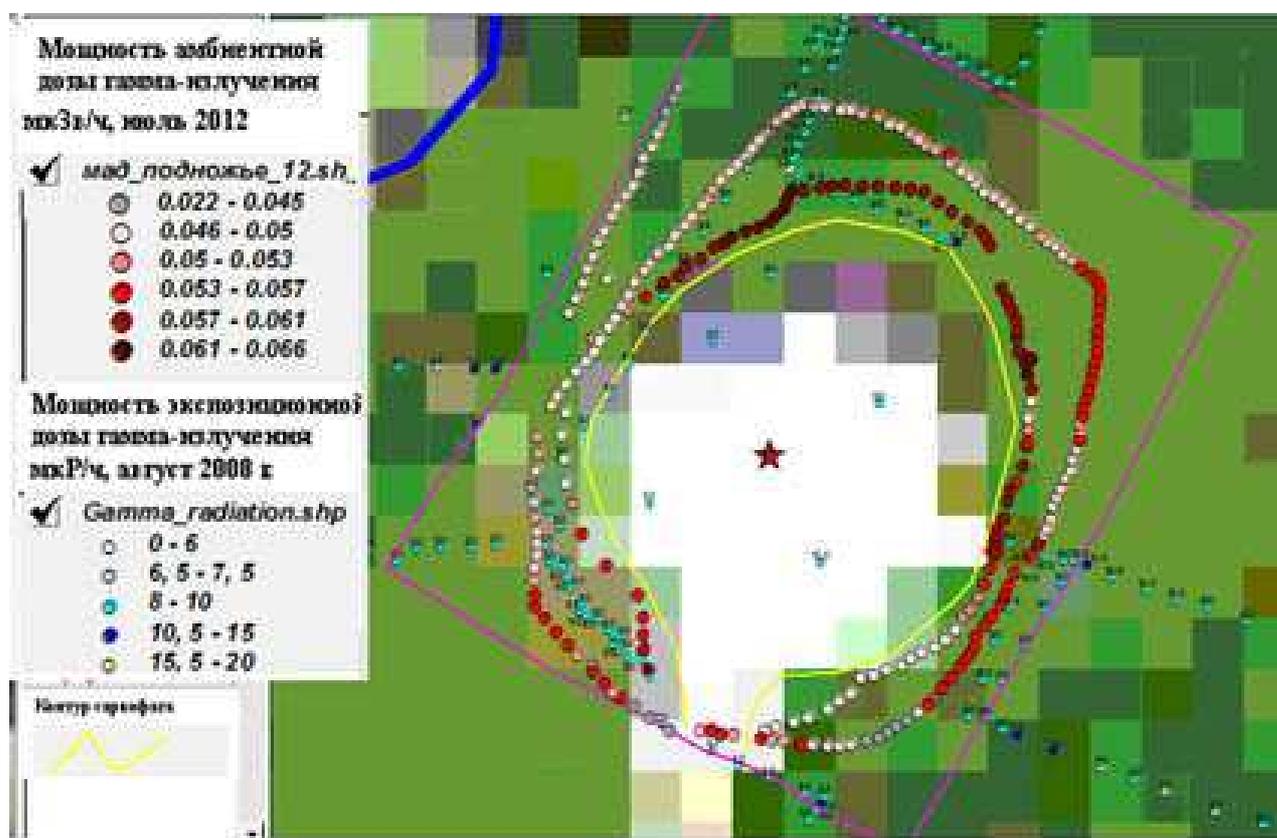
**Рис.67.** Геоэкологическая модель взаимодействия геотехногенных систем ПЯВ «Кристалл» и алмазодобывающего карьера тр. Удачная на основе данных геофизического зондирования ЗМПШ и криолитологических, гидрогеологических, геологических данных бурения и карьера: 1- № пикета ЗМПШ; 2А - устье гидрогеологической скважины; 2Б - устье экспериментальной скважины 1973 г.; 3А - в числителе № скважины, в знаменателе - глубина скважины (м); 3Б - глубина скважины за пределами рисунка (м); 4А - уровень подземных вод в скважинах, измеренные Амакинской ГРЭ в 2004 г. [отчет Амакинской ГРЭ, 2005 г., отв. исп. Кобылкина В.М]; 4Б - уровень подземных вод, измеренные в 1973 г. [отчет ВНИПИПТ, отв. исп. Лопатин В.В., 2001 г.]; 5 - верхнекембрийский водоносный горизонт и верхний слой I-го среднекембрийского водоносного горизонта; 6 - основная часть I-го среднекембрийского водоносного горизонта; 7 - уровни подземных вод по Готовцеву С.П. [Микуленко и др, 2006]; 8 - карьер и рудные корни кимберлитовой трубы; 9А - подошва многолетнемерзлых пород; 9Б - уровень дна карьера в разные годы отработки; 10А - точки отбора водных проб, белые круги - точки отбора водных проб Голубовым Б.Н., Касаткиным В.В. в 2002 г. [Голубов и др., 2004, Касаткин и др., 2004]; 10Б - центр (полость) ядерного взрыва

По результатам экспериментального обследования в СССР и США получено, что практически вся радиоактивность (до 90%) сосредоточена в самой полости взрыва и рядом в радиусе  $R_M=8,5-15 E_{кт}^{1/3}$  м,  $R$  – радиус,  $E_{кт}$  – мощность взрыва в ТЭ [Андрюшин и др., 2000; Адушкин, Спивак, 2004, 2007]. Таким образом, почти вся остаточная радиоактивность должна быть сосредоточена в зоне с радиусом  $\sim 10-17.9$  м, которая после распада короткоживущих изотопов должна быть представлена в основном – тритием, осколочными  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , а также изотопами Pu.

Как же они ведут себя в выявленных условиях геологической среды – деградации слоя многолетнемерзлых пород в эпицентре ПЯВ, формировании ослабленной зоны вокруг боевой скважины, в пределах которой методом зондирования установлена гидрогеологическая аномалия – поднятие верх напорных высокоминерализованных рассолов с 1-го среднекембрийского водоносного горизонта.

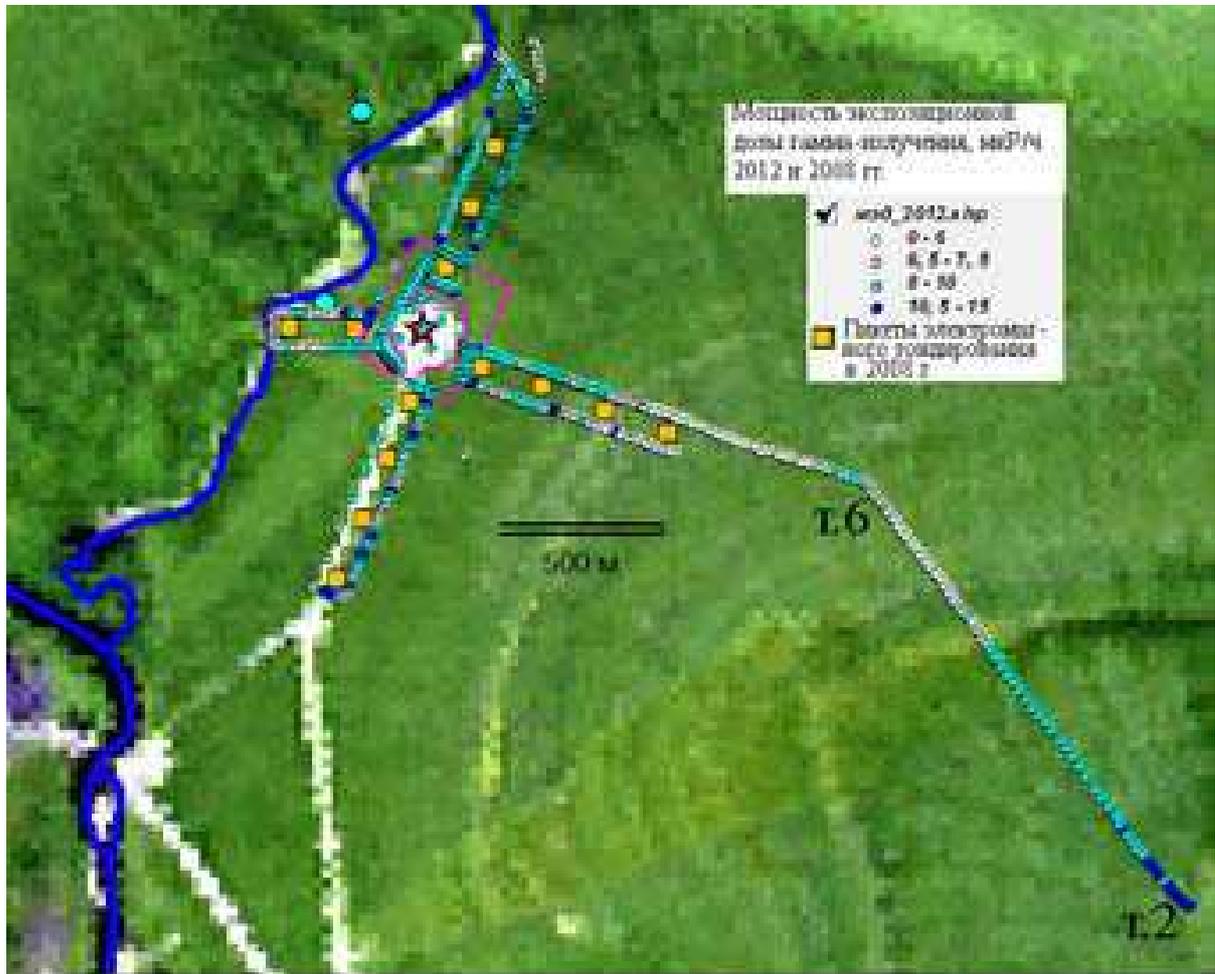
### 5.3. Радиогеохимические индикаторы переноса подземных флюидов по системе «полость взрыва - ослабленная зона вокруг боевой скважины – поверхность земли».

**5.3.1. Площадка ПЯВ «Кристалл»** проведены измерения мощности AMBIENTной дозы  $\gamma$ -излучения земли – всего 165 измерений (рис.68).



**Рис.68.** Распределение мощности AMBIENTной и экспозиционной доз  $\gamma$ -излучения у подножья саркофага объекта «Кристалл», июль 2012 г. Точки измерений географически привязаны с помощью GPS-навигатора.

Средняя мощность амбиентной дозы гамма-излучения (МАД) у поверхности земли равна 0.050 мкЗв/ч при максимальном значении 0.060 мкЗв/ч и минимальном 0.022 мкЗв/ч (рис.68). По краю площадки ПЯВ проведено 167 измерений МАД у поверхности земли: здесь МАД несколько ниже – в среднем 0.047 мкЗв/ч при максимальном значении 0.057 мкЗв/ч и минимальном 0.04 мкЗв/ч..



**Рис.69.** Схема точек отбора проб растительности и почв (коричневые кружки) и проб донных оложений и воды (голубые кружки) в санитарно-защитной зоне объекта «Кристалл» и за его пределами в 2012 г. Римскими цифрами указаны скважины наблюдения. Розовая линия - границы СЗЗ, желтая линия – контуры саркофага объекта «Кристалл» (из ГИС- базы данных, основа космоснимок Landsat, точки проботбора и полевых измерений мощности экспозиционной доз  $\gamma$ -излучения географически привязаны с помощью GPS-навигатора).

**Таблица 26.** Плотность поверхностного радиоактивного загрязнения района объекта «Кристалл», июль 2012 г. (отн. погрешность < 10 %)

	<b>Cs-137</b>	<b>Sr-90</b>	<b>Pu-239,240</b>	<b>Am-241</b>
	<b>Бк/м<sup>2</sup></b>	<b>Бк/м<sup>2</sup></b>	<b>Бк/м<sup>2</sup></b>	<b>Бк/м<sup>2</sup></b>
<b>водораздел, в 3 км к юго-востоку от объекта "Кристалл"(рис.63) МЭД = 11 мкР/ч</b>				
мох т.2	75	162	0.93	нпо
ягель т.2	67	7	0.53	0.267
почвы т. 2 ( 0-5 см)	<b>1010</b>	661	34	нпо
почвы т. 2 (5-10 см)	90	411	6.3	нпо
<b>склон, в 1.4 км к востоку от объекта "Кристалл" (рис.63) МЭД = 7 мкР/ч</b>				
мох, т.6	37	108	1.1	0.838
ягель, т.6	330	10	2.6	2.17
Почвы, т.6 (0-5 см)	460	339	20.5	13.9
Почвы, т.6 (5-10 см)	51	361	16	27
<b>санитарно-защитная зона объекта "Кристалл" (рис.69)</b>				
<b>почвы, т.51 (0-5 см) «грязевой медальон» МАД =0.061 мкЗв/ч</b>	163	628	13.1	нпо
мох, т.80, МАД =0.057 мкЗв/ч	60	90	2.31	1.06
ягель, т.80	25	140	1.14	0.766
<b>Почвы, т.80 (0-5 см)</b>	150	333	19.5	нпо
<b>Почвы, т.89 (0-5 см) МАД =0.063 мкЗв/ч</b>	837	627	<b>1010</b>	157
<b>Почвы, т.89 (5-10 см)</b>	840	752	785	98
ягель, т.82 МАД =0.049 мкЗв/ч	292	26	10.6	нпо
<b>Почвы, т.85 (0-5 см) МАД =0.049 мкЗв/ч</b>	106	287	3.96	нпо

НПО – ниже предела обнаружения, Точки отбора проб см. рис. 69

**Таблица 27.** Содержание радионуклидов в почвах, растительности и донных отложениях района объекта ПЯВ «Кристалл» по результатам ВПГС (отн. погрешность < 10 %)

	<b>U</b>	<b>Th</b>	<b>K</b>	<b>Cs-137</b>	<b>Sr-90</b>	<b>Am-241</b>
	<b>г/т</b>	<b>г/т</b>	<b>% вес</b>	<b>Бк/кг</b>	<b>Бк/кг</b>	<b>Бк/кг</b>
<b>водораздел, в 3 км к юго-востоку от объекта "Кристалл"(рис.9)63 МЭД = 11 мкР/ч</b>						
мох т.2	0.21	0.14	0.52	21.5	47	<0.084
ягель т.2	0.10	0.09	0.26	42.5	4.27	0.17
почвы т. 2 ( 0-5 см)	0.82	0.55	1.66	53.4	35	<0.19
почвы т. 2 (5-10 см)	2.36	1.62	4.23	2.85	13	<0.5
<b>склон, в 1.4 км к востоку от объекта "Кристалл" (рис.) МЭД = 7 мкР/ч</b>						
мох, т.6	0.06	0.06	0.17	23.3	68	0.53
ягель, т.6	0.05	0.03	0.09	98	3.1	0.65
Почвы, т.6 (0-5 см)	1.4	1.3	2.3	60	44.4	1.81
Почвы, т.6 (5-10 см)	1.8	1.7	3.1	<2(1.7)	12	0.90
<b>санитарно-защитная зона объекта "Кристалл" (рис.28)</b>						
<b>почвы, т.51 (0-5 см) «грязевой медальон» МАД =0.061 мкЗв/ч</b>	<b>1.25</b>	<b>1.56</b>	<b>3.06</b>	<b>3.11</b>	<b>12</b>	<b>&lt;0.5</b>
Продолжение таблицы 25.						
	<b>U</b>	<b>Th</b>	<b>K</b>	<b>Cs-137</b>	<b>Sr-90</b>	<b>Am-241</b>
	<b>г/т</b>	<b>г/т</b>	<b>% вес</b>	<b>Бк/кг</b>	<b>Бк/кг</b>	<b>Бк/кг</b>
мох, т.80, МАД =0.057 мкЗв/ч	0.37	0.25	0.44	36	54	0.64
ягель, т.80	0.22	0.23	0.52	23.4	133	0.73
<b>Почвы, т.80 (0-5 см)</b>	<b>1.44</b>	<b>1.59</b>	<b>2.88</b>	<b>5.85</b>	<b>13</b>	<b>&lt;0.5</b>

<b>Продолжение таблицы 27</b>						
<b>Почвы, т.89 (0-5 см) МАД =0.063 мкЗв/ч</b>	<b>1.20</b>	<b>1.50</b>	<b>2.86</b>	<b>24.</b>	<b>18</b>	<b>4.50</b>
<b>Почвы, т.89 (5-10 см)</b>	<b>1.36</b>	<b>1.58</b>	<b>2.91</b>	<b>26</b>	<b>23</b>	<b>3.00</b>
ягель, т.82 МАД =0.049 мкЗв/ч	0.13	0.20	0.42	60	5.36	<0.06
<b>Почвы, т.85 (0-5 см) МАД =0.049 мкЗв/ч</b>	<b>1.22</b>	<b>1.39</b>	<b>2.79</b>	<b>3.47</b>	<b>9.4</b>	<b>&lt;0.5</b>
т. 79 донные отложения	1.81	1.63	3.01	8.30	15	<0.5
Т. 83 донные отложения	1.68	1.98	2.79	3.68	7.2	2.30
Т. 84 донные отложения	1.56	1.82	3.19	2.14	4.4	<0.5
Т. 80 донные отложения	2.14	1.58	2.87	2.19	<b>37</b>	<0.5
Т. 86 донные отложения	3.15	1.97	2.27	2.96	8.6	<0.5
Т. 87 донные отложения	0.79	0.78	1.84	<2(0.6)	6.8	0.40
Т. 81 донные отложения	1.60	1.71	2.81	11.10	5.5	1.20
Т. 88 донные отложения	2.04	1.49	2.63	2.37	4.7	<0.5
<b>Р. Далдын около моста</b>						
Т. 90 донные отложения	0.35	нпо	0.59	<2(1.0)	7.3	<0.5
<b>Сытыканское водохранилище</b>						
Т. 100 донные отложения	0.67	0.61	1.09	<2(0.0)	33	<0.5

Точки отбора проб см. рис. 69

Пятна радиоактивного загрязнения с повышенными МАД до 0.061 мкЗв/ч расположены с северо-западной стороны от саркофага (рис.68). Эти пятна радиоактивного загрязнения в почвах (табл.26, рис.68) могут быть остатками активности, вышедшей на поверхность при взрыве в 1974 г., как и результатом миграции погребенного под саркофагом радиоактивного вещества с водными потоками и ее осаждения. В пробах донных отложений ручейков, берущих начало из-под «саркофага» (навала пустой породы над эпицентром взрыва), активность радионуклидов в среднем ниже, чем в почвах загрязненных участков у северо-западного и северного подножий склона саркофага (табл. 24).

В 1973 г. при проходке скважин №5000, 5001, 5002 на рабочей площадке будущей боевой скважины объекта «Кристалл» на глубине ~ 175 абс. м были вскрыты подземные соленые воды [Лопатин, 2000, 2001]. Динамический уровень этих вод тогда установился на глубине примерно 150 м (157 м абс.), что указывал на небольшую водообильность и практическую безнапорность горизонта С-1. В мае 2004 г. в скважине № 104 на берегу руч. Улахан-Бысыттах в 300 м западнее саркофага (рис. 60, 64) был зафиксирован уровень верхнекембрийских подземных соленых вод на уровне 140 – 190 абс. м, в скважине № 109 в 700 м к северу от саркофага – на уровне 160-204 абс. м, в скважине № 110 в 4.8 км к северо-востоку – подземные воды обнаружены на глубинах ~ 200 абс. м [Кобылкина, 2005].

С помощью геофизического зондирования выявлено, что под эпицентром ПЯВ «Кристалл» соленые подземные воды поднялись на 200-260 м до уровня примерно 100 абс.м. – до разрушенной полости ПЯВ «Кристалл», прозвездного на глубине 98 м. Расчетный радиус полости был равен 12 м, и этот участок геологической среды в радиусе ~ 10 – 17.9 м

после распада короткоживущих изотопов на сегодняшний день должен содержать тритий, осколочные  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , а также изотопы  $\text{Pu}$ , куда и проникли согласно результатов проведенного нами ЗМПП более обильные сверх-крепкие рассолы нижележащего I среднекембрийского водоносного комплекса.

Анализы поверхностных вод на площадке ПЯВ «Кристалл» показали, что из под саркофага над устьем боевой скважины ПЯВ «Кристалл» вытекают соленые ручьи (рис.70) с минерализацией до 6.5 г/л, тогда как обычная минерализация местных поверхностных вод составляет ~ 300 мг/л (табл.27). И эти ручья содержат тритий – до  $27 \pm 5$  Бк/л,  $^{90}\text{Sr}$  – до 0.44 Бк/л, также изотопы  $^{239,240}\text{Pu}$  – до 0.21062 Бк/л  $^{239,240}\text{Pu}$  – до 0.21062 Бк/л (табл.26, 27) . Выявлено, что активность  $^3\text{H}$  в ручье, вытекающем из-под саркофага, в 2002 г. достигало 221 Бк/л [Голубов и др., 2004], а в 2008 г. – 27 Бк/л. В ручье общая бета-активность, связанная с  $^{90}\text{Sr}$ , достигает 0.45 Бк/л, общая альфа-активность – 0.32 Бк/л. В пробах ручья Улахан – Бысытта, реки Далдын из-за разбавления активность трития на уровне глобального фона, равного 5 Бк/л, другие радионуклиды не определялись.



**Рис.70.** Ручей с соленой водой, берущий начало из заболоченного участка к северу от «саркофага» над эпицентром ПЯВ «Кристалл».

**Таблица 28. Активность радионуклидов в водных пробах района ПЯВ «Кристалл» (Бк/л, кроме U)**

№ п/п	Место отбора, глубина (м от поверхности земли, или м.абс.)	<sup>3</sup> H	Общая β-активность ( <sup>90</sup> Sr)	Общая α-активность ( <sup>238</sup> Pu / <sup>239,240</sup> Pu)	U мкг/л ( <sup>238</sup> U/ <sup>235</sup> U)
1	Ручей под 11.08.2008 г.	9±3	0.45±0.04	0.32±0.01	
2	западным склоном Голубов Б.Н.*, 2002 г	26.4	(4.7)		
3	Ручей из-под саркофага Голубов Б.Н.*, 2002 г.	221	(25.9)		
4		27±5	0.44±0.04	0.08±0.03	
5		15±1	(0.02±0.002)		0.062 (129)
6	Наблюдательн С кв. 1, 13.08.2008 г.	8±4	0.21±0.04	0.21±0.02	
7	ые скважины в С кв. 2, 13.08.2008 г.	6±3	0.32±0.04	0.01±0.01	
8	70 м западнее С кв. 2, 14.07.2012 г.	7±2			0.0015 (137)
9	саркофага, С кв. 3, 13.08.2008 г.	12±5	0.27±0.04	0.03±0.02	
10	глубина 1.5 м С кв. 3, 14.07.2012 г.	5±2	(0.04±0.0025)		0.005 (137)
11	С кв. 4, 13.08.2008 г.	7±4	0.22±0.03	0.01±0.01	
12	С кв. 5, 13.08.2008 г.	6±2	0.22±0.04	0.01±0.01	
13	С кв. 5, 14.07.2012 г	18±1	(0.03±0.0025)		0.01 (140)
14	р. Дадлын, в 400 м ниже устья руч. Улахан-Бысыгтах, 12.08.2009 г.	5.6±2.2			
15	15.07.2012 г. 2 г.	7±2			0.0036 (139)
16	Карьер «Удачный» +10 абс.м, Касагкин В.В.**, 2002 г.	61±24			
17	- 25 абс.м, Голубов Б.Н.*, 2002 г.	23.8	(18.8)		
18	- 125 абс.м, Голубов Б.Н.*, 2002 г.	41.8;	(47);		
19		29.5;	(14);		
20		35.4;	(15.9)		
21	- 170 абс.м, Касагкин В.В.**, 2002 г.	35±17			
22	- 170 абс.м, Голубов Б.Н.*, 2002 г.	33.8	(1.6)		

23		- 265 абс.м, 13.08.2008 г.	146±10	188±9 (1.47±0.07)	13±4	
24		- 275 абс.м, 12.08.2009 г.		(0.14±0.01)	(0.012±0.002 / 0.028±0.003)	
25		-320 абс.м., 17.07.2012 г.	8±2			0.0039 (137.8)
26		-320 абс.м., 19.09.2012 г.	8.8±2.6			
27		-320 абс.м., 26.11.2012 г.	24±2			
28	Шахта, рудник	-380 абс. м, 12.08. 2009 г.		(0.28±0.01)	(0.083±0.004 / 0.007±0.001)	
29		-380 абс. м, 17.07. 2012 г.	7.4±2.2			0.0031 (144)
30		-580 абс. м, 13.08.2008 г.	117±9	115±7	12±2 (0.0151±0.003 / 0.62±0.04)	
31		-580 абс. м, 17.07.2012 г.	9±2			0.00016 (139)
32		-580 абс. м, 19.09.2012 г.	10.6±3.2			
33		-580 абс. м, 26.11.2012 г.	27±3			
34	Хвостохранилище 2 УГОК,	13.08.2008 г	11±5	3.5±0.1	0.063±0.04	
35		15.07.2012 г	8±2			
36	Хвостохранилище 1 УГОК,	13.08. 2008 г.	25±5	3.74±0.09	0.5±0.1	0.004 (129)
37		15.07. 2012 г.	7±2			
38		Скв 104, +165 абс. м, Касаткин В.В.**, 2002 г.	106±25			
39		Скв 18 в 2.5 км к югу от ПЯВ, Голубов Б.Н.*, 2002 г.	0	(8.5)		
40		Скв 18 в 2.5 км к югу от ПЯВ, +136.6 абс. м 05.07. 2012 г.	17±3	(2.1)		0.035 (138)
41		Скв 521 в 3.7 км к юго-западу от ПЯВ Голубов Б.Н.*, 2002 г.	12.5	(6.1)		
		Скв 322 в 2.9 км к юго-западу 156.2 абс.м.	21±4 18±2			0.02 (137) 0.0066 (137)
		11.07.2012 г. 406.2 абс м.				
42		Скв 323 в 3.7 км к юго-западу 40.52 абс.м. 11.07.2012 г.	34±3 29±2			0.095 (131) 0.0051 (138)

	240.52 абс м.					
43	Скв 111 в 3.1 км к юго-востоку 44.7 абс.м. 02.07.2012 г. 255.3 абс м.	31±3 25±2	–	7700	1(5)	0.2 (0.6 / 0.56 и 0.56)
	УВ(НРБ-99, 2009)					

\* Пробы отобраны Голубовым Б.Н. в 2002 г. [Голубов и др., 2004], \*\* пробы отобраны Касаткиным В.В. в 2002 г. [Касаткин и др., 2004].

**Таблица 29. Общий химический состав водных проб района объектов ПЯВ «Кристалл», мг/л (отн.погрешность≤10%)**

Район объекта ПЯВ «Кристалл»												
Место, год	рН	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	
2009	7.2	160	72	770	200	<0.05	2320	230	нд	нд	нд	
1 – 2012	7.72	410	160	780	450	190	3130	380	6.2	0.58	35	
2 – 2012	7.10	320	240	560	310	270	2370	200	но	0.053	22	
3 – 2012	7.22	52	54	320	160	290	850	260	но	0.68	3.1	
4 – 2012	7.65	24	83	330	160	73.8	750	370	но	0.0042	1.7	
2009	5.8	55	14	180	89	2	710	43	нд	нд	нд	
3 – 2012	6.05	220	8.8	910	450	45	2400	390	но	0.0004	41	
2 – 2012		50	14	360	160	нд	нд	нд	нд	нд	0.1	
5 – 2012	6.95	17	8.0	440	180	28.9	980	340	но	1.35	0.19	
Руч.	1-2011	2.8		44.2	15.8	5.1	5.5	210	нд	нд	нд	
Дьяха	2-2011	8.0		44.2	26.1	18.0	30	210	нд	нд	нд	
фон	3-2011	5.8		47.1	15.8	17.0	17	210	нд	нд	нд	
руч.	2003 *	5.1		32	30	14.4	9.5	220	нд	нд	нд	
Улахан-Бысыгтах	2012	3	1.6	73	25	8.3	18.3	320	18.3	0.283	0.092	
	2003 *			28	32.5	20	47	180	нд	нд	нд	
	1 – 2012	10	3.5	53	30	6.2	92	183	3.87	0.320	1	
Р. Далдын	2 – 2012	52	1.7	17	17	18.2	55	220	19.7	0.26	1	

Продолжение таблицы 29

		pH	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>
Р. Сьтыкан	2012		26	12	6.4	13	20	59	140	Нд	нд	0.042
Водоём Над 1-м полигоном захоронения подзем. рассолов	2012	7.95	3.9	5.9	68	13	3.5	262	128	13.5	0.0045	0.13
Карьер диабазовый.	2012	7.25	4.1	9.3	50	13	25.1	30.5	129	Но	7.78	0.18
	-265 абс.м, 2009	4.4	50000	20200	71700	1800	1.8	223400	150	Нд	Нд	Нд
	-320 абс.м, 2012	4.18	28700	10800	63300	15200	18.2	238200	550	Но	0.012	4600
Дно карьера	2009	5.6	20000	10980	47700	3000	4	212800	370	Нд	Нд	Нд
Рудник -580 абс.м	2012	5.1	39400	7880	89300	19800	1.7	390600	490	18	0.007	5200
Хвосто-хранилище 1	2009	5	150	240	790	650	4	3550	24.4	Нд	Нд	Нд
	2012	6.81	640	215	1200	654	25.2	6390	85	Но	0.0033	74
Хвосто-хранилище 2	2009	7.45	180	590	1940	600	0.05	6400	55	Нд	Нд	Нд
	2012	7.29	1010	90	4500	220	48.4	11900	91	Но	0.008	0.28

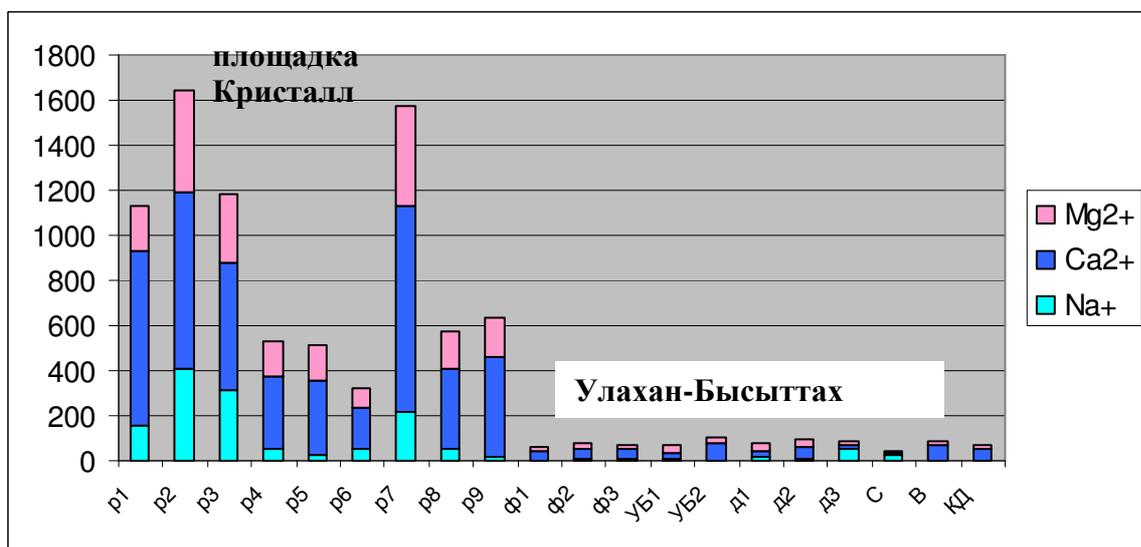
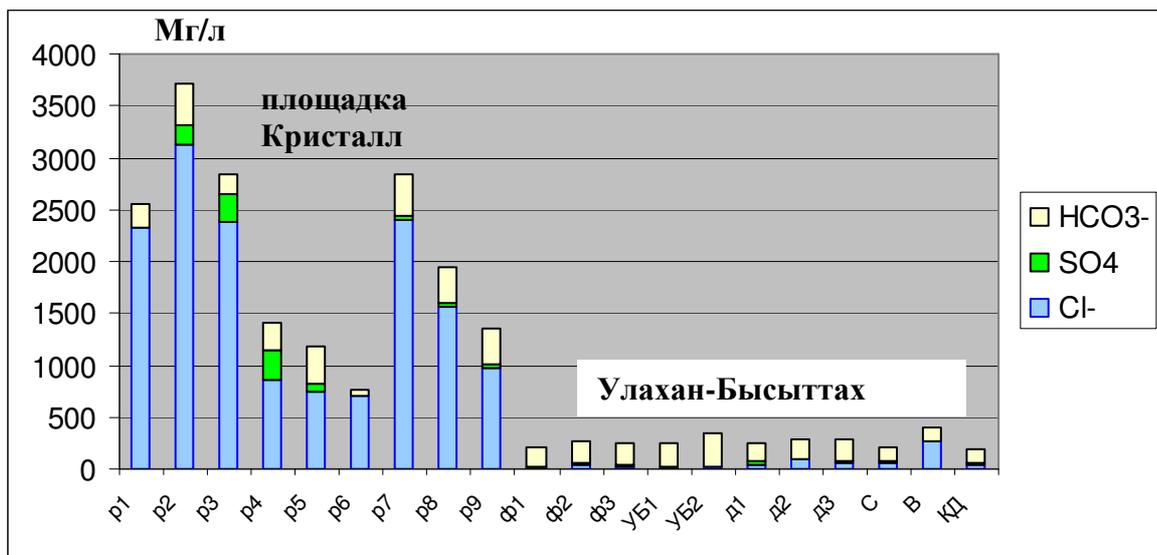
**Таблица 30. Элементный состав водных проб с площадки ПЯВ «Кристалл», руч. Улахан-Бысыгтах, р. Далдын, мг/л (отн. погрешность ≤ 10 %)**

	мг/л	Na	Mg	K	Ca	Al	Si	P	S	Ti	Mn	Fe
ручей 1 севернее саркофага	№81	410	450	160	780	0,30	<1	0,10	69	<0,01	0,18	0,17
Ручей 2 из-под саркофага с северо-западной стороны	№83	320	310	243	560	0,29	<1	0,08	192	<0,01	0,22	0,28
ручей 3 из-под саркофага	№86	52	160	54	320	0,24	2,5	0,14	239	<0,01	0,043	0,14
Ручей 4 слева от ворот в С33 Кристалл	№94	24	160	83	330	0,79	3,4	0,14	294	0,015	0,043	0,74
скв наблюд №2	№91	50	160	14	360	21	36	0,16	125	0,017	1,2	35
скв наблюд №3	№92	220	450	8,8	910	3,1	5,6	0,15	24	0,016	12	77
скв наблюд № 5	№93	17	180	8,0	440	0,12	3,7	0,09	63	<0,01	1,6	0,30
руч Улахан -Бысыгтах у объекта Кристалл	№87	3	25	1,6	73	0,16	1,9	0,12	4,3	<0,01	<0,01	<0,1
р. Далдын	№90	10	30	3,5	53	0,13	1,9	<0,05	4,1	<0,01	0,016	0,10
хвостохранилище руч Новый	№95	640	650	215	1150	0,20	1,9	0,11	144	<0,01	0,053	0,23

	мг/л	Co	Ni	Cu	Zn	Sr	Y	Zr	Mo	Cd	Sb	Ba
ручей 1 севернее саркофага	№81	0,0007	<0,01	0,009	<0,005	10	0,0009	<0,0003	0,002	<0,0002	0,0002	0,45
Ручей 2 из-под саркофага с северо-западной стороны	№83	0,0014	0,060	0,010	3,8	8,8	0,0007	<0,0003	0,002	0,0004	0,0004	0,10
ручей 3 из-под саркофага	№86	<0,0001	<0,01	0,007	0,050	3,6	0,0004	<0,0003	0,002	0,0007	0,0002	0,05
Ручей 4 слева от ворот в С33 Кристалл	№94	0,0006	0,019	0,017	0,013	5,8	0,0007	<0,0003	0,007	0,0003	0,0006	0,07
скв наблюд №2	№91	0,032	0,078	0,058	0,18	0,93	0,0182	<0,0003	<0,0005	0,0009	0,0002	0,05
скв наблюд №3	№92	0,023	0,022	0,017	0,13	1,4	0,0027	<0,0003	0,002	0,0005	0,0004	0,35
скв наблюд № 5	№93	0,005	<0,01	0,004	0,12	0,57	0,0002	<0,0003	<0,0005	<0,0002	0,0003	0,14
руч Улахан -Бысыгтах у объекта Кристалл	№87	0,0002	<0,01	0,012	0,028	0,18	0,0001	<0,0003	<0,0005	0,00135	0,0003	0,10
р. Далдын	№90	0,0004	<0,01	0,007	0,009	0,39	0,0002	<0,0003	<0,0005	0,0004	0,0004	0,04
хвостохранилище руч Новый	№95	0,0015	0,22	0,007	0,020	33	0,0023	<0,0003	0,020	0,0016	0,0005	0,16

Продолжение таблицы 30												
	мг/л	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er
ручей 1 севернее саркофага	№81	0,0002	0,0003	<0,0001	0,0002	<0,0001	0,00015	<0,0001	<0,0001	0,0001	<0,0001	0,0001
Ручей 2 из-под саркофага с северо-западной стороны	№83	0,0001	0,0003	<0,0001	0,0002	<0,0001	<0,0001	0,0001	<0,0001	0,0001	<0,0001	<0,0001
ручей 3 из-под саркофага	№86	0,0001	0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0002	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Ручей 4 слева от ворот в С33 Кристалл	№94	0,0006	0,001	0,0001	0,0002	<0,0001	0,0001	0,0002	<0,0001	0,0001	0,0001	0,0002
скв наблюд №2	№91	0,020	0,043	0,0051	0,021	0,004	0,0007	0,004	0,0006	0,0033	0,0006	0,002
скв наблюд №3	№92	0,0028	0,0058	0,0007	0,0018	0,0008	0,0002	0,0005	0,0001	0,0003	0,0001	0,0004
скв наблюд № 5	№93	0,0003	0,0004	<0,0001	<0,0001	0,0002	<0,0001	0,0002	0,0001	0,0001	<0,0001	0,0001
руч У лахан -Бысыттах у объекта Кристалл	№87	0,0006	0,0008	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0002	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0001
р. Далдын	№90	0,0003	0,0003	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
хвостохранилище руч Новый	№95	0	0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001

	мг/л	Tm	Yb	Lu	Tl	Pb	Th	U	<sup>238</sup> U/ <sup>235</sup> U	<sup>3</sup> H
ручей 1 севернее саркофага	№81	<0,0001	0	0	0,0004	0,0021	<0,0001	0,0012	138	5±2
Ручей 2 из-под саркофага с северо-западной стороны	№83	<0,0001	0	0	0,0004	0,0047	<0,0001	0,0006	<b>137</b>	4±1
ручей 3 из-под саркофага	№86	<0,0001	0	0	<0,0001	0,0028	<0,0001	0,0083	<b>129</b>	15±1
Ручей 4 слева от ворот в С33 Кристалл	№94	<0,0001	0,0001	0	0,00015	0,0037	<0,0001	0,009	136	6±1
скв наблюд №2	№91	0,0003	0,0008	0,0001	<0,0001	0,0071	0,0006	0,0027	<b>137</b>	7±2
скв наблюд №3	№92	<0,0001	0,0002	0	<0,0001	0,0030	0,0001	0,0005	<b>137</b>	5±2
скв наблюд № 5	№93	<0,0001	0	0	<0,0001	<0,001	<0,0001	0,0003	140	18±1
руч У лахан -Бысыттах у объекта Кристалл	№87	<0,0001	0	0	<0,0001	0,0023	<0,0001	0,0002	142	6±2
р. Далдын	№90	<0,0001	0	0	<0,0001	0,0016	<0,0001	0,0003	139	7±1
хвостохранилище руч Новый	№95	<0,0001	0	0	0,00075	0,056	<0,0001	0,0005	<b>129</b>	7±2



**Рис.71.** Химический состав ручьев площадки ПЯВ «Кристалл» по сравнению с поверхностными водами фонового участка (ф1, ф2, ф3) и руч. Улахан-Бысыттаx (УБ1, УБ2) и р. Далдын (д1, д2, д3).

Отепляющее и механически-разрушающее воздействие ПЯВ привело к развитию термокарста многолетнемерзлых пород на эпицентре взрыва, появлению ослабленной зоны вокруг боевой скважины, которая стала проводящей геоструктурой для просачивания на поверхность подземных рассолов и техногенных радионуклидов из зоны разрушенной полости взрыва, что подтверждается как геофизическим зондированием, так и радиоэкогеохимическими методами изучения компонентов местных геохимических ландшафтов.

На примере площадки ПЯВ «Кристалл» выявлено, что напорные подземные рассолы достигают поверхности по проницаемой геоструктуре - ослабленной зоне вокруг боевой скважины и изменяют состав пресных гидрокарбонатных поверхностных вод в соленые

натрий-кальциевых хлоридные. С помощью ЗМПП выявлено локальное поднятие I среднекембрийского водоносных горизонтов до их контакта с подземным очагом активности и слияния с малообильными верхнекембрийскими рассолами. Выявлен водный привнос подземных рассолов и техногенных радионуклидов с водами ручья, вытекающей из-под «саркофага» из недр в поверхностные воды.

Наличие проводящей геоструктуры «**полость взрыва - ослабленная зона вокруг боевой скважины – поверхность земли**» подтверждается также на площадках других ПЯВ.

### **5.3.2. Площадка ПЯВ «Кратон-3»**

Ручеек, вытекающий из-под насыпи устья боевой скважины ПЯВ «Кратон-3», обогащен хлоридами натрия и кальция, также содержит техногенные радионуклиды (рис.69, 70, табл.29, 30).

В 2008 г. на поверхности ручейка, вытекающего из-под насыпи, нами установлены (т. 5-08, рис. 2, табл. 2) установлены активность: трития – 18 Бк/л, общая бета-активность, связанная со  $^{90}\text{Sr}$ , -  $(0.398\pm 0.028)$  Бк/л, что меньше УВ (НРБ-99, 2009) в ~2 раза, альфа-активность, связанная в основном с изотопами Рu, -  $(0.29\pm 0.01)$  Бк/л, что превышает УВ.

В термокарстовом водоеме, сформировавшемся после взрыва у устья боевой скважины (рис.55) и существовавшем вплоть до строительства насыпи в 2006 г., Дубасовым Ю. В. в 1996 г. была установлена активность трития –  $(700\pm 250)$  Бк/л, а в 2001 г. – уже  $(320\pm 32)$  Бк/л (Ramzaev et al., 2009). В 2001 г. и 2003 г. здесь в водоеме зафиксированы активность  $^{90}\text{Sr}$  –  $(38\pm 6)$  (Ramzaev et. al., 2009) и  $(49\pm 18)^*$  Бк/л соответственно, что превышали в ~7.5-10 раз УВ по радиостронцию. Ниже, по склону в грунтовых водах в 2007 г. установлены активность растворенного  $^{90}\text{Sr}$  –  $(8.75\pm 1.63)$  Бк/л<sup>\*\*</sup>, что превышало в ~1.5 раза УВ. В 2008-2009 гг. в грунтовых водах (т. 1-08 и 51-09 на рис. 2) нами установлены активность:  $^{90}\text{Sr}$  всего  $(1.99\pm 0.07)$  Бк/л, трития – от  $(19\pm 6)$  до  $(67.2\pm 1.9)$  Бк/л,  $^{239,240}\text{Pu}$  -  $(4\pm 0.16) \cdot 10^{-4}$  и  $^{238}\text{Pu}$  -  $(7.8\pm 0.3) \cdot 10^{-3}$  Бк/л, и их активности ниже УВ (см. табл. 29). Источников радионуклидов, выявленных в грунтовых водах у насыпи над боевой скважиной, могло быть несколько: кроме стоков «мертвого» леса и могильника, еще может быть другой – третий источник – зона взрыва. Поскольку радионуклиды в поверхностных водах площадки ПЯВ «Кратон-3» идут в купе с хлоридами натрия и кальция, имеются все основания предполагать о доминирующем просачивании подземных рассолов с радионуклидами по ослабленной зоне вокруг боевой скважины, нежели их поступление с мертвого леса или из могильника техника, расположенного рядом с устьем скважины.

\* Данные Министерства охраны природы РС(Я), проба отобрана В. Е. Ушнищким в 2003 г.

\*\* Данные Министерства охраны природы РС(Я), из отчета ИПНГ СО РАН, отв.исп. П. Г. Новгородов, 2008 г.



**Таблица 32. Активность радионуклидов в природных водах, отобранных в пределах ослабленной зоны вокруг устья боевой скважины МПЯВ «Крагон-3» в 1996-2009 гг., Бк/л (относительная погрешность ≤ 10 %)**

Место отбора	Номер пробы, дата отбора	$^3\text{H}$	Общая $\beta$ -активность ( $^{90}\text{Sr}$ )	Общая $\alpha$ -активность ( $^{239, 240}\text{Pu}$ )	$^{238}\text{Pu}$
поверхностный водоток на опушке «мертвого» леса	6-08, 03.08.2008 г.	68±8	2.11±0.08 (н.д.)	0.54±0.06(н.д.)	н.д.
	6а-08, 03.08.2008 г.	н.д.	2.25±0.25 (н.д.)	н.д.	н.д.
	2002, май <sup>а</sup>			(0.14±0.02)	(7±1)·10 <sup>-3</sup>
руч. Безымянный	3-08, 03.08.2008 г.	30±5	0.27±0.04(н.д.)	0.023±0.02 (н.д.)	н.д.
	52-09, 10.08.2009 г.	57±2.8	(0.12±0.004)	((4±0.16)·10 <sup>-4</sup> )	(3.9±0.15)·10 <sup>-3</sup>
	1996 <sup>б</sup> г.	700±250	н.д.	н.д.	н.д.
Водоем рядом с устьем боевой скважины (до создания насыпи в 2006 г.)	2001 <sup>б</sup> г.	320±32	38±6 (н.д.)	н.д.	н.д.
	2003 <sup>в</sup> г.	н.д.	49±18 (н.д.)	н.д.	н.д.
	5-08, 03.08.2008 г.	18±5	0.398±0.028 (н.д.)	0.29±0.01(н.д.)	н.д.
Поверхностный водоток из-под насыпи устья боевой скважины	скв. № 8, 2007 <sup>г</sup> г.	н.д.	н.д. (8.75±1.63)	н.д.	н.д.
	скв. № 7, 03.08.2008 г.	19±6	2.39±0.07 (н.д.)	0.16±0.04 (н.д.)	н.д.
Грунтовые воды скв. 8, глубина ~ 1.5 м, западнее насыпи	1-08, 03.08.2008 г.	22±6	2.35±0.07(н.д.)	0.15±0.04(н.д.)	н.д.
	51-09, 10.08.2009 г.	67.2±1.9			
Грунтовые склоновые воды из закопуши на берегу р. Мархи	1-08, 03.08.2008 г.	22±6	2.35±0.07(н.д.)	0.15±0.04(н.д.)	н.д.
	51-09, 10.08.2009 г.	67.2±1.9			
			н.д. (1.99±0.07)	н.д. ((4±0.16)·10 <sup>-4</sup> )	(7.8±0.3)·10 <sup>-3</sup>

р. Марха	50-09, 10.08.2009 г.	13±2.0	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	
	2-08, 03.08.2008 г.	22±5	2.82±0.03(н.д.)	0.42±0.02(н.д.)	н.д.	н.д.	
	49-09, 10.08.2009 г.	14±1.5	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	
	49-09, 11.08.2009 г.	48±2.4*	н.д. (0.078±0.003)	н.д.((6±0.24)·10 <sup>-4</sup> )	(18.6±0.7)·10 <sup>-3</sup>	н.д.	
	48-09, 10.08.2009 г.	52.1±2.6	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	
	48-09, 11.08.2009 г.	45.2±2.1	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	
	47-09, 11.08.2009 г.	44.3±2.2*	0.011±0.010(н.д.)	0.026±0.013(н.д.)	н.д.	н.д.	
	27-09, 09.08.2009 г.	9±1	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	
	26-09, 09.08.2009 г.	5±2	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	
	25-09, 09.08.2009 г.	6±2	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	
	28-09, 09.08.2009 г.	7.5±0.5	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	
	Водоток левого берега р. Мархи						
	УВ воды	7700	1 (5)	0.2 (0.56)	0.6		

Примечание: Номера проб соответствуют точкам на рис.14. н.д. – нет данных,  
<sup>а</sup> – [Рамзаев, 2004], <sup>б</sup> – [Ramzaev et al., 2009], <sup>в</sup> – [Ушницкий, 2004], <sup>г</sup> – [Новгородов и др., 2008]

**Таблица 33 . Элементный состав водных проб района ПЯВ «Кратон-3», мг/л (отн.погрешность ≤ 10%)**

	Al	Si	P	Na	Mg	K	Ca	Ti	Mn	Fe
1_12	10	1300	3,0	11 700	18000	3,24	46700	0,59	25	19
2_12	15	1300	3,1	11 900	17700	2,53	47500	2,39	27	29
7_12	77	1300	2,0	11 900	18300	6,60	46300	3,82	39	28
9_12	1050	2600	11,4	154 300	247000	24,94	434000	9,54	2548	5221
12_12	16	1300	3,8	14 000	19900	6,29	47700	6,29	54	72

	Co	Ni	Cu	Zn	Y	Nb	La	Ce	Pr	Nd
1_12	6,81	2,7	1,14	0,89	0,03	<0,02	0,02	0,02	<0,02	0,04
2_12	1,3	2,2	1,32	1,09	0,05	<0,02	0,04	0,05	<0,02	0,09
7_12	0,18	2,9	1,38	1,11	0,09	<0,02	0,07	0,12	0,03	0,04
9_12	8,23	42,7	13,9	7,51	10	<0,02	8,9	19	2,72	10,7
12_12	0,85	2,7	1,72	1,57	0,25	<0,02	0,15	0,25	0,05	0,19

	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
1_12	0,02	0	<0,02	<0,02	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	0
2_12	<0,02	0	<0,02	<0,02	0,01	<0,01	0,01	<0,01	0	0
7_12	0,02	0	0,03	<0,02	0,01	0,01	0,01	<0,01	0,01	0
9_12	2,38	0,655	2,62	0,4	2,24	0,36	0,89	0,12	0,61	0,09
12_12	0,05	0	0,07	<0,02	0,02	0,01	0,02	<0,01	0,03	0

Продолжение таблицы 33													
		W	Bi	Pb	Zr	Mo	Cd	Sn	Sb	Sr	Ba		
1_12	р. Марха, в 500 м от ПЯВ Кр-3	<0,01	<0,01	0,23	0,05	1,87	0,035	<0,02	17,54	580	20		
2_12	т.2 р. Р. Марха в 260 м от ПЯВ	<0,01	<0,01	0,07	0,05	1,96	<0,02	<0,02	5,49	580	21		
7_12	т.7 лев. р.Марха напротив т.2	<0,01	<0,01	0,23	0,145	2,1	<0,02	0,02	0,27	600	21		
9_12	площадка ПЯВ (грунт вода)	0,013	<0,01	1,97	0,54	0,37	0,09	0,04	0,14	3400	513		
12_12	р.Марха выше по теч. 15 км	<0,01	<0,01	0,55	0,05	2,1	0,085	0,06	2,87	700	19		

		Hf	Tl	Th	U	238U/235U
1_12	р. Марха, в 500 м от ПЯВ Кр-3	<0,01	<0,01	<0,01	1,48	137,15
2_12	т.2 р. Р. Марха в 260 м от ПЯВ	<0,01	<0,01	<0,01	0,29	137,56
7_12	т.7 лев. р.Марха напротив т.2	<0,01	<0,01	0,01	0,58	138,39
9_12	скв 9 площадка ПЯВ (гр.в)	0,04	0,03	0,02	1,1	133,12
12_12	р.Марха выше по теч. 15 км	<0,01	<0,01	<0,01	0,49	137,49

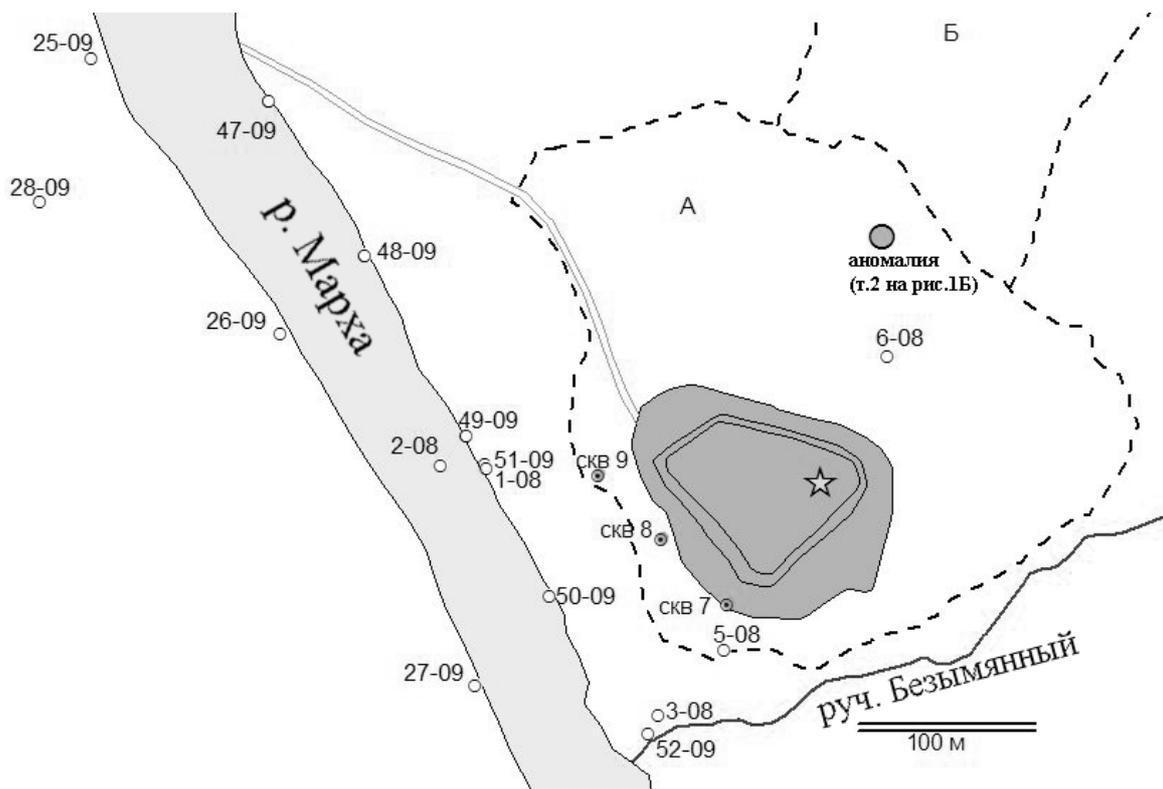
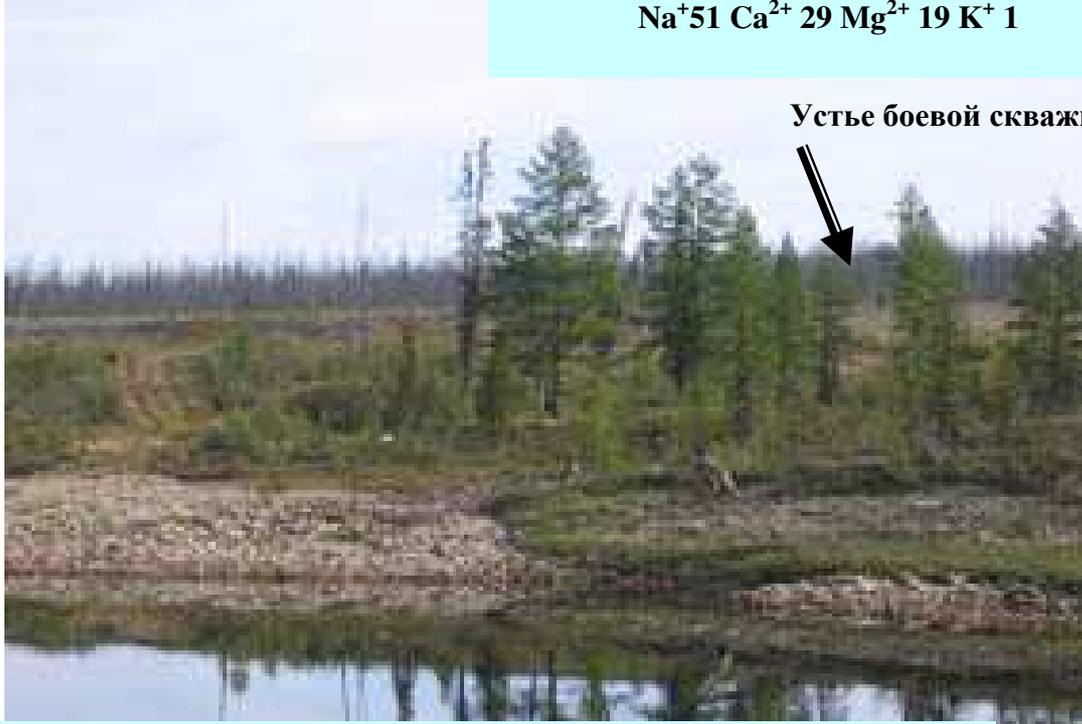


Рис.72. Схема отбора проб на площадке ПЯВ «Кратон-3»

Площадка «Кратон-3»

М 2.6 г/л  $\frac{\text{Cl}^- 79 \text{ HCO}_3^- 20}{\text{Na}^+ 51 \text{ Ca}^{2+} 29 \text{ Mg}^{2+} 19 \text{ K}^+ 1}$  pH 6.6



Р. Марха в 260 м от устья боевой скважины ПЯВ «Кратон-3»

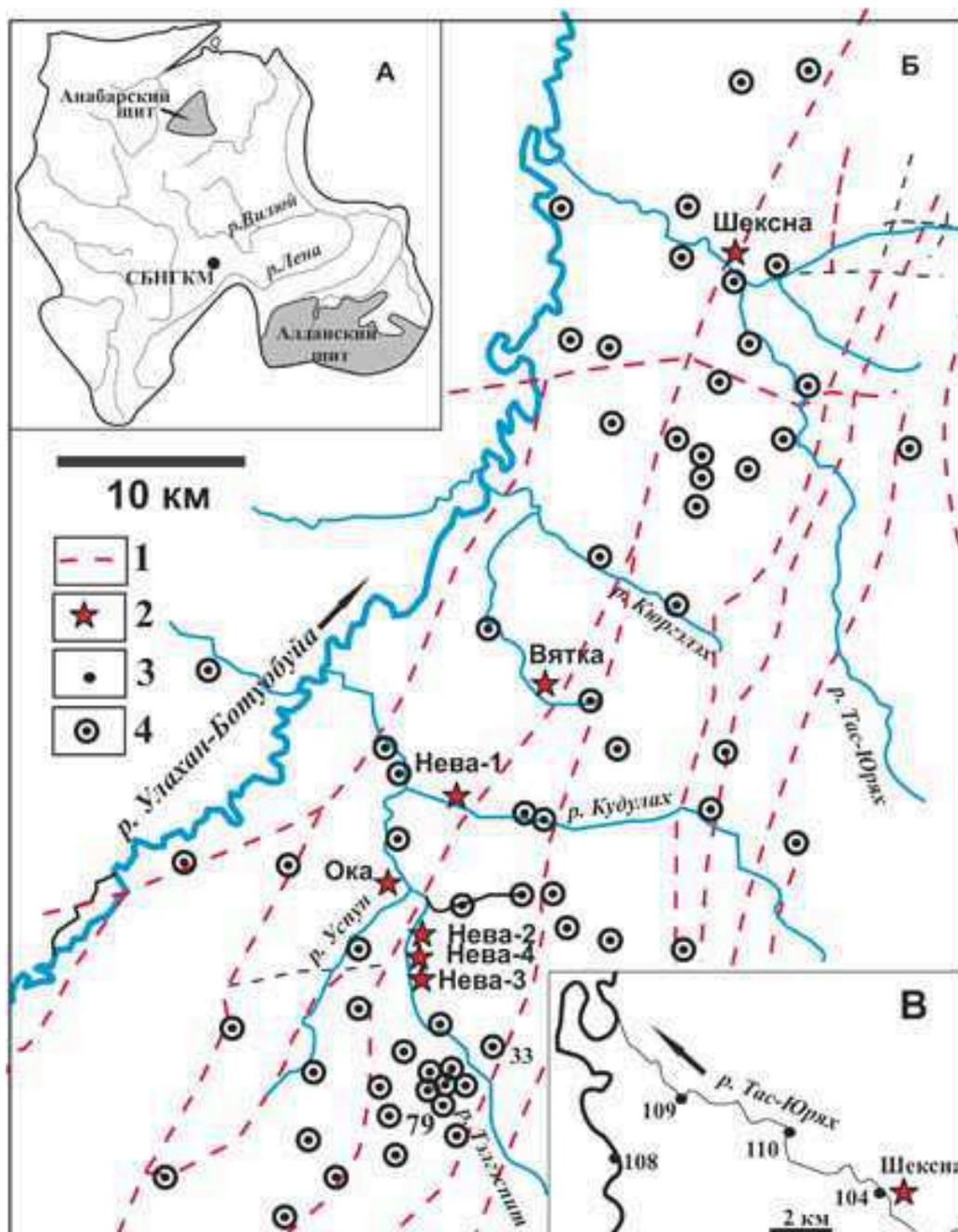
М 0.33 г/л  $\frac{\text{HCO}_3^- 96 \text{ SO}_4^{2-} 3 \text{ Cl}^- 1}{\text{Ca}^{2+} 52 \text{ Mg}^{2+} 38 \text{ Na}^+ 10}$  pH 7.4

Рис. 73. Вид на площадку ПЯВ «Кратон-3» и формулы Курлова для поверхностных вод площадки ПЯВ «Кратон-3» и р. Марха.

Таким образом, на площадке ПЯВ «Кратон-3» мы видим те же признаки выхода подземных рассолов с техногенными радионуклидами по ослабленной зоне вокруг боевой скважины

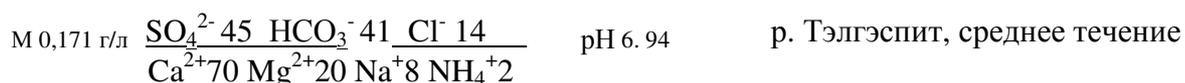
### 5.3.3. Площадки 7-ми ПЯВ в районе Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения.

Основными водотоками СБНГКМ являются р. Улахан-Ботуобуя и ее притоки р. Тэлгэспит и р. Тас-Юрях (рис.74).

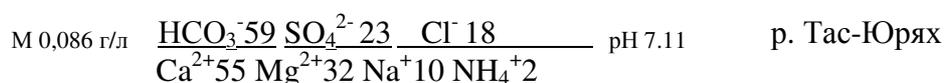


**Рис. 74.** Схема расположения Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения на Сибирской платформе (а), объектов ПЯВ на его территории (б) и точек отбора проб на р. Тас-Юрях около объекта ПЯВ «Шексна» (в): 1 – тектонический разлом; 2 – объект ПЯВ и его название; 3 – № точек отбора проб поверхностных вод, 4 – скважины.

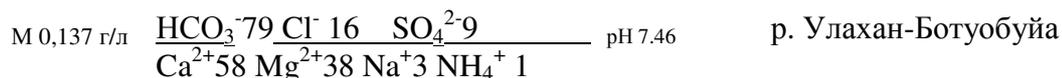
Сероводород – одни из главных газовых примесей подземных вод верхнего надсолевого и межсолевого разреза (Анциферов, 1989), потому для местных заболоченных ландшафтов его выход типичен. В поверхностных кислородных условиях сероводород окисляется до сульфат-ионов, наиболее высоко содержание сульфатов в р. Тэлгэспит – до 52.2 мг/л, (табл.32). На подстилающих терригенных четвертичных и юрских породах формируются пресные нейтральные гидрокарбонатно-сульфатные магниево-кальциевые поверхностные воды с минерализацией 170 мг/л (табл.32):



В условиях быстрого течения и меньшей заболоченности на песчаных породах содержание сульфатов в р. Тас-Юрях уменьшается до 13 мг/л:



В многоводной р. Улахан-Ботубуйа из-за разбавления содержание сульфатов составляет всего от 6.2 до 7.5 мг/л, тип вод – слабощелочные гидрокарбонатные магниевые-кальциевые:



Поверхностные воды в пределах ослабленных зон боевых скважин ПЯВ отобраны на буровых площадках: из стаканов для буровых снарядов, амбаров – запруд, созданных для хранения бурового шлама, из маленьких ручейков и водоемов - термокарстовых озер, развитых по ложбинам полигонально-холмистого микрорельефа. Выявлено, что этим водным проб присуща высокая минерализация – до 2 г/л (средняя – 584 мг/л) за счет появления больших концентраций хлоридов натрия, кальция и магния (мг/л): Na<sup>+</sup> – до 346 (в среднем 107), Ca<sup>2+</sup> – до 315 (в среднем 69), Mg<sup>2+</sup> – до 138 (в среднем 20), K<sup>+</sup> – до 14.9 (в среднем 3.6) (табл.32), что превышает их содержание в речной воде района в 95 (29), 14 (3), 23 (3), 78 (19) раз соответственно. Этот факт можно объяснить только просачиванием на поверхность подземных хлоридных рассолов, характерных местной геологической среде, по ослабленной зоне боевых скважин. Поверхностные воды на площадках МПЯВ относятся к разным типам пресных и солоноватых вод, особенно гетерогенны пробы на площадке объекта «Ока». Выявлено, что в пределах одной и той же площадки ПЯВ состав воды в соседних термокарстовых озерах (линейными размерами до 3 X10 м) разный: в пределах буровой площадки объекта «Ока», «Нева-3» установлены хлоридные кальциевые, хлоридные натриевые и сульфатно-хлоридные кальциевые воды, а также их промежуточные разности, объекта «Шексна» – хлоридные натриевые (табл.32, рис.72). Разнообразие гидрохимических

типов поверхностных вод на буровых площадках ПЯВ указывает на просачивание рассолов разного состава из разных глубин геологического разреза: хлоридные кальциевые метаморфизованные рассолы из подсолевых водоносных горизонтов, так и хлоридные натриевые рассолы из межсолевого и надсолевого водоносного комплексов (рис.20).

На объекте «Вятка» хлоридно-гидрокарбонатно-сульфатные магниевые-кальциевые поверхностные воды отличаются невысокой минерализацией до 157 мг/л, и на их состав практически отсутствует влияние подземных рассолов, то есть на площадке этого объекта «Вятка» нет интенсивного выхода подземных рассолов. Минерализация гидрокарбонатной натриево-кальциевой воды в природном озере (с площадью зеркала поверхности примерно 3.5 га) в 200 м от устья боевой скважины объекта «Вятка» составляет всего 96 мг/л, концентрации  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$  подобны концентрациям в речной воде (табл.32).

В водных пробах буровых площадок ПЯВ установлены концентрации (мкг/л) В – до 94 (при среднем содержании – 38), Ва – до 443 (при среднем содержании 131), что выше их средних концентраций в речной воде в 9 и 23 раза соответственно. Это типоморфные элементы подземных рассолов, и потому их высокие содержания в водных пробах площадок ПЯВ наряду с хлоридами натрия, кальция, магния более, чем логично.

Высокое содержание Fe (до 20 мг/л), Mn (до 0.83 мг/л) (табл.34) в водных пробах стаканов для буровых снарядов можно объяснить локальным влиянием самих этих железных конструкций. Но высокие содержания Fe и Mn в ручейках и термокарстовых озерах площадок ПЯВ (Mn до 5.23 мг/л, Fe до 12.1 мг/л) мы можем объяснить только выходом подземных потоков, несущих вещество с этими элементами из глубинных участков скважинного оборудования.

С помощью ICP-AES в водных пробах буровых площадок ПЯВ зафиксированы металлы, совершенно чуждые для геохимии местных природных ландшафтов и установленные в речной воде района (мкг/л): Co до 19; Cr до 54; Cu до 32; Ni до 150; Ti до 32; V до 30; Zn до 57 (табл.34, рис.73). Наличие Cr несвойственно для поверхностных вод района распространения терригенных и карбонатных осадочных пород. В пробах воды площадок объектов «Нева-3» и «Шексна» установлены редкие элементы (мкг/л): Be – до 1.9; La – до 6.7; Y – до 6.6. В речной воде СБНГКМ редкие La, Y, Be, Ni, Co, V, Cr – нами не обнаружены, их содержания в речной воде ниже пределов обнаружения, поскольку у этих

**Таблица 34. Общий химический состав поверхностных вод Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения (мг/л)**

Объект	место (№ пробы)	pH	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	NH <sup>4+</sup>	Fe общ	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	M*
Ручей в верховье р. Тэлгэспит, ручей (33)		5.73	7.9	2.5	2	<0.05	1.25	0.81	20	1.6	15	50.3
Сред. теч. р. Тэлгэспит (30)		6.96	34.8	6.2	4.49	0.103	0.7	0.9	60	52	12.5	170
Низовье р. Тэлгэспит (41)		6.94	34.3	6.8	4.72	0.29	0.7	0.97	65	44	15	170
р. Тас-Юрях (104)		7.11	14.1	4.9	3.03	0.18	0.55	0.77	42.5	13	7.5	86
р. Улахан Ботуобуйа (108)		7.46	24.9	9.9	1.45	0.4	0.3	0.71	85	7.5	7.5	137
площадка МПЯВ «Нева-3»	Стакан боевой скв. 61 (с61)	нд	26.9	9.9	13.5	7.8	-	0.57	43	11.5	56	170
	Стакан развед. скв. 60 (с60)	нд	9.1	2.5	47.4	1.5	0.7	4.14	36	1.71	65	164
площадка МПЯВ «Вятка»	Стакан боевой скв. 43 (с43)	нд	27.2	9.1	4.5	0.45	-	0.36	44	50	22	160
	Озеро в 200 м к югу от скв. 43 (с431)	нд	16.4	1.24	11.2	4.32	0.7	0.85	44	11	7.7	96
площадка МПЯВ «Шексна»	Стакан боевой скв. 47 (89)	нд	7.5	0.76	78.7	7.51	-	2.56	43	0.8	137	275
	1Т/о** в 57 м к юго-востоку от скв. 47 (105)	нд	4.7	3.7	138	1.69	0.7	12.1	43	1.6	204	400
	2Т/о в 57 м к юго-востоку от скв. 47 (106)	нд	2.2	1.5	157	1.56	0.7	7.1	43	0.7	250	460
площадка МПЯВ «Ока»	Стакан боевой скв. 42 (с42)	нд	53.7	8.8	7.12	3.68	-	20	34	37	100	244
	Стакан развед. скв. 25 (251)	нд	19.9	2.7	11.6	14.9	-	2.39	44	11.6	52	160
	Ручеек (38)	нд	142	32.4	202	2.85	-	0.11	42	35.7	630	1090
	1 Т/о (37)	нд	315	138	211	0.66	-	1.09	35	16.5	1280	2000
	2 Т/о (252)	нд	185	22.0	72	1.93	-	0.12	38	299	280	900
	3 Т/о (253)	нд	27.4	7.2	346	2.64	0.7	2.15	45	5.5	520	950
	4 Т/о (255)	нд	38.5	11.2	97	2.02	-	0.45	44	13.1	240	450
	Амбар (254)	нд	103	37.3	116	1.31	-	2.11	41	4.0	470	770

\*M – общая минерализация вод, мг/л; \*\* Т/о – термокарстовое озеро,

**Таблица 35.** Содержание (активность) радионуклидов в водных пробах Среднебугубинского нефтегазоконденсатного месторождения.

№ пробы	Место	U, мкг/л	<sup>238</sup> U/ <sup>235</sup> U	<sup>3</sup> H Бк/л	<sup>90</sup> Sr Бк/л	<sup>239, 240</sup> Pu Бк/л	<sup>238</sup> Pu Бк/л
33	руч.верховье Тэлгэспит, в 3.5 км выше по течению от объектов МПЯВ	0,08	140	108			
12	р.Тэлгэспит, под склоном в 340 м от «Нева-3»	0,29	138	54			
30	р.Тэлгэспит, в 1 км ниже по течению от «Нева-2»	0,18	138	65	0.006	0.00045	0.00063
34	р.Успун, в 800 м выше по течению от «Ока»	0,21	138	57			
35	р.Успун, в 300 м выше по течению от «Ока»	0,04	137	58			
41	Р.Тэлгэспит, бур.площадка «Ока»	0,08	139	16			
45	р.Тэлгэспит, в 1.6 км выше устья р. Кудулах	0,06	139	67			
46	р. Кудулах в 850 м ниже по течению от «Нева-1»	0,10	139	49			
107	Правый приток Р. Тас-Юрях, в 1 км севернее «Шексна»	0,004	137	43			
104	р.Тас-Юрях, в 200 м ниже по течению от «Шексна»	0,03	138	45	0.009	0.00064	0.00091
110	р.Тас-Юрях, в 4.2 км ниже по течению от «Шексна»	0,04	140	15	0.057	0.00047	0.00047
109	р.Тас-Юрях, в 7.7 км ниже по течению от «Шексна»	0,04	137	25	0.022	0.00016	0.00022
108	р.Улахан-Ботубуйа, в 4.3 км выше устья р. Тас-Юрях	0,09	138	66	0.013	0.00051	0.0014
С 60	стакан для снаряда скв. 60, бур. площадка «Нева-3»	0,08	136	41			
С 61	стакан для снаряда, бур.площадка «Нева-3»	<0.001	137	5			
37	озеро термокарстовое, бур.площадка «Ока»	0,51	138	19			
38	ручей, бур.площадка «Ока»	1,8	138	21			
251	стакан для снаряда развед. скв. 25 «Ока»	0,02	138	41			
С 42	стакан для снаряда боев.скв, бур. площадка «Ока»	0,10	135	170			
252	Термокарстовое озеро 1, ложбина бур. площадка «Ока»	0,37	132	45			
253	Термокарстовое озеро 2, ложбина бур. площадка «Ока»	0,04	138	50			
254	"амбар"- термокарстовое озеро, бур. площадка «Ока»	0,04	139	25			
255	Термокарстовое озеро 3, ложбина, бур.площадка «Ока»	0,28	138	28			
С 43	стакан для снаряда, бур. площадка «Вятка»	0,02	137	23			
С431	озеро, бур. площадка « Вятка»	<0.001	139	17			
89	стакан для снаряда, бур. площадка «Шексна»	<0.001	137	4			
105	Термокарстовое озеро 1, бур. площадка «Шексна»	0,94	128	48			
106	Термокарстовое озеро 2, бур. площадка «Шексна»	0,18	135	57			

**Таблица 36. Микроэлементный состав поверхностных вод Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения, мг/л**

	<b>водотоки</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>La</b>	<b>Li</b>	<b>Mn</b>	<b>Ni</b>	<b>P</b>
<b>33</b>	руч.,верховье Тэлгэспит, в 3.5 км выше по течен. от ПЯВ	нпо	нпо	нпо	0,81	нпо	0,003	0,20	нпо	нпо
<b>12</b>	р.Тэлгэспит, под склоном в 340 м от «Нева-3»	нпо	нпо	нпо	1,21	нпо	0,007	0,36	нпо	0,033
<b>30</b>	р.Тэлгэспит, в 1 км ниже по течению от «Нева-2»	нпо	нпо	нпо	0,90	нпо	0,007	0,26	нпо	нпо
<b>34</b>	р.Успун, в 800 м выше по течению от «Ока»	нпо	нпо	нпо	1,68	нпо	0,007	0,28	нпо	0,041
<b>35</b>	р.Успун, в 300 м выше по течению от «Ока»	нпо	нпо	нпо	8,40	нпо	0,004	1,09	нпо	0,057
<b>41</b>	р.Тэлгэспит, бур.площадка «Ока»	нпо	нпо	нпо	0,97	нпо	0,008	0,34	нпо	нпо
<b>45</b>	р.Тэлгэспит, в 1.6 км выше устья р. Кудулах	нпо	нпо	0,002	0,69	нпо	0,006	0,12	нпо	нпо
<b>46</b>	р. Кудулах в 850 м ниже по течению от «Нева-1»	нпо	нпо	нпо	1,55	нпо	0,01	0,30	нпо	0,045
<b>107</b>	Правый приток Р. Тас-Юрях, в 1 км севернее «Шексна»	нпо	нпо	нпо	0,12	нпо	0,006	0,038	нпо	нпо
<b>104</b>	р.Тас-Юрях, в 200 м ниже по течению от «Шексна»	нпо	нпо	нпо	0,77	нпо	0,005	0,024	нпо	нпо
<b>110</b>	р.Тас-Юрях, в 4.2 км ниже по течению от «Шексна»	нпо	нпо	0,003	0,82	нпо	0,006	0,024	нпо	нпо
<b>109</b>	р.Тас-Юрях, в 7.7 км ниже по течению от «Шексна»	нпо	нпо	нпо	0,85	нпо	0,006	0,028	нпо	нпо
<b>108</b>	р.Улахан-Ботубуйа, в 4.3 км выше устья р. Тас-Юрях	нпо	нпо	нпо	0,71	нпо	0,005	0,057	нпо	нпо

<b>Продолжение таблицы 36 ( мг/л)</b>		<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>La</b>	<b>Li</b>	<b>Mn</b>	<b>Ni</b>	<b>P</b>
<b>площадки ПЯВ</b>										
<b>с60</b>	стакан для снаряда скв. 60, бур. площадка «Нева-3»	нпо	0,006	0,007	4,14	нпо	0,003	0,13	0,005	нпо
<b>с61</b>	стакан для снаряда, бур.площадка «Нева-3»	нпо	нпо	0,005	0,57	нпо	0,014	0,067	нпо	нпо
<b>37</b>	озеро термокарстовое, бур.площадка «Ока»	нпо	нпо	0	1,09	нпо	0,011	1,23	нпо	0,026
<b>38</b>	ручей, бур.площадка «Ока»	0,013	нпо	0,007	0,11	нпо	0,006	5,23	нпо	0,034
<b>251</b>	стакан для снаряда развед. скв. 25 «Ока»	нпо	нпо	0,004	2,39	нпо	0,009	0,043	нпо	нпо
<b>с42</b>	стакан для снаряда боев.скв, бур. площадка «Ока»	0,019	0,054	0,032	20,0	нпо	0,011	0,63	0,15	нпо
<b>252</b>	Термокарстовое озеро 1, ложбина бур. площадка «Ока»	нпо	нпо	0,005	0,12	нпо	0,012	0,42	нпо	нпо
<b>253</b>	Термокарстовое озеро 2, ложбина бур. площадка «Ока»	нпо	нпо	0,002	2,15	нпо	0,005	0,39	нпо	0,046
<b>254</b>	"амбар"- термокарстовое озеро, бур. площадка «Ока»	нпо	нпо	0,004	2,11	нпо	0,01	0,23	нпо	0,062
<b>255</b>	Термокарстовое озеро 3, ложбина, бур.площадка «Ока»	нпо	нпо	0,003	0,45	нпо	0,007	0,057	нпо	нпо
<b>с43</b>	стакан для снаряда, бур. площадка «Вятка»	нпо	нпо	0,003	0,36	нпо	0,004	0,32	нпо	нпо
<b>с431</b>	озеро, бур. площадка « Вятка»	нпо	нпо	нпо	0,85	нпо	0,005	0,071	нпо	0,055
<b>89</b>	стакан для снаряда, бур. площадка «Шексна»	0,003	нпо	нпо	2,56	нпо	0,002	0,83	нпо	нпо
<b>105</b>	Термокарстовое озеро 1, бур. площадка «Шексна»	0,018	0,034	0,026	12,1	0,007	0,011	0,83	0,009	нпо
<b>106</b>	Термокарстовое озеро 2, бур. площадка «Шексна»	0	0,014	0,009	7,07	0	0,004	0,27	0	0,081

Продолжение таблицы 36 (мг/л)

	<b>водотоки</b>	<b>S</b>	<b>Si</b>	<b>Sr</b>	<b>Ti</b>	<b>V</b>	<b>Y</b>	<b>Zn</b>
<b>33</b>	руч.верховье Тэлгэспит, в 3.5 км выше по течен. от ПЯВ	0,5	0,881	0,078	нпо	нпо	нпо	0,006
<b>12</b>	р.Тэлгэспит, под склоном в 340 м от «Нева-3»	17,3	2,36	0,701	нпо	нпо	нпо	0,003
<b>30</b>	р.Тэлгэспит, в 1 км ниже по течению от «Нева-2»	17,4	2,24	0,693	нпо	нпо	нпо	0,002
<b>34</b>	р.Усун, в 800 м выше по течению от «Ока»	5,3	4,07	0,622	нпо	нпо	нпо	0,006
<b>35</b>	р.Усун, в 300 м выше по течению от «Ока»	2,7	2,45	0,593	0,0006	нпо	нпо	0,002
<b>41</b>	Р.Тэлгэспит, бур.площадка «Ока»	14,6	2,41	0,726	нпо	нпо	нпо	0,001
<b>45</b>	р.Тэлгэспит, в 1.6 км выше устья р. Кудулах	14,0	2,26	0,676	нпо	нпо	нпо	0
<b>46</b>	р. Кудулах в 850 м ниже по течению от «Нева-1»	16,8	3,44	0,686	нпо	нпо	нпо	0,002
<b>107</b>	Правый приток Р. Тас-Юрях, в 1 км севернее «Шексна»	4,3	5,49	0,096	нпо	нпо	нпо	0
<b>104</b>	р.Тас-Юрях, в 200 м ниже по течению от «Шексна»	4,3	3,69	0,193	нпо	нпо	нпо	0,001
<b>110</b>	р.Тас-Юрях, в 4.2 км ниже по течению от «Шексна»	4,1	3,48	0,202	нпо	нпо	нпо	0
<b>109</b>	р.Тас-Юрях, в 7.7 км ниже по течению от «Шексна»	3,7	3,46	0,197	нпо	нпо	нпо	0
<b>108</b>	р.Улахан-Ботубуйа, в 4.3 км выше устья р. Тас-Юрях	2,5	2,85	0,201	нпо	нпо	нпо	0,002

Продолжение таблицы 36 (мг/л) площадки ПЯВ		S	Si	Sr	Ti	V	Y	Zn
<b>с60</b>	стакан для снаряда скв. 60, бур. площадка «Нева-3»	3,8	2,9	0,117	0,0011	0,010	0,0022	0,008
<b>с61</b>	стакан для снаряда, бур. площадка «Нева-3»	0,6	0,045	0,298	нпо	0,013	нпо	0,004
<b>37</b>	озеро термокарстовое, бур. площадка «Ока»	5,5	2,76	2,199	нпо	нпо	нпо	0,001
<b>38</b>	ручей, бур. площадка «Ока»	11,9	5,57	0,538	нпо	нпо	нпо	0,005
<b>251</b>	стакан для снаряда развед. скв. 25 «Ока»	3,9	0,591	0,320	нпо	нпо	нпо	0,003
<b>с42</b>	стакан для снаряда боев. скв, бур. площадка «Ока»	12,2	2,36	0,147	0,032	нпо	нпо	0,057
<b>252</b>	Термокарстовое озеро 1, ложбина бур. площадка «Ока»	100	7,31	1,574	нпо	нпо	нпо	0,019
<b>253</b>	Термокарстовое озеро 2, ложбина бур. площадка «Ока»	1,8	2,45	0,245	0,0037	нпо	нпо	0,001
<b>254</b>	"амбар" - термокарстовое озеро, бур. площадка «Ока»	1,3	1,31	0,690	нпо	нпо	нпо	0,007
<b>255</b>	Термокарстовое озеро 3, ложбина, бур. площадка «Ока»	4,4	0,243	0,380	нпо	нпо	нпо	0,011
<b>с43</b>	стакан для снаряда, бур. площадка «Вятка»	16,6	0,715	0,250	нпо	нпо	нпо	нпо
<b>с431</b>	озеро, бур. площадка «Вятка»	3,6	0,173	0,114	нпо	нпо	нпо	нпо
<b>89</b>	стакан для снаряда, бур. площадка «Шексна»	0,3	0,064	0,051	нпо	нпо	нпо	0,003
<b>105</b>	Термокарстовое озеро 1, бур. площадка «Шексна»	0,5	26,4	0,043	0,0015	0,03	0,0066	0,056
<b>106</b>	Термокарстовое озеро 2, бур. площадка «Шексна»	0,2	12,6	0,026	0,0022	0,018	0,0014	0,019

нпо – ниже предела обнаружения

элементов очень низкая способность к водной миграции, в нормальных окислительных условиях они быстро осаждаются в виде комплексных гидроксидных соединений. Вопрос о появлении этих редких элементов и металлов в поверхностных водах буровых площадок ПЯВ мы обсудим чуть позже.

Кроме этих редких элементов с помощью ICP-MS выявлено, что в поверхностных водах буровых площадок ПЯВ наблюдаются резкие скачки содержания U до 20 раз – максимально до 1.8 мкг/л при его среднем содержании в речной воде района ~ 0.09 мкг/л. Вода в термокарстовом озере площадки объекта «Шексна» резко обогащена изотопом  $^{235}\text{U}$  при валовой концентрации урана в 0.94 мкг/л, и это привело к смещению изотопного соотношения  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  с обычного природного, равного 137.88, до 128 (табл.33). По нашему мнению, данное явление обусловлено просачиванием радиоактивных флюидов из полости взрыва, где среди особых ядерных отходов вполне логично ожидать наличие оружейного урана-235 с напорными подземными рассолами по ослабленной проницаемой зоне вокруг боевой скважины.

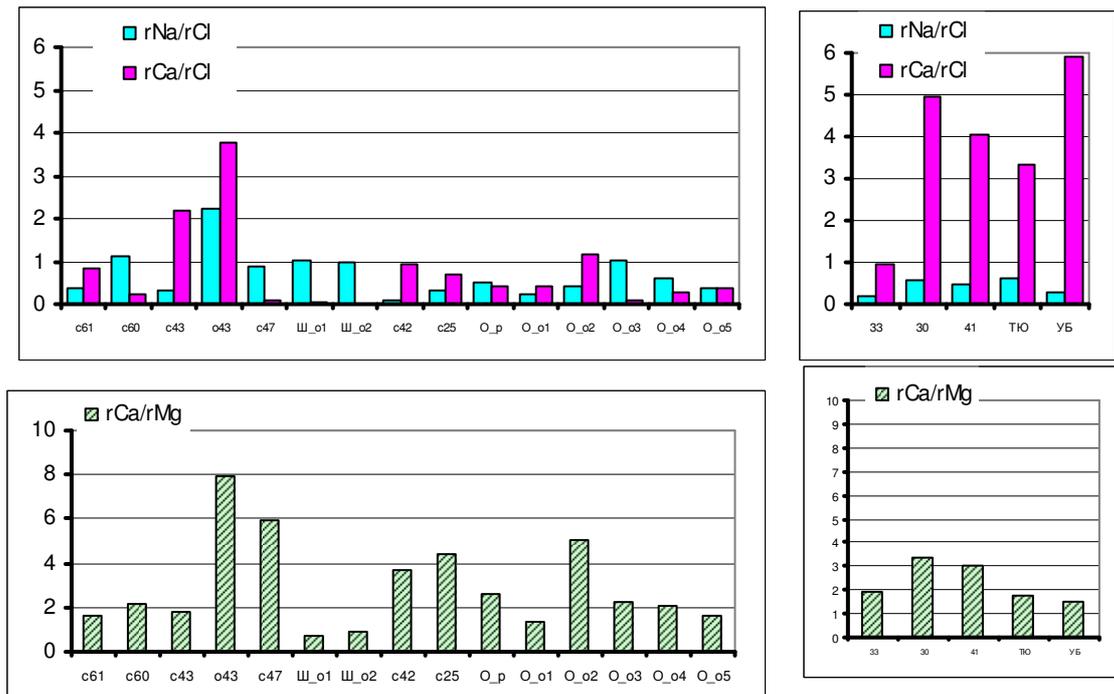
Итак, вернемся к рассмотрению вопроса о появлении редких элементов в поверхностных водах буровых площадок МПЯВ. Здесь мы зафиксировали не свойственные природным поверхностным водам СБНГКМ высокие концентрации урана, урана-235, а также редких Y, Be, редкоземельного La, металлов Cr, Co, Ni и других. Известно, что подземные рассолы обогащены Li, Sr, Rb, K, J, Br, B, Mn, Ca, Mn [Анциферов, 1989, 2004]. Необходимо допустить, что целый ряд других микроэлементов изначально содержится в подземных рассолах в силу их морского происхождения (галогенеза). Но выявленный в поверхностных водах буровых площадок МПЯВ комплекс редких элементов и металлов Co, Cr, Cu, Ni, Ti, V, Zn, Be, La, Y не совсем совпадает с вышеприведенной геохимической группой элементов, связанных с рассолами. Сделано предположение, что возможен дополнительный захват микроэлементов из вмещающей среды в силу высокой ионной силы рассолов, в т.ч. из остатков конструкций боевой скважины и ЯВУ (агрессивность подземных рассолов к инженерным конструкциям – одна из технических проблем при добыче алмазов). Известно, что обычно в боевых ЯВУ использовался шар из металлического Be с Y- $^{238}\text{Pu}$  покрытием в качестве импульсного нейтронного инициатора (урчина) – первичного источника нейтронов для резкого снижения критической массы и ускорения начала реакции (сперва вместо  $^{238}\text{Pu}$  использовали  $^{209}\text{Po}$ ). Урчина срабатывает в момент перевода боевого ядра в сверхкритическое состояние (при сжатии происходит смешение  $^{238}\text{Pu}$  и бериллия с выбросом большого количества нейтронов). Высокая активность  $^{238}\text{Pu}$ , часто превышающее активность  $^{239, 240}\text{Pu}$  в поверхностных водах районах МПЯВ (табл.3) усиливает предположение авторов о техногенном происхождении Y, Be, обнаруженных в пробах воды

районов МПЯВ. То есть источником Be, Y, скорее всего, являются именно остатки от ЯВУ, а металлов Co, Cr, Ti, V – металлические конструкции боевых скважин. Полученные геохимические данные и изотопное соотношение Pu (среднее соотношение  $^{238}\text{Pu}/^{239, 240}\text{Pu}$  в поверхностных водах равно 1.59, максимально – 2.75) заставляет думать, что для камуфлетных МПЯВ применяли боевые ЯВУ или близкие в таковом с большим нейтронным фактором. Лантаноиды – это типичные продукты распада осколочной активности, но они также в каких то количествах должны содержаться в подземных рассолах, есть первые данные об этом [Вахромеев, 2008].

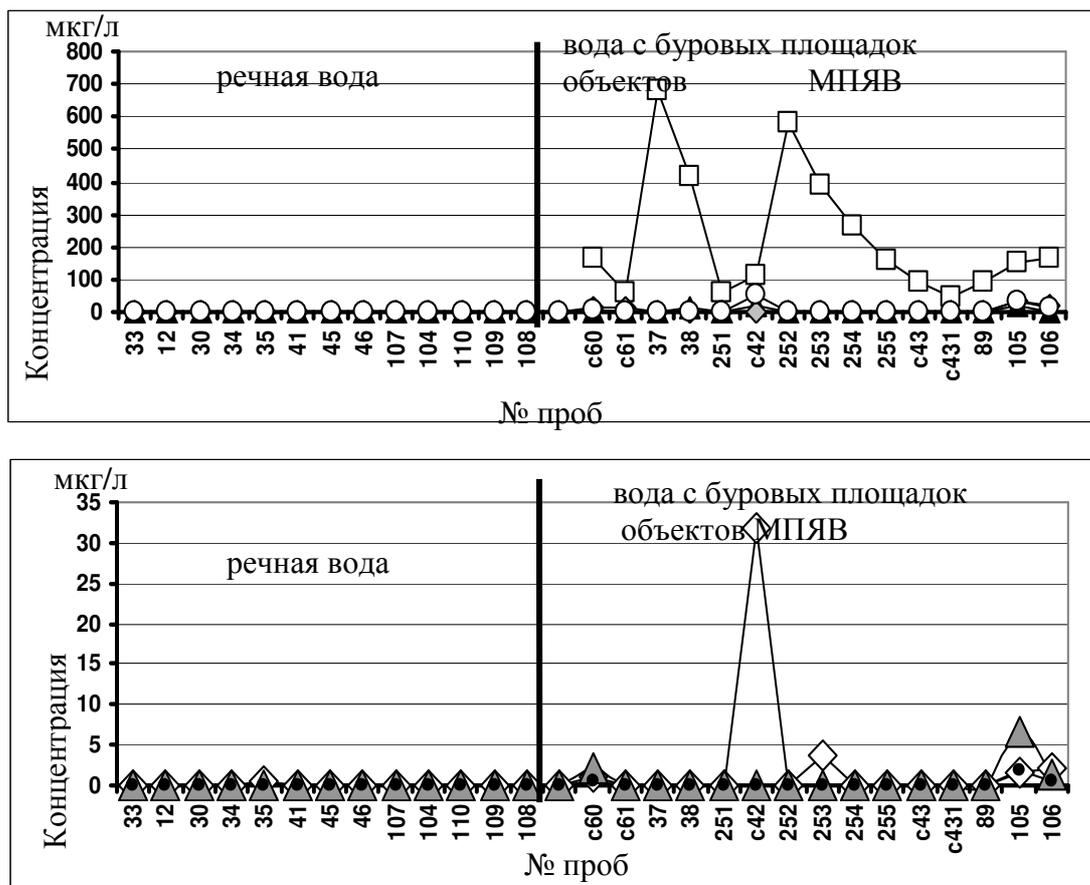
На примере проб воды площадок объектов «Ока», «Нева-3», «Шексна», показано, что техногенно ослабленные прискважинные зоны являются несомненными самыми короткими проводящими путями для выхода радионуклидов на дневную поверхность. Но, анализ полученных нами радиоэкологических данных говорит о том, что есть еще и другие геоструктуры, которые служат проводниками для массопереноса радионуклидов в геологической среде и выхода радиоактивности на поверхность земли.

Таким образом, на основе радиоэкогеохимического изучения поверхностных вод СБНГКМ выявлено, что, несмотря на штатный режим поведения ПЯВ, геотехногенные системы «полость взрыва – вмещающая геологическая среда – дневная поверхность» являются открытыми системами. Из полостей взрывов по ослабленной зоне вокруг боевых скважин ПЯВ на поверхность земли поступают техногенные радионуклиды, и их активность в поверхностных водах ослабленных зон вокруг устья боевой скважины достигают:  $^3\text{H}$  – 170 Бк/л, U – 1.8 мкг/л, концентрации микроэлементов (мкг/л): Co – 19, Ni – 150, Ti – 31.7, V – 30, Cr – 54, La – 7, Y – 6.6, Be – 1.9. Соотношение  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  в поверхностных водах в пределах ослабленных зон боевых скважин ПЯВ снижено до 128 вместо природного 138 из-за увеличенной доли 235-го изотопа.

Проведенные исследования показали, что наличие многослойных соляных пластов в геологической среде не обеспечивает в полной мере выход подземной активности из полостей МПЯВ на поверхность. В существующих условиях СБНГКМ соляные пласты не обеспечивают полную изоляцию техногенных радионуклидов в полостях МПЯВ, и использование геологической среды СБНГКМ в качестве места геологического захоронения РАО требует дальнейшего исследования.



**Рис.75.** Соотношение  $rNa/rCl$  и  $rCa/rCl$  в пробах поверхностных водах площадок ПЯВ (а) и в речной воде СБГКМ (б) (см.табл.32).



**Рис 76.** Содержание элементов в пробах воды района СБНГКМ (мкг/л): 1 – Co; 2 – Cr; 3 – Ti; 4 – V; 5 – Y; 6 – Be; 7 – La.

#### 5.4. ВЫВОДЫ

1. Механическое разрушение горных пород при ПЯВ: появление зоны дробления, зоны трещинообразования вокруг полости взрыва, столба обрушения над полостью взрыва, у поверхности земли – откольной зоны с «талыми окнами» в многолетнемерзлом слое сформировали вертикально- ориентированную флюидопроницаемую ослабленную зону вокруг боевых скважин радиусом примерно 200 м, через которую идет выход радионуклидов и сопутствующих элементов на поверхность земли.

Каждый участок ослабленной зоны количественно охарактеризована физическими эмпирическими формулами и параметрами удельного электрического сопротивления пород. На поверхности земли ослабленная зона вокруг боевой скважины охарактеризована геохимическими параметрами – количественным содержанием хлоридов  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , техногенных радионуклидов и сопутствующих элементов в поверхностных водах и донных отложениях.

2. На объекте ПЯВ «Кристалл» верхний слой, соответствующий ранним временам ( $t < 2$  мс) регистрации при зондировании методом переходных процессов с измеренными кажущимися удельными электрическими сопротивлениями от 52 до 690 Ом·м интерпретирован как слой многолетнемерзлых пород. При этом породы с  $\rho_1 \gg 100$  Ом·м отнесены к сохранным мерзлым породам, а с  $\rho_1 < 100$  Ом·м – к деградировавшим «отепленным влажным», среди которых участки пород с  $\rho_1 \leq 50$  Ом·м условно отнесены к талым.

В пределах ослабленных зон вокруг боевых скважин, расположенных на низких склонах речных долин, наблюдается деградация многолетней мерзлоты, которая проявляется снижением удельного электрического сопротивления ( $< 100$  Ом·м), уменьшением его мощности и развитием термокарстового полигонально-холмистого «байджарахового» рельефа.

3. С помощью ЗМПП на объекте «Кристалл» выявлено локальные поднятие на 260–300 м напорных подземных рассолов по ослабленной зоне вокруг боевой скважины.
4. На площадках ПЯВ в пределах ослабленной зоны вокруг боевых скважин выявлены соленые хлоридные поверхностные воды (с минерализацией, как правило, выше 1 г/л) в отличие от пресных гидрокарбонатных, гидрокарбонатно-сульфатных поверхностных вод, характерных для этих районов.
5. В поверхностных водах, донных отложениях в пределах ослабленных зон вокруг боевой скважины (радиусом до 200 м) выявлены техногенные радионуклиды и сопутствующие элементы: а) активности техногенных радионуклидов:  $^3\text{H}$  – в 2-34 раза (до 170 Бк/л),  $^{90}\text{Sr}$  – в 2-16 (до 2 Бк/л в воде),  $^{239+240}\text{Pu}$  – в 10-25 (до 0.26 Бк/л)

выше регионального фонового уровня; б) концентрации лантаноидов, Y, Co, Be и других редких металлов в несколько раз по сравнению с местным фоновым уровнем; кроме того снижается изотопное отношение  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  до 126.80 (вместо естественного 138). Вместе с тем автор отмечает, что выявленные активности радионуклидов, как правило, намного ниже опасных уровней УВ, определяемых существующими нормами радиационной безопасности. Эти техногенные радионуклиды являются индикаторами выхода подземных радиоактивных веществ на поверхность земли по системе «полость взрыва – ослабленная зона вокруг боевой скважины – поверхность земли».

6. Наличие многослойных соляных пластов, отличающихся пластичностью, способностью самозалечивания трещин, в геологической среде СБНГКМ в полной мере не обеспечивает изоляцию подземной активности объектов МПЯВ, потому наблюдается выход техногенных радионуклидов и сопутствующих элементов на поверхность земли вместе с напорными подземными рассолами.

## Глава 6. Естественные флюидопроницаемые геоструктуры: тектонические разломы, подземные водоносные горизонты, контактные зоны магматических тел, как проводники подземной радиоактивности

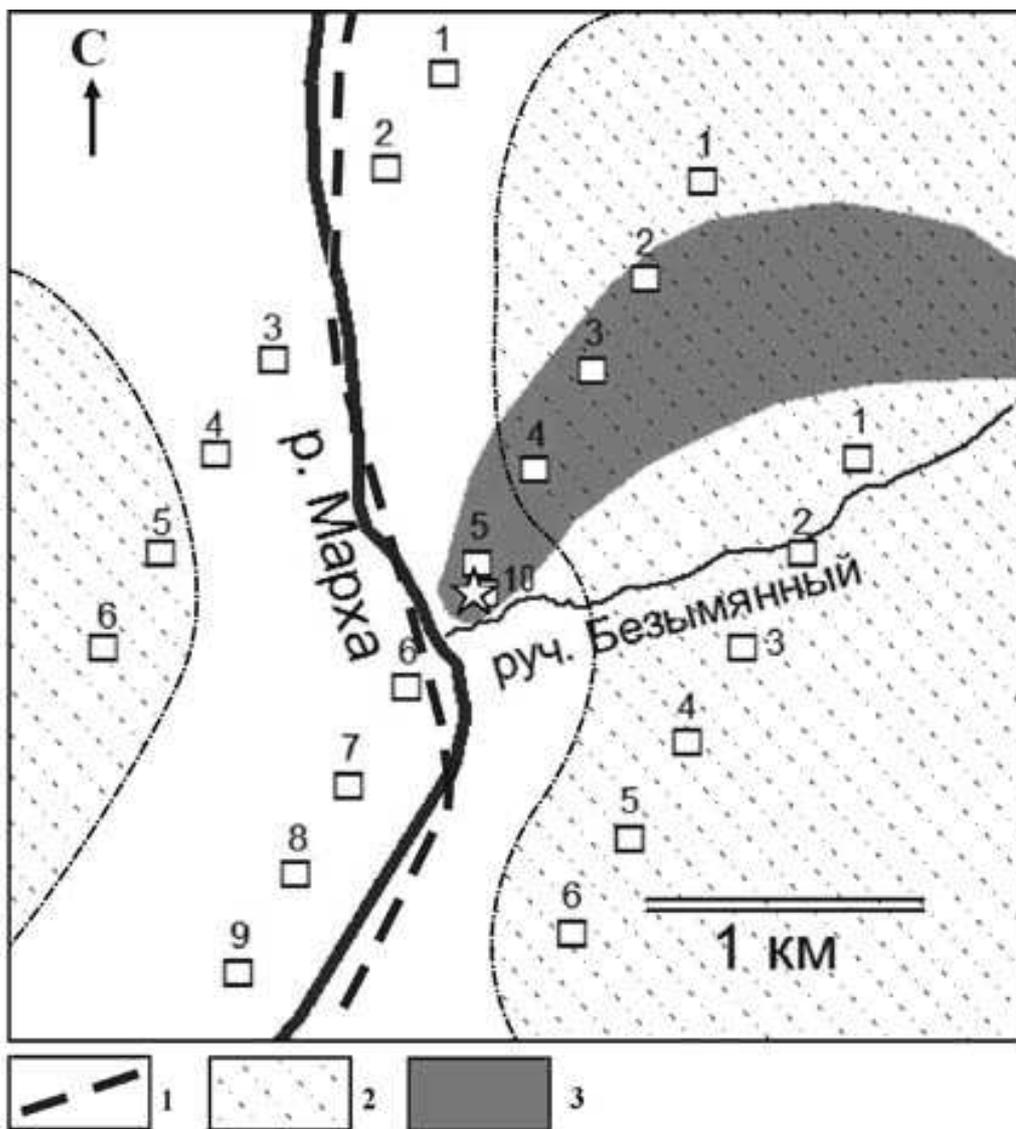
### 6.1. Флюидопроницаемая геоструктура тектонического разлома на примере района ПЯВ «Кратон-3» по данным геофизического зондирования методом переходных процессов

Известно, что аварийный ПЯВ «Кратон-3» расположен рядом с тектоническим разломом [Микуленко и др., 2006] (рис.21). Для изучения влияния тектонического разлома на геотехногенную систему объекта ПЯВ «Кратон-3» соискателем была поставлена задача создать электромагнитную модель геологической среды объекта с применением электромагнитных зондирований методом переходных процессов.

Наличие многолетней мерзлоты и подземных водоносных горизонтов, насыщенных рассолами, обуславливают высокую геоэлектрическую контрастность местной геологической среды. Мерзлым и сухим породам присуще высокое удельное электрическое сопротивление (УЭС), водонасыщенным слоям – низкое, а слоям с высокоминерализованными рассолами, являющихся природными электролитами, – очень низкое. Поэтому для изучения геоэлектрического разреза в районе ПЯВ «Кратон-3» выбран метод переходных процессов, хорошо зарекомендовавший себя при изучении района ПЯВ «Кристалл» [Артамонова и др., 2012, Кожевников и др., 2012]. В августе 2008 г. проведены электромагнитные зондирования методом переходных процессов (ЗМПП) на участке «Кратон-3» по трем субмеридиональным (азимут 26°) параллельным профилям, отстоящим друг от друга на 1 км. Самый протяженный 3300 м - центральный профиль проходит через эпицентр ПЯВ (рис. 77), боковые профили короче: восточный – 2000 м, западный - 2400 м.

Измерялась ЭДС в приемной петле, приведенная к току в генераторной, затем рассчитывалось кажущееся УЭС  $\rho_{\tau}$  (в Ом·м) по формуле: 
$$\rho_{\tau}(t) = \left[ \frac{IS_g S_u}{e(t) 20\pi \sqrt{\pi}} \right]^{2/3} \left( \frac{\mu_0}{t} \right)^{5/3},$$

где  $t$  – время, с;  $S_g$  и  $S_u$  – соответственно, площадь генераторной и измерительной петель, м<sup>2</sup>;  $e(t)$  – ЭДС, индуцируемая в приемной петле, В;  $I$  – ток в генераторной петле, А;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная проницаемость вакуума [Кауфман, Морозова, 1970].



**Рис.77. Расположение профилей ЗМП и № пикетов на объекте МПЯВ «Кратон-3».**  
*Примечание:* звездочкой показано устье боевой скважины. Условные обозначения: 1–предположительная зона тектонического разлома; 2 – поле распространения многолетнемерзлых пород с высоким УЭС (экстраполяция), 3 - сухостойный лес, погибший вследствие прорыва радиоактивности при взрыве.

Справа приведены варианты геоэлектрических моделей, т.е. распределения УЭС по глубине. Относительное среднеквадратичное расхождение между измеренными и модельными данными для 1-го варианта (рис.78, б) составило 4% и 5 % соответственно. На основании представления о геологическом строении района [Микуленко и др., 2006, Алексеев, 2009] в кровле высокопроводящего слоя ЛЗ большой мощности, соответствующего по положению в разрезе известнякам и доломитам маркокинской и мархинской свит верхнего кембрия (рис.19), выделен маломощный горизонт С1 с очень низкими УЭС. Благодаря введению слоя С1 среднеквадратичное расхождение между измеренными и модельными данными уменьшилось в 1.5 раза.

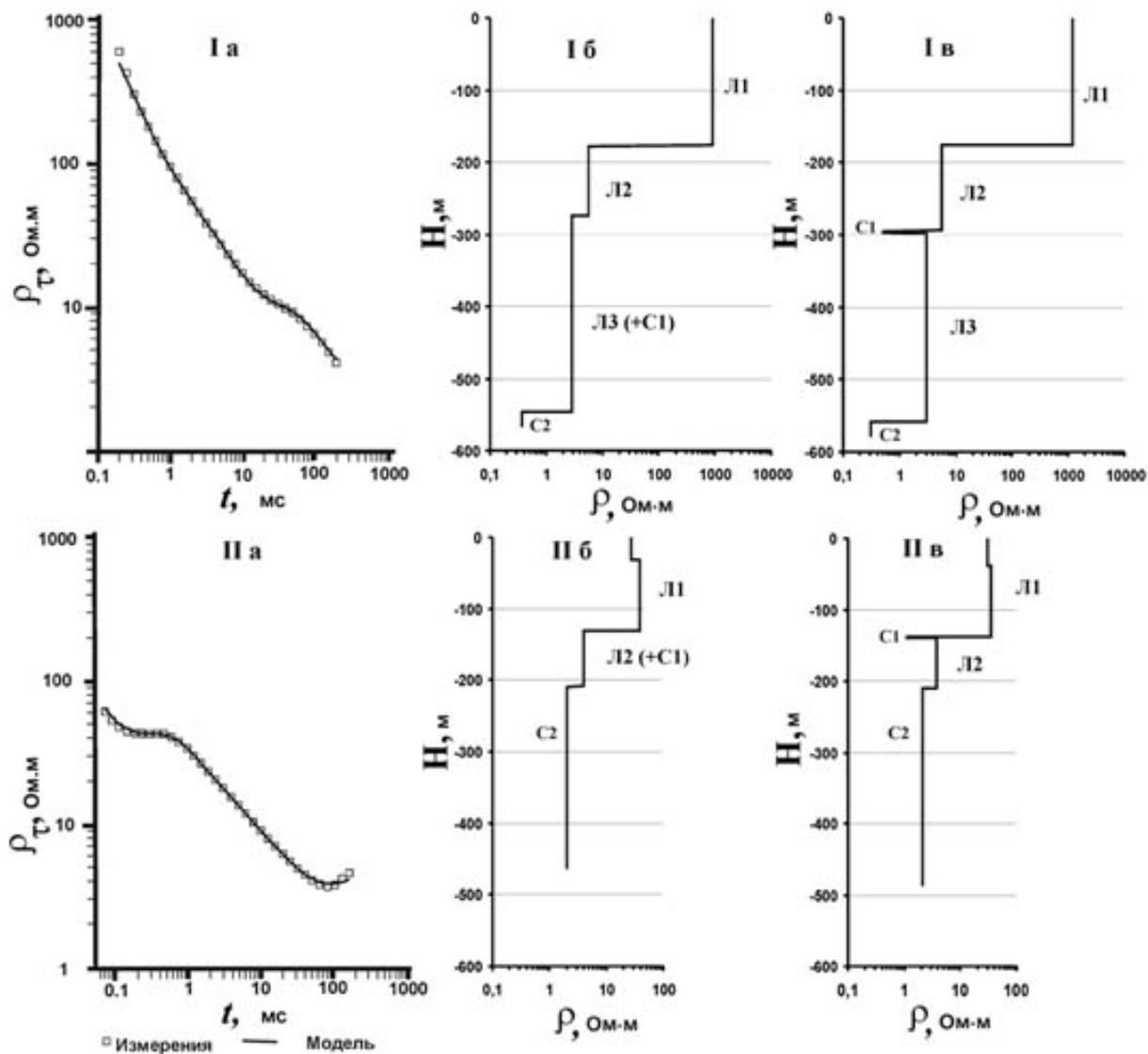


Рис.78. Измеренные и модельные кривые кажущегося удельного сопротивления ( $\rho_{\tau}$ )(а) и геоэлектрические модели (б – первый вариант, в – второй вариант): I – в 1 км к востоку от эпицентра ПЯВ «Кратон-3»(пикет № 3 восточного профиля), II – в эпицентре (пикет №10 центрального профиля).

*Примечание:* сокращенные названия геоэлектрических слоев приведены в таблице.

Этот тонкий слой мы соотнесли с верхнекембрийским маловодным водоносным горизонтом, содержащим рассолы.

Кривые кажущегося удельного электрического сопротивления  $\rho_{\tau}$ , измеренные на 22-х пикетах трех профилей (рис.79), характеризуются как общими чертами, так и отличиями. Обращает на себя внимание тот факт, что кривые  $\rho_{\tau}$  восточного профиля, расположенного на водоразделе по правому борту р. Марха (рис.77), наиболее однообразны (рис.79, а). Здесь кривые  $\rho_{\tau}$  на ранних временах расходятся совсем немного, а на поздних временах идентичны друг другу.

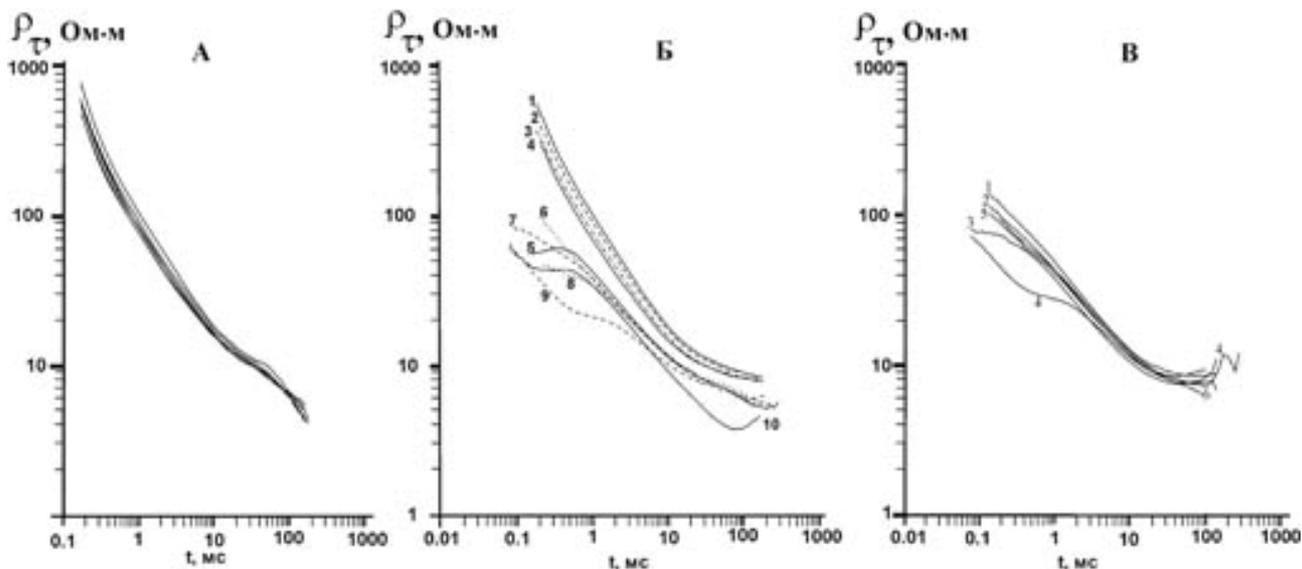
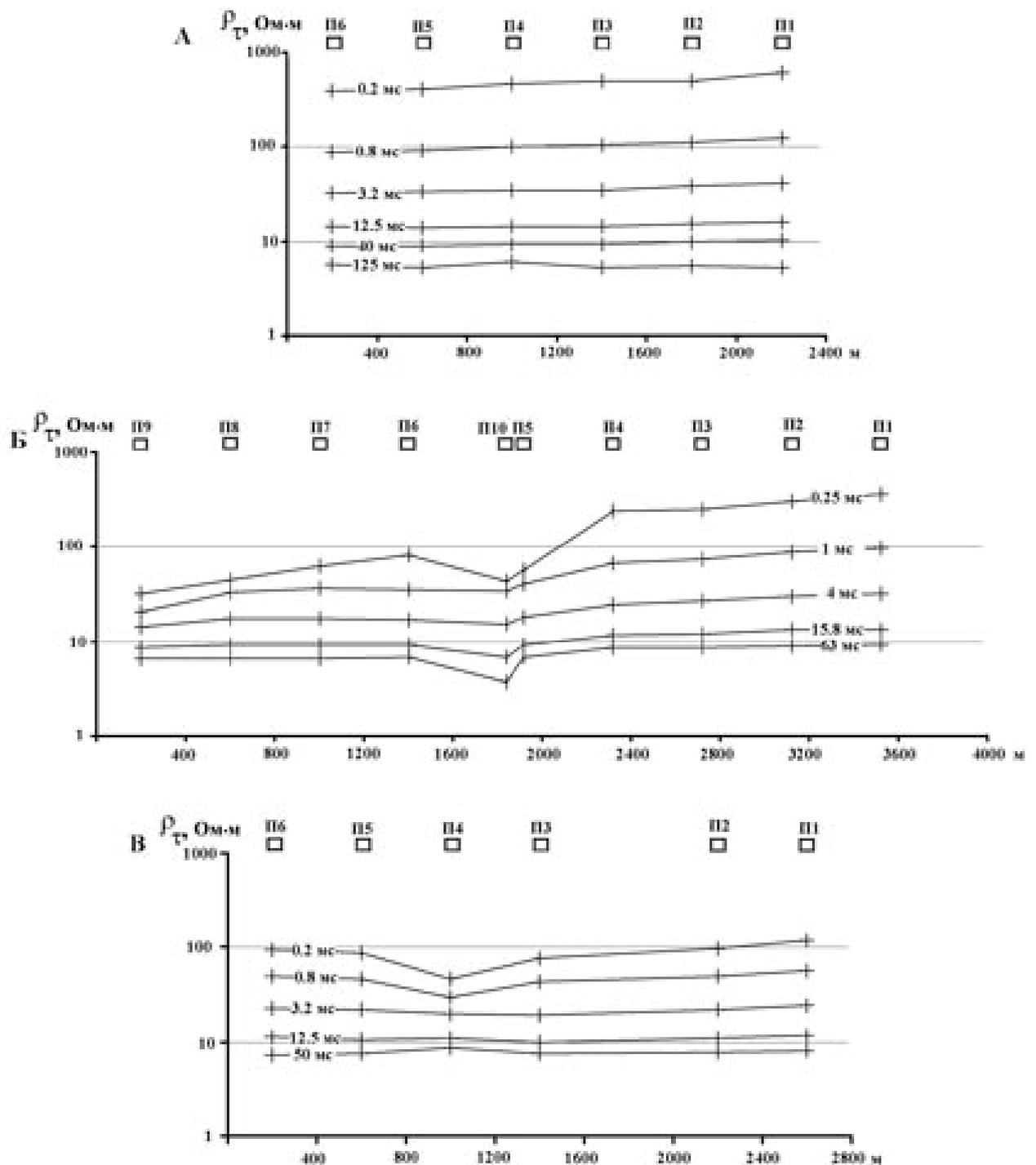


Рис.79. Кривые кажущегося удельного сопротивления  $\rho_{\tau}$ , измеренные на восточном (а), центральном (б), западном (в) профилях.

На самых ранних временах ( $t < 0.2-0.3$  мс) кривые  $\rho_{\tau}$  указывают на очень высокие УЭС. Кривые  $\rho_{\tau}$  на временах около 10 мс практически сливаются. Здесь на отрезке времен 10- 30 мс нами выделен переходный второй слой с низкими УЭС. На временах  $t \sim 30-100$  мс выделяется третий слой с еще более низким удельным сопротивлением. Поскольку на самых поздних ( $t > 100$  мс) временах наклон кривых  $\rho_{\tau}$  усиливается, это свидетельствует о том, что в основании разреза залегают породы с очень низкими значениями УЭС. В данном случае применимо слово «угадывается», поскольку низкие уровни сигналов на поздних временах допускают большие погрешности в трактовке результатов.

На рис. 80 результаты ЗМПП представлены в виде графиков профилирования  $\rho_{\tau}$ . На временах около 10 мс графики  $\rho_{\tau}$  сближаются (рис.80, а), что указывает на присутствие в разрезе горизонтальной границы, разделяющей вышележащие высокоомные и подстилающие их низкоомные породы.

В целом графики  $\rho_{\tau}$  на всем протяжении *восточного профиля* ровные, что свидетельствует о латерально-однородном геоэлектрическом строении геологической среды этого участка. В целом, геоэлектрический разрез *восточного профиля* соответствует модели  $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$ , где  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$  – УЭС выделенных слоев с нумерацией сверху,  $\rho_4$  – УЭС основания. Кривые  $\rho_{\tau}$  *центрального профиля* образуют две группы (рис.79, б). Кривые четырех пикетов с №№1–4 северного фланга, расположенных на водоразделе, подобны



**Рис.79.** Графики  $\rho_{\tau}$  (на разных временах) вдоль восточного (а), центрального (б), западного (в) профилях: П1-П10 – пикеты ЗМПП и их номер, по оси X - расстояние в м.

кривым  $\rho_{\tau}$  восточного профиля и похожи между собой, но отличаются от остальных кривых данного профиля. На ранних временах ( $t < 0.2-0.3$  мс) породам присущи высокие УЭС в отличие от других кривых профиля, но по сравнению с УЭС восточного профиля – заметно более низкие. От пикета №1 к пикету №4 уровни кривых  $\rho_{\tau}$  на ранних временах ( $t \leq 10$  мс) последовательно снижаются, то есть на этом отрезке профиля от водораздела по направлению к долине реки наблюдается тренд снижения значений  $\rho_{\tau}$ .

На временах около 10 мс, что соответствует эффективным глубинам порядка 200 м, кривые  $\rho_t$  сгущаются, что указывает на присутствие здесь горизонтальной границы, разделяющей вышележащие высокоомные от нижележащих низкоомных пород. На поздних временах ( $t > 100$  мс) хвостовая часть кривых  $\rho_t$  не уходит круто вниз, а продолжает выполаживаться, что указывает на то, что УЭС основания здесь несколько выше, чем на *восточном профиле*.

Кривые  $\rho_t$  на остальных пикетах (№№ 5-10) *центрального профиля* весьма разнообразны, но в целом, характеризуются существенно более низкими значениями УЭС. На самых ранних временах ( $t \leq 0.25$  мс) на двух соседних пикетах (№5 и №10) отмечается аномальное понижение кажущегося сопротивления. В целом, за исключением аномальных кривых  $\rho_t$  пикетов №№5, 10, по направлению с севера на юг на ранних временах наблюдается тренд снижения УЭС, что хорошо видно на графиках профилирования  $\rho_t$  (рис.80, б). На пикете № 9 на временах с 0.15 до 0.6 мс кривая  $\rho_t$  резко снижается (рис.48, б). На более поздних ( $t \geq 4$  мс) временах кривые  $\rho_t$  сближаются, т.е. ширина аномалии  $\rho_t$  уменьшается с глубиной, за исключением пикета №10 - здесь продолжается аномальное понижение кажущегося сопротивления, правда, в хвостовой части кривая  $\rho_t$  отклоняется вверх и приближается к другим кривым  $\rho_t$ . В целом, центральная часть профиля (у эпицентра ПЯВ) характеризуется очень низкими  $\rho_t$ . Значительная изменчивость кривых  $\rho_t$  для *центрального профиля* указывает на сложное неоднородное латеральное строение геологической среды на этом участке.

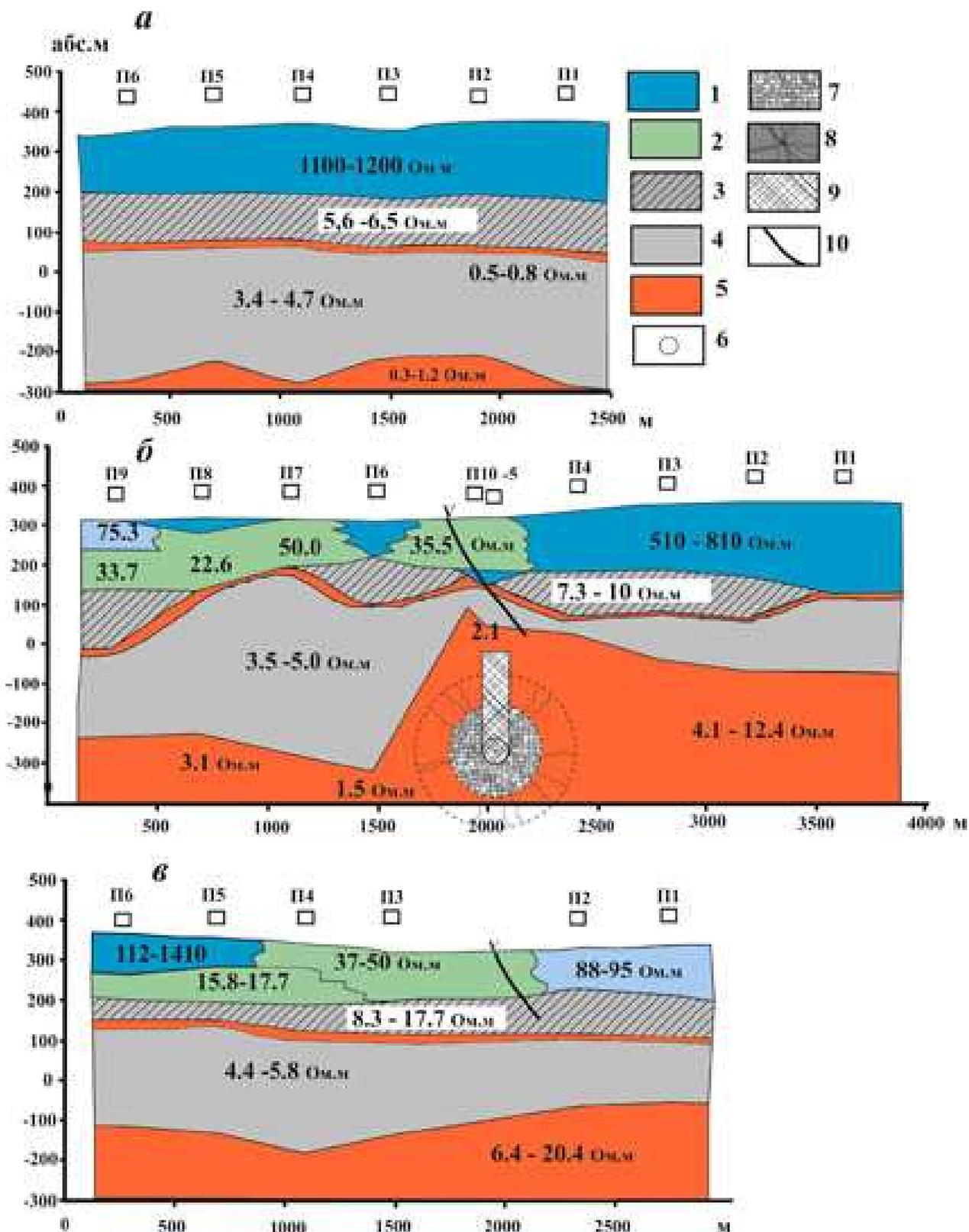
Кривые  $\rho_t$  *западного профиля* похожи друг на друга (рис.79, в), за исключением кривых  $\rho_t$ , измеренных на пикетах №3 и 4. Эти пикеты расположены на левом берегу р. Марха. Уровни кривых  $\rho_t$  на этих двух пикетах на ранних временах заметно ниже остальных, что указывает на более низкие УЭС в верхней части разреза этого участка. В целом, на ранних временах ( $t < 0.2-0.3$  мс) уровни кривых  $\rho_t$  *западного профиля* низкие и кажущиеся УЭС в ~ 10 раз меньше по сравнению с *восточным профилем*. Кроме того, на поздних временах ( $t > 100$  мс) характерны восходящие правые ветви кривых  $\rho_t$ , что указывает, наоборот, на более высокие значения УЭС в основании разреза по сравнению с *восточным профилем*. Полученное на поздних временах необычно высокое сопротивление  $\rho_t$ , равное 1960 Ом·м, на пикете №4, скорее всего, вызвано влиянием локальной двух- или трехмерной неоднородности. Графики профилирования  $\rho_t$  снижаются и сближаются на пикете №4 (рис.80, в), что указывает на аномальное строение геологической среды у этого пикета.

Если отвлечься от деталей, геоэлектрическое строение геологической среды района ПЯВ «Кратон-3» на всех участках – разумеется, речь идет о глубинах, достигнутых с помощью ЗМПП (~ 500 м или до –200 м.абс., на отдельных пикетах до глубины ~ 640 м глубины или до ~ –300 абс.м.) описывается четырехслойной моделью типа QQ с высокопроводящим основанием:  $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$  ( $\rho_4$  – основание) (рис.78, б). От ранних к поздним временам (или с возрастанием глубины) в геологическом разрезе наблюдается уменьшение УЭС слоев (или увеличивается их электропроводность), хотя сами значения УЭС слоев и диапазон их изменения – разные.

Для каждой кривой  $\rho_t$  путем решения обратной задачи была подобрана оптимальная горизонтально-слоистая модель, состоящая из 4-х слоев с определенными значениями УЭС и мощностью (табл.35). Наиболее ярко четырехслойное строение геологической среды проявляется на *восточном профиле*, где в верхнем слое значения УЭС самые максимальные – 1100 - 1200 Ом·м, а с глубиной здесь наблюдается скачкообразный рост электропроводности слоев. Здесь при переходе от первого слоя  $\rho_1$  ко второму  $\rho_2$  сопротивление падает в среднем на два порядка: с ~1000 до 5.6–6.9 Ом·м, т.е. контраст по удельному электрическому сопротивлению очень большой. УЭС высокопроводящего третьего слоя  $\rho_3$  здесь оценивается примерно в 2.4-4.1 Ом·м, а УЭС основания  $\rho_4$  от 0.3 до 0.7 Ом·м. Поэтому приведенное выше неравенство следует «подправить»:  $\rho_1 \gg \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$ ; в такой записи оно подходит для всех трех профилей.

Попытаемся дать геологическое истолкование геоэлектрических моделей. Первый слой с высоким удельным электрическим сопротивлением  $\rho_1$ , проявленный на всех пикетах, нами интерпретируется как слой многолетнемерзлых пород и назван Л1. Следует заметить, что с учетом изменения абсолютных высот по профилю подошва слоя Л1 (с учетом массивов талых пород) залегает практически горизонтально, то есть слой Л1 характеризуется выдержанностью (рис.81).

При анализе массива значений УЭС слоя Л1 обращает на себя внимание тот факт, что его можно разбить на два подмассива или группы. В одну группу попадают сопротивления, не превышающие 100 Ом·м, тогда как в другую – значительно превосходящие этот порог и в целом «тяготеющие» к величине  $\rho_1 = 10^3$  Ом·м. Чем можно объяснить столь значительные отличия удельного сопротивления одного и того же слоя, сложенного карбонатными породами? Единственно возможное объяснение, по нашему мнению, заключается в том, что породы верхней части геологической среды, попадающие в первую группу ( $\rho_1 < 100$  Ом·м), находятся в талом, тогда как породы второй группы ( $\rho_1 \gg 100$  Ом·м) – в мерзлом состоянии. Разность температур Л1 и степени их увлажненности обуславливают гетерогенность поля



**Рис.81.** Мерзотно-гидрогеологическая модель района объекта ПЯВ «Кратон» на восточном (а), центральном (б), западном (в) профилях. Условные обозначения: 1 – многолетнемерзлые породы; 2 – участки деградировавшей многолетней мерзлоты с более теплыми и влажными (талыми?) породами; 3 – подмерзлотные сухие (морозные) нижнеордовикские известняки и доломиты; 4 – верхнекембрийские влажные (охлажденные) породы; 5 – подземный водоносный горизонт, насыщенный рассолами; зоны механического воздействия ПЯВ на вмещающую геологическую среду приведены в соответствии с вертикальным масштабом схемы (6-9): 6 – полость взрыва; 7 – зона дробления; 8 – зона радиальной трещиноватости; 9 – столб обрушения, 10 – предположительная плоскость тектонического разлома. П1-П10 – пикет и его номер, буквой V – показано русло реки Марха, по оси X - расстояние в м.

**Таблица 37. Мощности (м) и удельные электрические сопротивления (Ом·м) слоев, выявленных методом переходных процессов в районе ПЯВ «Кратон-3»**

П	Н	В.Д.	С.Ш.	Л1 ( $\rho_1$ )	Л2 ( $\rho_2$ )	С1 ( $\rho_{3-1}$ )	Л3( $\rho_{3-2}$ )	С2 ( $\rho_4$ )
<b>Восточный профиль</b>								
П1	376.2	112.3622	65.9307	200 (1100)	123 (6.3)	8 (0.8)	320 (4.7)	(1.2)
П2	370.1	112.3583	65.9275	180 (1120)	119 (6.4)	4.4 (0.7)	270 (3.6)	(0.6)
П3	354.6	112.3543	65.9243	176 (1200)	118 (5.6)	3(0.5)	260 (3.0)	(0.3)
П4	367.2	112.3504	65.9211	170 (1140)	125 (6.5)	3 (0.6)	340 (3.6)	(0.8)
П5	361.2	112.3464	65.9179	164 (1150)	120 (6.3)	2.4 (0.6)	290 (3.5)	(0.8)
П6	355.3	112.3425	65.9147	162 (1150)	130 (6.4)	2.3 (0.6)	330 (4.0)	(1.2)
<b>Центральный профиль</b>								
П1	363.4	112.3273	65.9421	147 (510) 71 (400)	-----	2.3 (0.5)	28.6 (65.0)	(4.9)
П2	360.0	112.3234	65.9389	175 (810)	108 (8)	2.9 (0.7)	140 (4.7)	(7.5)
П3	355.7	112.3196	65.9357	158 (730)	105 (7.7)	2.2 (0.6)	121 (4.5)	(6.6)
П4	340.3	112.3157	65.9325	149 (680)	115 (7.3)	2.1 (0.6)	33.5 (3.8)	(6.1)
П5	318.5	112.3118	65.9293	125 (46) 24 (630)	-----	2.2 (1.1)	110 (5.0)	(4.1)
П10	317.8	112.3099	65.9276	39 (30) 99 (35.5)	-----	2.2 (1.1)	69 (3.8)	279 (2.1)
П6	313.0	112.3080	65.9260	80 (780)	120 (10)	2.1 (0.4)	434 (4.6)	(1.5)
П7	315.6	112.3041	65.9228	5.2 (73.0) 100 (50.0)	-----	2.0 (1.6)	51 (19.8)	(4.4)
П8	322.6	112.3002	65.9196	25.6 (140) 145 (22.6)	-----	2.2 (0.9)	369 (4.0)	(3.1)
П9	323.0	112.2964	65.9164	75 (75.3) 100 (33.7)	144 (33.7)	2.0 (0.5)	(11.7)	
<b>Западный профиль</b>								
П1	332.9	112.3273	65.9421	123 (88)	92 (9.7)	2.0 (0.5)	166 (4.9)	(8.7)
П2	321.5	112.3234	65.9389	98 (95)	96 (12.5)	2.0 (0.5)	184 (4.8)	(6.6)
П3	313.4	112.3157	65.9325	111 (53)	82 (8.3)	1.9 (0.4)	243 (4.7)	(20.4)
П4	336.3	112.3118	65.9293	41.4 (37.0) 105 (17.7)	64 (17.7)	3.9 (0.4)	300 (5.8)	(1960)
П5	351.2	112.3079	65.9260	61 (1410) 80 (17.4)	43 (17.4)	2.0 (0.6)	295 (4.6)	(16.0)
П6	358.9	112.3040	65.9228	82 (112) 58 (15.8)	54 (15.8)	1.3 (0.5)	270 (4.4)	(6.4)

*Примечание:* П – № пикета, Н – высота над уровнем моря, абс.м; географические координаты пикета: В.Д. - восточная долгота, градусы; С.Ш. – северная широта, градусы.

Геологическая интерпретация выявленных геоэлектрических слоев: Л1 – многолетнемерзлые нижнеордовикские породы с тальми участками; Л2 – сухие подмерзлотные (морозные) нижнеордовикские породы; С1 – верхнекембрийский водоносный горизонт с рассолами; Л3 – верхнекембрийские влажные (охлажденные) породы; С2 – I среднекембрийский водоносный горизонт с рассолами.

\* - мощность геоэлектрического слоя, м; \*\* – удельное геоэлектрическое сопротивление пород этого слоя, Ом·м (в скобках).

УЭС в пределах этого слоя: от сильно замороженных на *восточном профиле* до талых на *западном профиле* и южном фланге *центрального профиля*.

Анализ распространения многолетнемерзлых пород слоя Л1 указывает на их ландшафтную приуроченность. На водоразделах (приводораздельных высоких склонах) по правому борту р. Марха – на *восточном* и северном фланге *центрального профилей*

мощность Л1 - слоя многолетнемерзлых пород составляет ~160 - 200 м, при этом УЭС меняются в пределах от ~680 до 1200 Ом·м. По мере приближения к долине реки наблюдается снижение мощности Л1 с ~ 200 до 150 м как на *восточном профиле*, так и на северном фланге *центрального профиля*. Кроме того на отрезке *центрального профиля* от пикета №1 до пикета №4 наблюдается снижение УЭС многолетнемерзлых пород с ~ 800 до ~600 Ом·м (табл.37, рис.79-81). Участки многолетнемерзлых пород Л1 с высокими УЭС (до 1410 Ом·м) наблюдаются также на высоких склонах левого борта р. Марха – на южном фланге *западного профиля*.

Итак, по высоким (приводораздельным) бортам р. Марха мы видим хорошую сохранность многолетнемерзлых пород, которым присущи большие мощности и очень высокое электросопротивление, что позволило оконтурить поля распространения многолетнемерзлых пород с высокими УЭС на основе экстраполяции наших данных ЗМПШ (см рис.77). А на низких склонах долины р. Марха мощность Л1 снижается до ~ 80 - 110 м и УЭС пород слоя изменяются не только по латерали, но и по вертикали в диапазоне от 30 до 100 Ом·м (рис.81, табл.37). Нижним подгоризонтам Л1 характерны, как правило, более низкие УЭС – от 20 до 50 Ом·м. Эти участки нами интерпретируются как отепленные, по-видимому, находящиеся в талом состоянии, в разной степени увлажненные породы слоя Л1. Возможно, они являются следствием однонаправленного воздействия природных и техногенных факторов, способствующих развитию таликов:

- 1) Естественное отепляющее действие воды – водотоков и водоемов. Известно, что реки способствуют развитию подрусловых таликов, под крупными реками мерзлота отсутствует [Климовский, Готовцев, 1994];
- 2) Тектонический разлом, выходящий на дневную поверхность примерно по руслу реки [Микуленко и др., 2006], является проводником внутреннего естественного тепла земли;
- 3) Техногенные факторы – механическое и термическое воздействие ядерного взрыва. Ударные волны при взрыве могли раскрыть тектонический разлом, увеличив трещиноватость разломной зоны, по которому вероятен постоянный массоперенос и энергоперенос из зоны взрыва на дневную поверхность.

В пределах распространения «отепленных» пород слоя Л1 переход к подстилающему проводящему слою с УЭС  $\rho_2$  (10–17.7 Ом·м) не такой резкий, как в пределах водораздельных полей сохранной многолетней мерзлоты. Второй слой назван нами «переходным» и обозначен Л2 (рис.81). По сравнению с верхним слоем Л1 он обладает меньшим удельным электрическим сопротивлением, что, по-видимому, обусловлено более высокой температурой и увлажненностью пород. Другая причина низкого УЭС может заключаться в

том, что породы, образующие второй слой, находятся при более высоких давлениях, и поэтому имеют меньшую пористость, что способствует более высокой электропроводности сухих пород. Удельное электрическое сопротивление слоя Л2 ( $\rho_2$ ) характеризуется меньшим разбросом. *На восточном профиле* УЭС слоя Л2, как уже указывалось выше, составляет всего 5.6 - 6.4 Ом·м, *на центральном профиле* – 7 - 10 Ом·м, *на западном профиле*, в основном, от 8 до 18 Ом·м. На фоне низких значений УЭС слоя Л2 наблюдается тренд второго порядка: слабый рост УЭС слоя Л2 по направлению от водораздела правого борта р. Марха к долине и к более пологому левому борту реки, что, возможно, обусловлено увеличением пористости пород слоя в ослабленной зоне тектонического разлома, проходящей по руслу реки. В свою очередь, в подтверждение этого предположения следует отметить, что данный тренд роста УЭС слоя Л2 обратно коррелирует с трендом снижения УЭС слоя Л1.

*На восточном профиле* мощность слоя Л2 выдержанна – 118–130 м, подошва располагается на уровнях + 30 - +60 абс. м. *На центральном профиле* слой Л2 не выдержан, его мощности и положение подошвы сильно варьируют. Здесь местами Л2 не устанавливается из-за поднятия высокопроводящих рассолов подстилающего водоносного горизонта (рис.81, табл.37), о чем будет сказано ниже. *На западном профиле* по направлению от северного фланга к южному мощность слоя Л2 уменьшается от ~ 100 м до 50 м из-за приподнимания его подошвы, которая в целом находится на более высоких уровнях по сравнению с *восточным профилем* + 80 - +140 абс. м. Кровля слоя Л2 на двух профилях, за исключением *центрального профиля*, выдержана, и находится на уровне ~ + 200 абс. м. Вариации мощности слоя Л2 в основном контролируются изменением (поднятием) уровней подземных рассолов, приуроченных к подстилающему третьему слою Л3 с весьма низкими УЭС  $\rho_3$ . Слой Л2 мы связываем с «сухими» нижнеордовикскими и верхнекембрийскими известняками и доломитами.

Ниже Л2 залегает третий слой Л3 мощностью ~ 200- 350 м с УЭС  $\rho_3$  от 2.4 до 4.9 Ом·м. Мы отождествляем этот слой с верхнекембрийскими отложениями маркокинской и мархинской свит. Низкое УЭС слоя указывает на его насыщение минерализованными рассолами. В этом же интервале, ближе к кровле слоя, расположен маломощный маловодный верхнекембрийский подмерзлотный водоносный горизонт соленых вод и слабых растворов с минерализацией от 30 до 250 г/дм<sup>3</sup> (при среднем значении 90 г/дм<sup>3</sup>). Удельное сопротивление хлоридных растворов с такой минерализацией по порядку величины составляет примерно 0.1 – 0.5 Ом·м. На основании этой дополнительной гидрогеологической информации о строении района [Климовский, Готовцев, 1994, Микуленко и др., 2006, Алексеев, 2009] нами путем подбора проведено выделение из слоя Л3

с УЭС  $\rho_3$  тонкого (мощностью всего 2-3 м) высокопроводящего горизонта  $\rho_{3-1}$  в кровельной части слоя. Его УЭС составляет 0.4 - 1.6 Ом·м. Введение слоя  $\rho_{3-1}$ , названным нами С1 улучшило качество подбора модели: сходимости измеренных данных с расчетными улучшилась, так как относительное среднеквадратичное расхождение между измеренными и модельными данными снизилось в ~1.5 раза: с 4-5% до 3 - 2.5%, хотя вклад этого проводящего слоя С1 в суммарную проводимость невелик – всего 5-7%. Результаты инверсии в рамках 5-ислойной модели с использованием программ <Unv\_QQ> и <Inv\_QQ> (авт. Антонов Е.Ю., ИНГГ СО РАН), приведены в табл.37.

Кровля С1 расположена на уровнях от +20 до +80 абс. м, оптимальная средняя мощность, допускаемая нашими модельными построениями, всего несколько м, что близко к реальным измеренным мощностям верхнекембрийского водоносного горизонта на восточной оконечности Тунгусской синеклизы [Алексеев, 2009]. Выделенный водоносный горизонт С1, вероятнее всего, не выдержан по простирацию, имеет прерывистое распространение (см рис.81) и приурочен к трещиноватым и пористо-кавернозным доломитам и известнякам маркокинской свиты верхнего кембрия.

Нижележащая основная часть слоя  $\rho_{3-2}$ , которой оставили название Л3, практически сохранила исходные УЭС первичного слоя  $\rho_3$  – они изменяются в основном диапазоне от 3.8 до 5.8 Ом·м (рис.81, б, в, табл.37). Слой Л3 со средней мощностью 200 -250 м, скорее всего, образован увлажненными плотными верхнекембрийскими карбонатами мархинской свиты, более сухие участки с УЭС 65 Ом·м.

На *восточном профиле* под слоем Л3 просматривается еще более высокопроводящее основание с УЭС 0.3-0.8, которое мы связываем с I среднекембрийским подземным водоносным горизонтом, названным нами С2. Слово «просматривается» использовано здесь не случайно, поскольку глубоководное основание проявляется на кривых  $\rho_t$  на поздних временах, где ЭДС переходного процесса сравнима с уровнем шумов, что отрицательно сказывается на достоверности интерпретации. На *восточном профиле* глубина до кровли проводящего основания С2 оценивается в 550–640 м, что находится на уровне –200 – –300 абс.м., удельное электрическое сопротивление  $\rho_4$  0.2–1.9 Ом·м, а на *западном профиле* кровля С2 поднимается до уровня –150 – –50 абс.м. Следует отметить, что подобное высокопроводящее основание было выделено нами также в районе объекта «Кристалл»: те же глубины, те же очень низкие значения УЭС [Артамонова и др., 2012]. Имеется только одна вероятная причина, объясняющая, почему удельное сопротивление карбонатных пород на глубинах около 500 м составляет около одного Ом·м, а именно – их насыщенность

высокоминерализованными рассолами, при этом известно, что минерализация этих крепких и очень крепких рассолов составляет в среднем 300 г/дм<sup>3</sup>.

На *центральной и западном профилях* УЭС просматриваемого основания С2 несколько выше: хвостовые части кривых  $\rho_t$  не уходят круто вниз, а часто образуют восходящую ветвь. В основании разреза на пикете №4 *западного профиля* измерено необычно высокое сопротивление:  $\rho_1=1900$  Ом-м, что, скорее всего, вызвано, как уже отмечали, влиянием локальной двух- или трехмерной неоднородности.

Над очагом взрыва *центрального профиля* наблюдается более сложная картина строения геологической среды: здесь в эпицентре ПЯВ на пикетах № 5, 10, и соответственно, во всем интервале глубин наблюдается аномалия в виде «сквозной» зоны пониженных сопротивлений. Глубина исследований ЗМПП меньше глубины расположения центра взрыва. Поэтому не остается ничего другого, как предположить, что аномалия пониженных сопротивлений связана с образованием выше по разрезу вертикальной зоны повышенной трещиноватости (проницаемости) и насыщением ее минерализованными водами слоя С2. С помощью ЗМПП выявляется локальная гидрогеологическая аномалия: произошло резкое поднятие уровней напорных подземных соленых вод ~ 300 м по вертикали над очагом взрыва ПЯВ «Кратон-3» при размерах аномалии по латерали ~ 400 м. Вероятно, напорные рассолы I среднекембрийского водоносного горизонта поднялись под пластовым давлением по трещиноватой зоне столба обрушения, образованного в результате взрыва. Расчетная высота столба обрушения над полостью взрыва оценивается в 186-249 м, что примерно одного порядка с вертикальным размером выявленной гидрогеологической аномалии. Возможно, наличие тектонического разлома на расстоянии в 391-412 м выше центра взрыва, аварийная разгерметизация ствола скважины, придавшей значимость газовой-динамической составляющей взрыва, сыграло определяющую роль в появлении более высокого столба обрушения по сравнению с расчетным. А сам взрыв, по-видимому, раскрыл данный тектонический разлом. Данное предположение подтверждают результаты радиоэкогеохимического исследования поверхностных вод, загрязненных техногенными радионуклидами, просачивающимися из зоны взрыва на дневную поверхность [Артамонова, 2012]. Проведение ретроспективного математического 3D-моделирования взрыва и постановка ЗМПП по более густой сети дадут более точные данные по строению геологической среды в районе объекта «Кратон-3».

Таким образом, по результатам ЗМПП на объекте «Кратон-3» делаем заключение:

С помощью ЗМПП мы впервые увидели и обсудили геоэлектрические особенности недр у объекта ПЯВ «Кратон-3» до глубины ~ 500 м или до -200 м.абс., на отдельных пикетах до глубины ~ 640 м или до ~ -300 абс.м. С учетом регионального и местного

литологического и мерзлотно-гидрогеологического строения геологической среды проведена интерпретация полученных геоэлектрических моделей.

Выявлено, что ненарушенная геологическая среда района ПЯВ «Кратон-3» имеет горизонтально-слоистое строение. Верхний выдержанный по мощности (150-200 м) слой представлен многолетнемерзлыми породами. На водоразделах и высоких склонах распространены многолетнемерзлые породы с очень высокими УЭС до 1200 Ом·м. На низких склонах и долине р. Марха, вдоль русла которой проходит тектонический разлом, как и на эпицентре ПЯВ «Кратон-3», расположенного на низком склоне правого борта р. Марха, мы наблюдаем деградацию многолетнемерзлых пород, что проявляется понижением УЭС пород до 30-100 Ом·м, местами до 20 Ом·м и их вертикальным и латеральным неоднородным распределением по слою. Возможно, развитие таликов имеет преимущественно естественное происхождение в силу отепляющего влияния русла реки и диффундирования глубинного тепла земли по трещиноватой зоне тектонического разлома. Но не исключается, скорее предполагается, что механическое и термическое воздействие взрыва стало дополнительным и решающим фактором для начала развития процессов деградации мерзлоты по зоне тектонического разлома. Предполагается, что механическое воздействие взрыва могло усилить раскрытие трещиноватой зоны тектонического разлома, которая стала подводящим каналом не только для тепло-, но и для массопереноса радиоактивности к поверхности земли.

Выявленные слои с весьма низкими УЭС 0.4 – 1.1 Ом·м совпадают с уровнями распространения подземных водоносных горизонтов в геологическом разрезе. Удалось выделить верхнекембрийский и I среднекембрийский водоносные горизонты, насыщенные рассолами.

Выявлена локальная гидрогеологическая аномалия: резкий подъем уровня рассолов I среднекембрийского водоносного горизонта, вероятнее всего, по столбу обрушения, сформированному над полостью взрыва ~ на 300 м по вертикали при латеральных размерах гидрогеологической аномалии в ~ 400 м. Предполагается соединение в пространстве столба обрушения с зоной тектонического разлома и наличие пути массопереноса радионуклидов из зоны взрыва по системе «полость взрыва «Кратон-3» – столб обрушения – обновленная трещиноватая зона тектонического разлома – дневная поверхность». Наше предположение подкрепляется зафиксированными высокими концентрациями техногенных радионуклидов при отсутствии эффекта разбавления в бочажинах, ручейках, втекающих в р. Марха и в самой речной воде на удалении до 3 км от эпицентра взрыва [Артамонова, 2012].

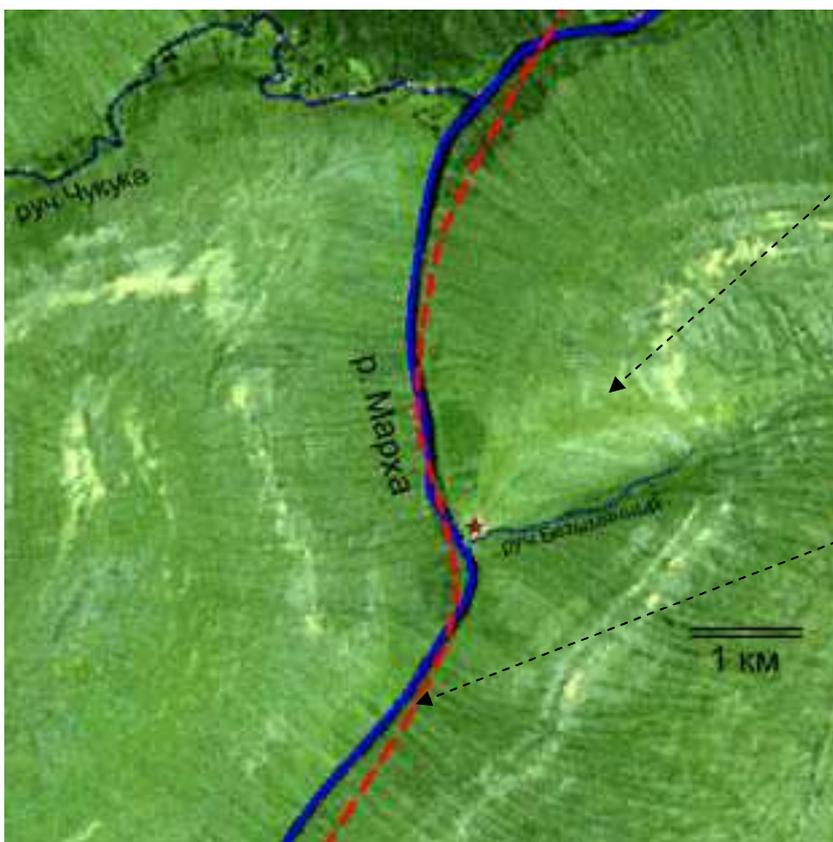
## 6.2. Поверхностное радиоактивное загрязнение ландшафтов. Доказательства просачивания техногенных радионуклидов из недр по зоне тектонического разлома в районе ПЯВ «Кратон-3» (результаты радиоэкогехимического изучения)

Нарушения в технологии забивки боевой скважины ПЯВ «Кратон-3» привели к аварийному выбросу через устье скважины около 2 % общей активности, что, по нашим оценкам, составляло примерно 4800 и 294 Ки через один и 31 год соответственно. Радиоактивное газопопылевое облако двигалось в северо-восточном направлении (см. рис. 82, 83), и его основная активность пришлась на первые 3–4 км, что привело к гибели прилегающего массива северной тайги. Погибший лес, так называемый мертвый лес, до сих пор идентифицируется на спутниковом снимке (рис.83); почти повсеместно развит мохово-лишайниковый покров (род *Cladina*, род *Dicranum*, *Hylocomium* и др.) (рис.82). Мертвый лес представляет собой сухостой лиственницы Гмелина (*Larix Gmelinii*), со слабой порослью низкорослых кустарников (рис.84).



**Рис.82.** Погибший по радиоактивному следу массив северной тайги в районе ПЯВ «Кратон-3», фото Аргуновой Т.В. с вертолета, 2007 г. , красный треугольник - местоположение устья боевой скважины.

В 1981 г. на этой территории были проведены дезактивационные работы: в 10-15 м к западу от устья боевой скважины был сооружен котлован объемом около 4000 м<sup>3</sup>, в котором захоронили загрязненное буровое оборудование, технику и верхний слой почв с рабочей площадки.



Радиоактивный след аварийного взрыва «Кратон-3», выявляемый со спутника (космоснимок Landsat, 2001 г.)

Предположительная зона тектонического разлома (с падением примерно 55° на восток).



Рис.83. Вид на мертвый лес сверху (космоснимок Landsat 2002 г.) и в пешем маршруте (фото 2009 г.)

В 2006 г. над озером, образовавшимся над устьем боевой скважины и могильником, была сформирована насыпь из аллювия местного ручья высотой примерно 1.5 м и площадью 0.731 га. В период с 1981 до 1990-х годов секретный объект «Кратон-3» оставался без наблюдения. В 1984 г. якутские геологи «открыли» участок тайги с радиоцезиевой аномалией непонятного происхождения, однако дальнейшие исследования по этому факту не проводились. С 1993 г. на объекте ПЯВ «Кратон-3» начались радиоэкологические

исследования [Гедеонов и др., 1993, Бурцев, Колодезникова, 1997]. В 2002 г. Министерством охраны природы Республики Саха (Якутия) на радиоактивном следе была проведена детальная пешеходная радиометрическая и гамма-спектрометрическая съемка [Ковалев, 2002]. Затем последовали работы по изучению распространения  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{241}\text{Am}$  и изотопов  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}$ ,  $^{240}\text{Pu}$  и их распределения в компонентах экосистем [Гедеонов и др., 2004, Чевычелов и др., 2006, Ramzaev et.al., 2007, 2009].

В течение первого года после взрыва основная масса короткоживущих изотопов наведенной и осколочной активности распалась. Далее, в течение длительного периода времени (до 100 лет после взрыва) одним из основных вкладчиков общей активности является именно тритий, и только потом долгоживущие осколочные радионуклиды  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ . За истекший период активность трития уменьшилась примерно в пять раз по сравнению с начальной, а общая осколочная активность снизилась на несколько порядков. Литературных данных о формах нахождения трития в полости взрыва нет. В поверхностных условиях тритий находится преимущественно в виде молекулы воды  $^3\text{H}^1\text{HO}$  [Рихванов, 2009], что обеспечивает его высокую подвижность, поэтому в районах ПЯВ тритий может служить индикатором существующих источников и доминирующих направлений водного массопереноса радионуклидов.

С применением радиоэкогеохимических методов через прослеживание поведения техногенных радионуклидов и трития в природных водах ставилась задача оценить радиоэкологическую обстановку района ПЯВ «Кратон-3» и влияние на нее системы «полость взрыва – флюидопроницаемые проводящие геоструктуры- поверхность земли».

Массовый пробоотбор природных вод в районе «Кратон-3» был проведен в период 2008-2009 годов: шесть проб – в первой декаде августа 2008 г., 59 проб – в первой декаде августа 2009 г. В районе исследования проведено не менее 2000 наземных измерений мощности экспозиционной дозы  $\gamma$ -излучения (МЭД) с помощью радиометра СРП-68-01. Точки отбора проб и полевых измерений были привязаны географически с помощью GPS-навигатора ETREX и внесены в созданный нами ГИС-проект района на основе космоснимка Landcat 2001 г.

На основе дешифрирования космоснимка Landcat и применения ГИС-технологий соискателем проведены расчеты, которые уточнили площадь погибшего леса - она составила 1 млн 600 тыс.  $\text{m}^2$  (см. рис. 82), протяженность – до 3.6 км, хотя ранее его площадь оценивалась примерно в 1 млн  $\text{m}^2$  [Бурцев, Колодезникова, 1997].

Активность в пределах «мертвого» леса распределяется неравномерно: по распределению мощности экспозиционной дозы  $\gamma$ -излучения (МЭД) выделены три пятна – так называемые ближний, средний и дальний следы (см. рис. 84, 85).

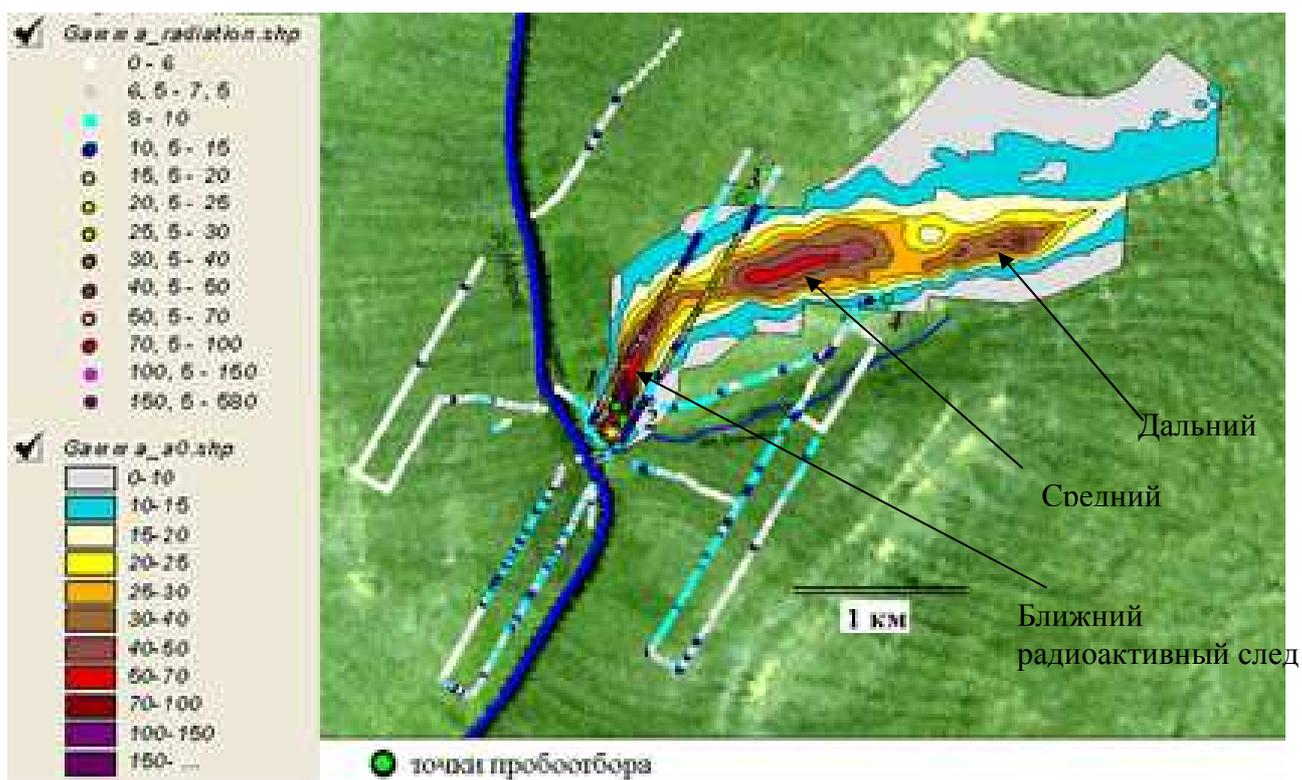


Рис.84. Оцифрованные изолинии мощности экспозиционной дозы  $\gamma$ -излучения (усл.обозначения показаны слева, мкР/ч) по данным 2002 г. [Ковалев, 2002] и профили радиометрической съемки 2008 г. [Артамонова, 2012] (стрелками показаны ближний, средний, дальний радиоактивный след), точки 1-4 – участки пробоотбора почв и мохово-лишайникового покрова (табл. 38).

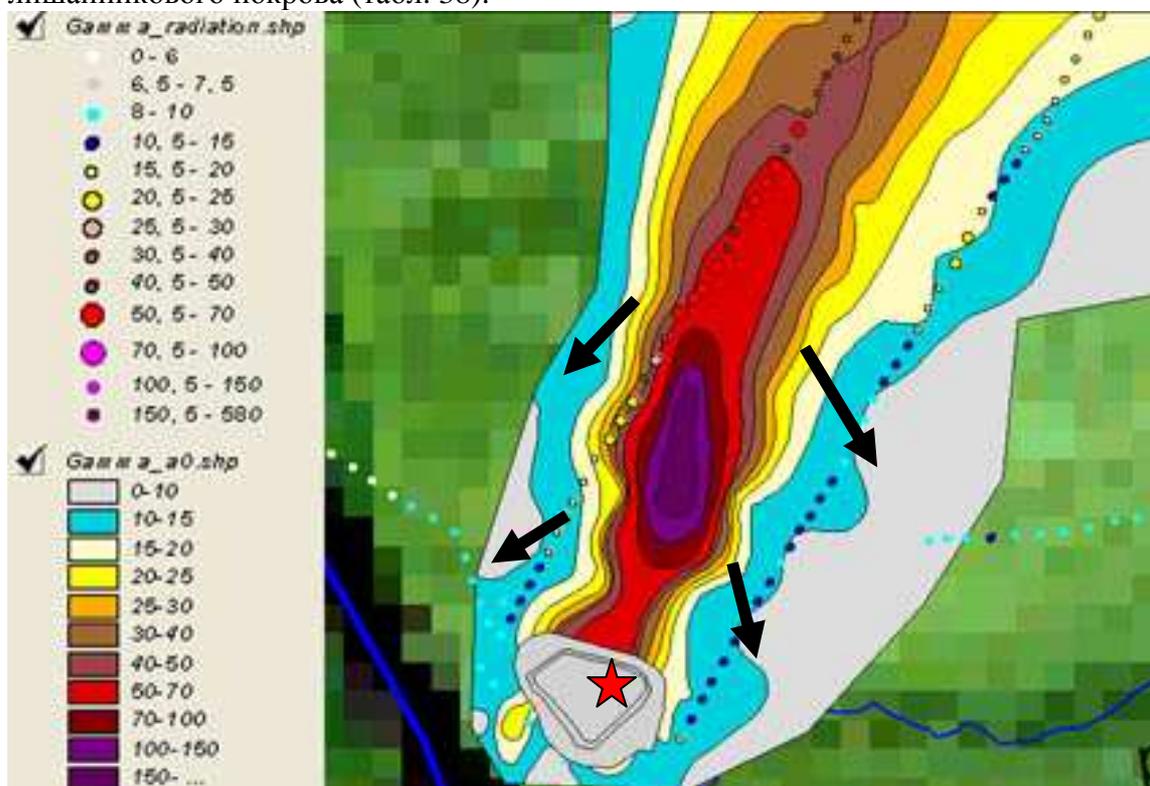
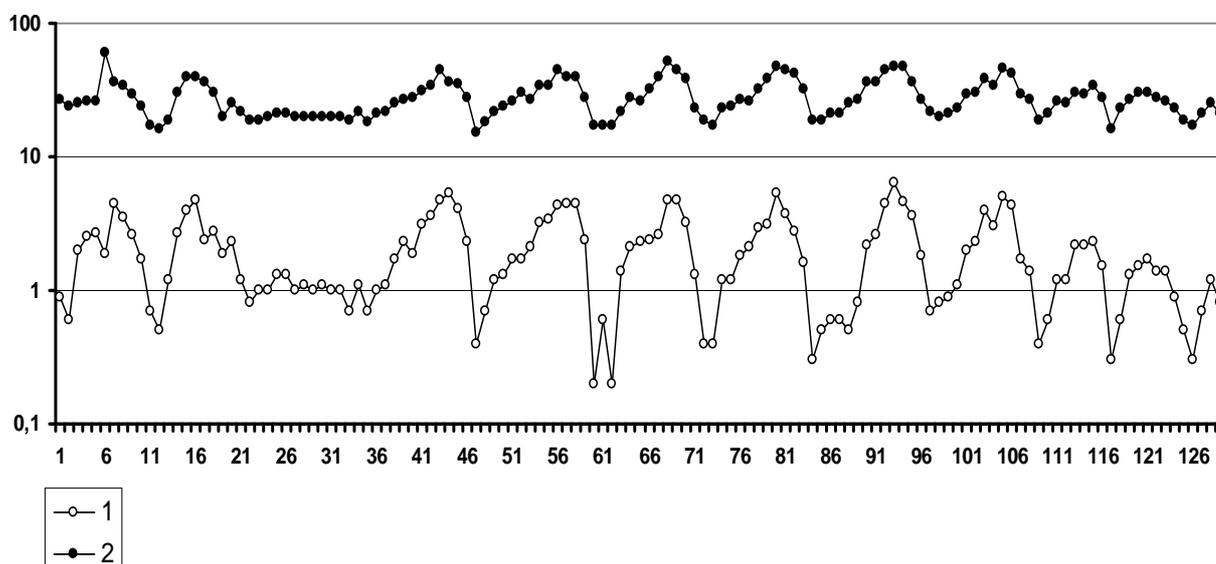


Рис.85. МЭД на ближнем радиоактивном следе объекте «Кратон-3» и МЭД (мкР/ч). Серым показана насыпь, звездочкой – устье боевой скважины. Стрелками показано общее направление «расползания» радионуклидов в долину р. Марха и руч.Безымянный. Условные обозначения показаны слева.

Установлено, что в 2008 г. МЭД в ближнем следе составляет от 30 до 130 мкР/ч, в среднем – от 30 до 70 мкР/ч, в дальнем – от 30 до 55 мкР/ч. Наиболее сильно загрязнен ближний след. По мере удаления от боевой скважины МЭД постепенно уменьшается, что подтверждается данными наземной радиометрической съемки и лабораторных анализов (табл. 38)[Артамонова, 2012, Артамонова,Разворотнева, 2010].

В районе, сложенном карбонатными породами, развиты маломощные мерзлотные дерново-карбонатные почвы [Еловская и др., 1979, Чевычелов и др., 2006]. Мощность лесной подстилки ограничивается 2-3 см, гумусового горизонта – всего от 1 до 6 см. Поле МЭД формируется, в основном, за счет активности в них радиоцезия: коэффициент корреляции между МЭД и активностью радиоцезия составил 0.87 при выборке 129 параллельных гамма-спектрометрических и радиометрических измерений (рис.86).



**Рис.86.** Диаграмма параллельных радиометрических (1) (мкР/ч) и гаммаспектрометрических измерений  $^{137}\text{Cs}$  (2) (Ки/км<sup>2</sup>) по сети поперечных профилей в пределах «мертвого» леса объекта «Кратон-3», 2002 г. (по собственным данным и данным Министерства охраны природы РС(Я) [Ковалев, 2002])

В древесине мертвых деревьев активность  $^{90}\text{Sr}$  составляет всего около 6 Бк/кг,  $^{137}\text{Cs}$  – 10–14 Бк/кг,  $^{239, 240}\text{Pu}$  – 0.041-0.064 Бк/кг [Гедеонов и др., 2004]. В опавшей коре мертвых деревьев активность  $^{90}\text{Sr}$  на три порядка больше и равно 200–490 Бк/кг, а активность  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{239, 240}\text{Pu}$  оказалось в среднем выше на порядок (120–140 и 0.6–5.0 Бк/кг соответственно). После опада загрязненной коры основными депонентами радионуклидов в районе объекта ПЯВ «Кратон-3» служат мохово-лишайниковый покров и почвы, а именно лесная подстилка и верхняя часть гумусового горизонта почв (см. табл. 38).

**Таблица 38.** Удельная активность техногенных радионуклидов в пробах объекта ПЯВ «Кратон-3», Бк/кг

Проба, глубина см	<sup>90</sup> Sr	<sup>137</sup> Cs	<sup>239, 240</sup> Pu	<sup>238</sup> Pu
<i>«Ближний» след, в 200 м к северу от скважины, МЭД 93 мкР/ч, т. 1 на рис. 84</i>				
Мох	н/д	12000±300 <sup>А</sup>	н/д	н/д
Лишайник	н/д	201100±2700 <sup>А</sup>	7400±700 <sup>Б</sup>	390±40 <sup>Б</sup>
Лесная подстилка, 0-2 см	44400±4600 <sup>А</sup>	20000±2200 <sup>А</sup>	380±20 <sup>Б</sup>	23±2 <sup>Б</sup>
Гумусовый горизонт, 2-5 см	5800±640 <sup>А</sup>	5030±510 <sup>А</sup>		
Грунт, 5 -10 см 10-15 см	3950±420 <sup>А</sup>	31±4.1 <sup>А</sup>	н/д	н/д
	1440±160 <sup>А</sup>	15±2.8 <sup>А</sup>		
<i>Локальная аномалия у опушки «мертвого» леса, МЭД 420-460 мкР/ч, т. 2 на рис. 84</i>				
Лесная подстилка, 0-2 см	257800 <sup>Б</sup> 188000±21000 <sup>А</sup>	94600 <sup>Б</sup> 86700±8700 <sup>А</sup>	5900±300 <sup>Б</sup>	290±30 <sup>Б</sup>
Гумусовый горизонт, 2-4 см	40600 <sup>Б</sup>	34100 <sup>Б</sup>		
4-6 см	8700 <sup>Б</sup>	990 <sup>Б</sup>	н/д	н/д
6-8 см	2350 <sup>Б</sup>	48 <sup>Б</sup>	н/д	н/д
Грунт, 8 -14 см 14-21 см	194 <sup>Б</sup>	43 <sup>Б</sup>	н/д	н/д
	18 <sup>Б</sup>	10 <sup>Б</sup>		
<i>«Средний» след, северная граница «мертвого» леса, МЭД 8 мкР/ч, в 1.6 км от скважины, т. 3 на рис. 84</i>				
Мох	123.5±11.5	250±18	н/д	н/д
Лишайник	44±3.5	135±10	н/д	н/д
Лесная подстилка, 0-2 см	98±4.9	56.2±18	5.1±0.4	<0.05
Гумусовый горизонт, 2-4 см	46±3.3	11.5±1.5	3.8±0.15	<0.05
Грунт, 4 -15 см	26±2.5	<1.5	<0.1	<0.05
<i>«Средний» след, южная граница « мертвого» леса, МЭД 11 мкР/ч, в 1.75 км от скважины, т. 4. на рис. 84</i>				
Мох	220±16	3150±220	21±1	<0.05
Лишайник	100±10	1500±100	31±1.5	<0.05
Лесная подстилка, 0-2 см	1230±85	1030±75	15±1.0	<0.05
Гумусовый горизонт, 2-6 см	850±70	740±60	12.5±0.8	<0.05
Грунт, 6 -15 см	280±20	35±3.5	<0.1	<0.05
<i>Фоновый участок, МЭД 5 мкР/ч, в 300 м выше по течению р. Мархи, правый берег</i>				
Лишайник	75±6	90±7	2.7±0.5	<0.05
Лесная подстилка, 0-2 см	80±6	50±3.5	2.7±0.5	<0.05
Гумусовый горизонт, 2-5 см	71±5.5	46±3.3	1.2±0.2	<0.05
Грунт, 5 -15 см	33±3.0	<1.5	<0.1	<0.05

Примечание: н/д – нет данных.

А – Пробы 2001 г. [Рамзаев, 2002, Ramzaev et. al.,2007, 2009].

Б – Пробы 2002 г. [Гедеонов, 2003].

В – Пробы 2003 г. [Чевычелова и др., 2006].

В районе, сложенном ордовикскими и кембрийскими карбонатными породами, развиты маломощные мерзлотные дерново-карбонатные почвы [Еловская и др., 1979, Чевычелов и др., 2006]. Мощность лесной подстилки ограничивается 2–3 см, мощность гумусового горизонта составляет всего 1–6 см. Поле МЭД преимущественно формируется за счет наличия в них радиоцезия: коэффициент корреляции между МЭД и активностью радиоцезия составил 0.87 при выборке 129 параллельных  $\gamma$ -спектрометрических и радиометрических измерений (рис.86). В почвах и мохово-лишайниковом покрове общая активность  $^{90}\text{Sr}$  почти в два раза больше по сравнению с активностью  $^{137}\text{Cs}$  и примерно на два порядка выше по сравнению с активностью  $^{239, 240}\text{Pu}$ . Активность  $^{238}\text{Pu}$  составляет примерно 5–6 % от активности  $^{239, 240}\text{Pu}$ . Согласно существующей классификации [СанПиН..., 2010], верхние горизонты почв и мохово-лишайниковый покров центральных частей ближнего и среднего следов по содержанию радионуклидов относятся к твердым радиоактивным отходам.

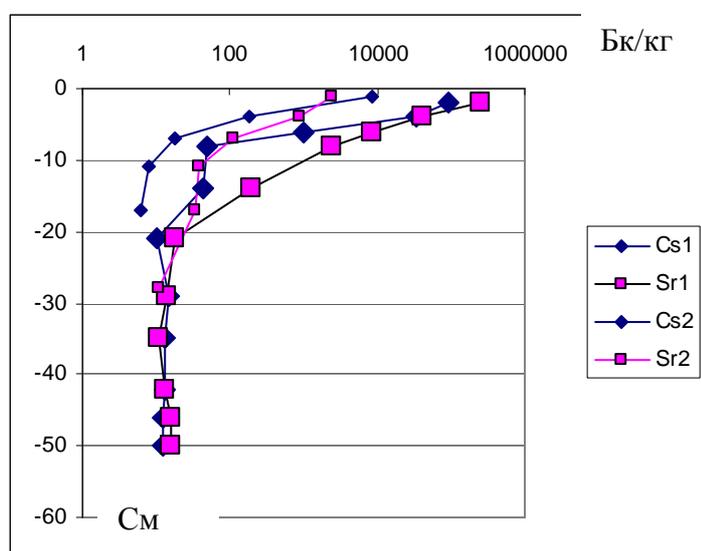


Рис.87а. Почвенный профиль активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в 1 м следе аварийного ПЯВ «Кратон-3».

Вследствие более высокой подвижности  $^{90}\text{Sr}$  проникает на большую глубину - до 20 см, тогда как остальные радионуклиды в основном сосредоточены в первых 5 см почвенного горизонта (рис.87а).

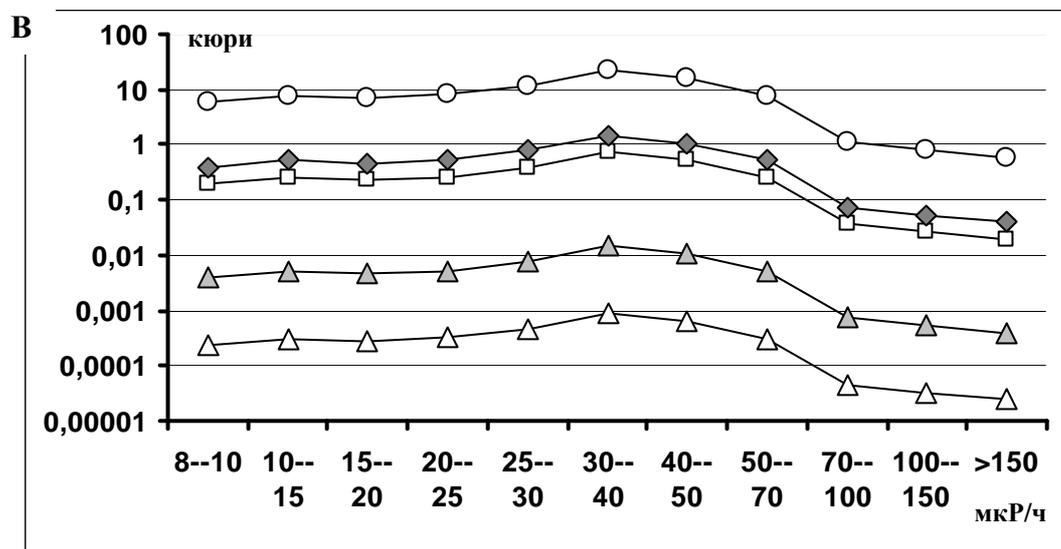
Проведенная радиометрическая съемка (рис.84) позволила определить, что на ненарушенных природных ландшафтах естественная МЭД равна всего 5–6 мкР/ч, что характерно для известняков и доломитов. Установленные для внешних границ мертвого леса значения МЭД в 8–12 мкР/ч свидетельствуют о наличии радиоактивного загрязнения краевых зон: во мхах активность  $^{90}\text{Sr}$  достигает  $(123.5 \pm 11.5)$ ,  $^{137}\text{Cs}$  –  $(250 \pm 18)$  Бк/кг; в лесной подстилке активность  $^{90}\text{Sr}$  составляет  $(98 \pm 4.9)$ ,  $^{137}\text{Cs}$  –  $(56.2 \pm 18)$ ,  $^{239, 240}\text{Pu}$  –  $(5.1 \pm 0.4)$  Бк/кг (см. табл. 36). Кроме этого, МЭД (8-12 мкР/ч) зафиксированы на небольших участках живого

леса к югу от мертвого, которые представляют собой локальные пятна радиоактивного загрязнения. По-видимому, они сформированы из вещества, занесенного порывами ветра от основного радиоактивного облака, двигавшегося на восток.

Все эти годы под действием экзогенных и биогенных процессов происходило перераспределение активности, снос и переотложение радионуклидов, как в пределах мертвого леса, так и в сопряженные ландшафты, на фоне снижения общего уровня активности в результате естественного распада. По данным математического моделирования в сезонно-талом слое перенос радионуклидов за 3 года составляет 4 м по склону вниз [Пермяков, Амосов, 2003], и за 10 лет пятно загрязнения увеличивается на 3.5 % за счет переноса радионуклидов в сезонно-талом слое. Таким образом, происходит «расползание» радиоактивного следа по действием экзогенных процессов на пологих склонах с малым уклоном (до 5 градусов максимально).

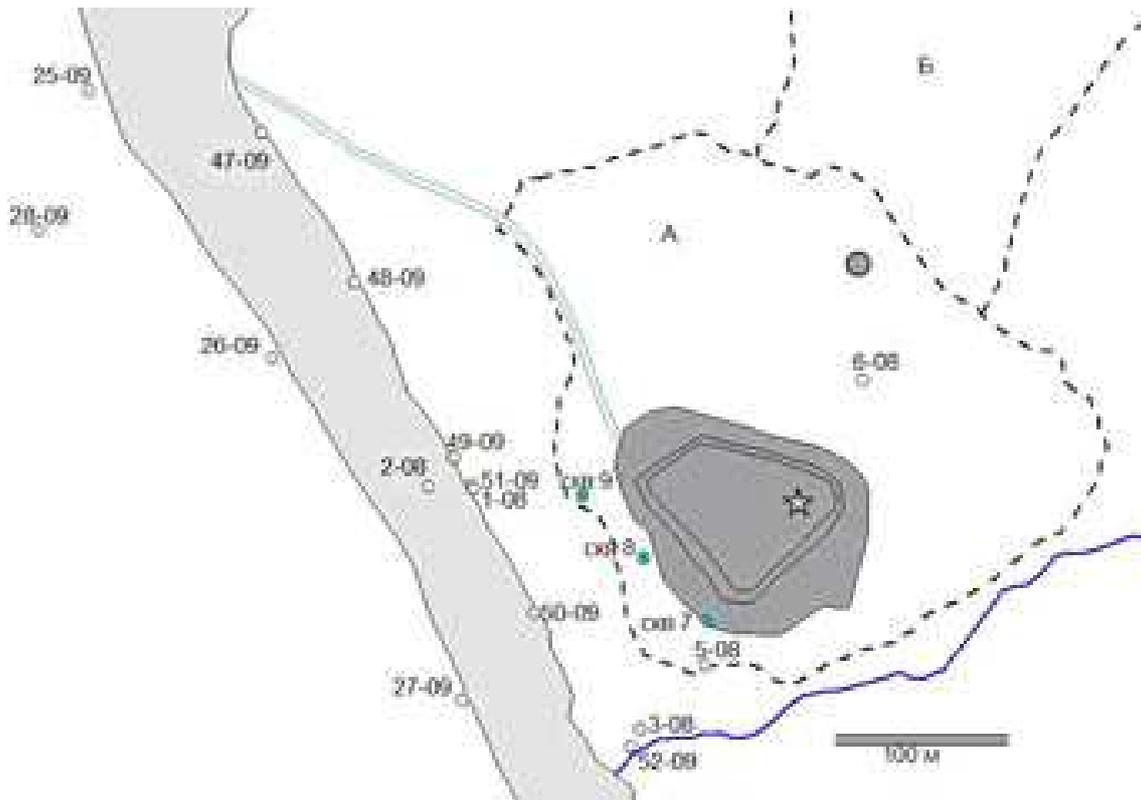
В 2008 г. в 145 м к северу от устья боевой скважины в небольшом замкнутом понижении на пологом склоне, у опушки мертвого леса оконтурена локальная аномалия МЭД в 400-420 мкР/ч (см. на рис. 88, б, т.2). Размер аномалии составляет около 3 × 3 м. В 2001 г. для лесной подстилки и первых верхних сантиметров гумусового горизонта здесь были установлены очень высокие активности, Бк/кг:  $^{90}\text{Sr}$  188000,  $^{137}\text{Cs}$  86700 [Ramzaev et.al., 2007, 2009]. Проведенными в 2003 г. исследованиями [Чевычелов и др., 2006] установлено, что активность  $^{90}\text{Sr}$  оказалось на 37 % выше, а  $^{137}\text{Cs}$  – на 9 % больше по сравнению с 2001 г. (см. табл. 38). Этот факт указывает на продолжающееся накопление радионуклидов, которые выносятся поверхностными стоками с территории мертвого леса. Помимо радиоцезия и радиостронция в почвах этой аномалии в 2002 г. определены и изотопы Рu: активность  $^{239,240}\text{Pu}$  составила 5900,  $^{238}\text{Pu}$  – 290 Бк/кг [Гедеонов, 2003].

Несомненно, аномальный участок у опушки мертвого леса можно рассматривать только лишь как промежуточный этап на пути дальнейшей миграции радионуклидов. Мертвый лес расположен в бассейне водосбора р. Мархи и руч. Безымянный (см. рис. 85). Детерминируемые местным рельефом (см. рис. 85, 89) поверхностные стоки со среднего и дальнего следов попадают в руч. Безымянный; стоки с наиболее загрязненного ближнего следа частично впадают непосредственно в р. Марху, частично – в тот же руч. Безымянный. В ручейке, вытекающем со стороны опушки леса, в 68 м южнее аномальной зоны (рис. 88, т. 6-08) определено высокая активность трития – ((68±8) Бк/л), которое почти в 13 раз превышает местный фоновый уровень. Последний, по нашим данным, составляет от (5±2) до (6±2) Бк/л в р. Мархе выше по течению и в мелких ручьях и сопоставим с глобальным уровнем. Так, согласно [Рихванов, 2009], современный техногенный фон трития в

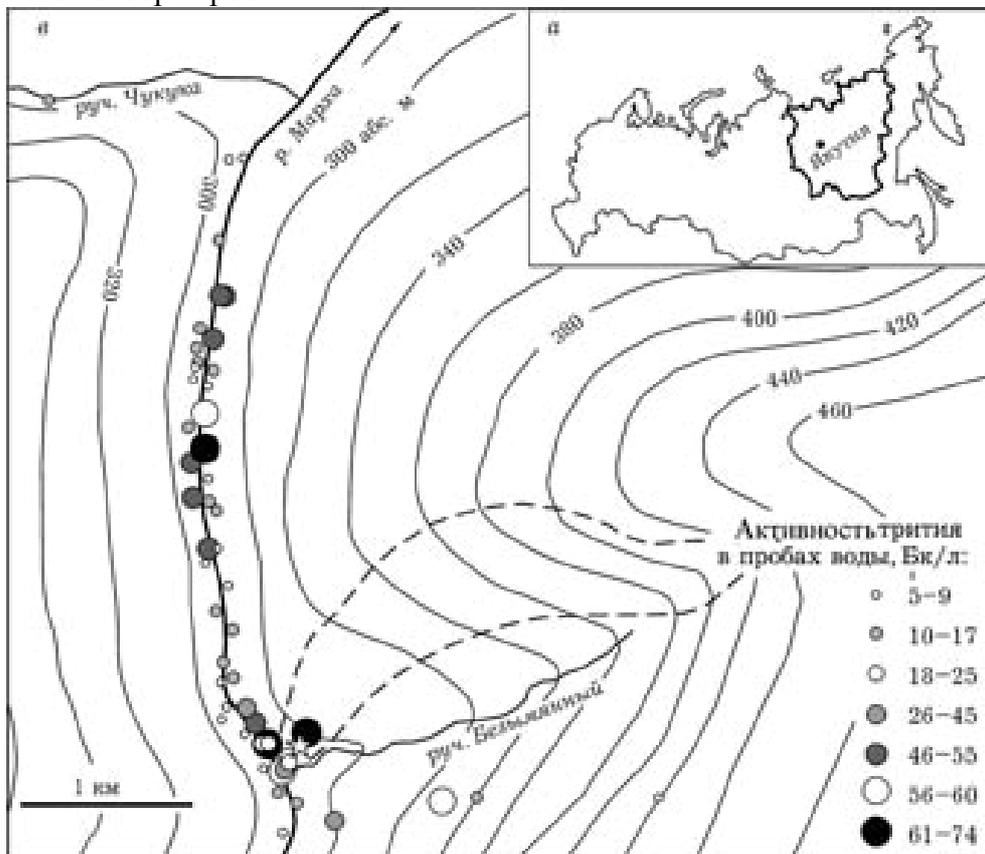


○ 1    ◆ 2    □ 3    ▲ 4    △ 5

**Рис.87.** Анализ степени радиоактивного загрязнения мертвого леса у объекта ПЯВ «Кратон-3» суммарные активности (кюри) 1 - тритий, 2 - Sr-90, 3 - Cs-137, 4 - Pu-239, 240, 5 - Pu-238 в зонах с разной степенью загрязнения в пределах мертвого леса на основе собственных данных и данных Министерства охраны природы РС(Я) [Ковалев, 2002].



**Рис.88.** Схема отбора проб природных вод в районе объекта МПЯВ «Кратон-3». Штриховой линией показаны границы: А – рабочей площадки, Б – мертвого леса; серым фоном показана насыпь, звездой отмечено положение устье боевой скважины. Цифры у кружочков – номера точек отбора проб.



**Рис. 89.** Активность трития в пробах воды р. Марха и мелких ручейков и бочажин по бортам реки.

поверхностных водах составляет около 5 Бк/л. Таково же фоновое активностью трития в водах р. Енисей [Bolsunovsky, Bondareva, 2003].

В воде ручейка (см. рис. 88, т. 6-08) общая  $\beta$ -активность составляет  $(2.11 \pm 0.08)$  Бк/л, что превышает уровень вмешательства (УВ) более чем в два раза. Общая  $\alpha$ -активность равна  $(0.54 \pm 0.06)$  Бк/л, что больше УВ почти вдвое [СанПиН..., 2009].

В мае 2002 г. была отобрана проба паводковых вод руч. Безымянный, в которых установлены следующие удельные активности основных радионуклидов (вместе с взвесью), Бк/л:  $^{90}\text{Sr}$  ( $40.2 \pm 12.9$ ),  $^{137}\text{Cs}$  ( $6.2 \pm 0.6$ ) и ( $5.6 \pm 0.6$ ),  $^{239,240}\text{Pu}$  ( $0.14 \pm 0.01$ ) Бк/л,  $^{238}\text{Pu}$  ( $0.007 \pm 0.001$ ) [Ушницкий, 2004, Ramzaev et al., 2009]. В августе 2009 г. для вод этого ручья получены следующие данные, Бк/л:  $^{90}\text{Sr}$  ( $0.12 \pm 0.004$ ),  $^{239,240}\text{Pu}$  ( $4 \pm 0.16$ )  $\cdot 10^{-4}$ ,  $^{238}\text{Pu}$  ( $3.9 \pm 0.15$ )  $\cdot 10^{-3}$ .

В пробах паводковой воды руч. Безымянный, отобранных в 2002 г., как и в 2009 г., получены соотношения радионуклидов  $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs} \sim 6.5$ ,  $^{90}\text{Sr}/^{239,240}\text{Pu} \sim 300$ , которые оказались выше по сравнению с соотношением этих радионуклидов в их основных источниках – почвах и мохово-лишайниковом покрове мертвого леса ( $\sim 2$  и  $100$  соответственно). Это указывает на высокую водную подвижность радиостронция и его массоперенос с водными потоками преимущественно в растворе, в том числе и в паводковый период.

Соотношения  $^{137}\text{Cs}/^{239,240}\text{Pu}$  в пробах паводковой воды 2002 г. составляет около 40–44, а активность  $^{238}\text{Pu}$  – примерно 5 % от активности  $^{239,240}\text{Pu}$ . Эти данные сопоставимы с соотношениями в их основных источниках - в компонентах мертвого леса ( $^{137}\text{Cs}/^{239,240}\text{Pu}$  в среднем равно 32–39, активность  $^{238}\text{Pu}$  составляет 5–6 % от активности  $^{239,240}\text{Pu}$ ). По-видимому, в паводок в массопереносе  $^{137}\text{Cs}$  и изотопов Pu преобладает механический снос. В остальное время массоперенос радионуклидов преимущественно идет в жидком виде из-за небольших скоростей водотоков в условиях равнинно-холмистого рельефа. При этом для  $^{238}\text{Pu}$  характерна более высокая подвижность. Активность  $^{238}\text{Pu}$  в пробе воды руч. Безымянный (2009 г.) сопоставимо с таковым в пробе, отобранной весной 2002 г. ( $(3.9 \pm 0.15) \cdot 10^{-3}$  и  $(7 \pm 1) \cdot 10^{-3}$  соответственно) и почти в 10 раз больше по сравнению с активностью  $^{239,240}\text{Pu}$ , Последний содержится в количестве  $(4 \pm 0.16) \cdot 10^{-4}$  Бк/л в пробе, отобранной летом 2009 г., и  $(0.14 \pm 0.02)$  Бк/л – в пробе паводковой воды 2002 г. (табл. 39).

В 2008 г. в руч. Безымянный (см. табл. 39, т. 3-08) зафиксирована активность  $^3\text{H}$ , равная  $(30 \pm 5)$  Бк/л, что в два раза меньше, чем в ручейке у опушки «мертвого» леса (см. рис.88, т. 6-08). Полученный эффект, возможно, обусловлен высокой водностью руч. Безымянный и, следовательно, разбавлением стоков. В засушливом 2009 г. ручеек у опушки мертвого леса пересох, а в сильно обмелевшем руч. Безымянный активность  $^3\text{H}$  почти в два раза выше по сравнению с данными 2008 г. и составило  $(57 \pm 2.8)$  Бк/л (см. табл. 39).

**Таблица 39.** Активность радионуклидов в природных водах, отобранных в районе ПЯВ «Кратон-3» в 1996-2009 гг., Бк/л

Место отбора	Номер пробы, дата отбора	$^3\text{H}$	Общая $\beta$ -активность ( $^{90}\text{Sr}$ )	Общая $\alpha$ -активность ( $^{239, 240}\text{Pu}$ )	$^{238}\text{Pu}$
поверхностный водоток на опушке «мертвого» леса	6- 08, 03.08.2008 г.	68±8	2.11±0.08 (н.д.)	0.54±0.06(н.д.)	н.д.
	6а-08, 03.08.2008 г.	н.д.	2.25±0.25 (н.д.)	н.д.	н.д.
руч. Безымянный	2002, май <sup>а</sup>			(0.14± 0.02)	$(7 \pm 1) \cdot 10^{-3}$
	3- 08, 03.08.2008 г.	30±5	0.27±0.04(н.д.)	0.023±0.02 (н.д.)	н.д.
	52-09, 10.08.2009 г.	57±2.8	(0.12±0.004)	$((4 \pm 0.16) \cdot 10^{-4})$	$(3.9 \pm 0.15) \cdot 10^{-3}$
Водоем рядом с устьем боевой скважины (до создания насыпи в 2006 г.)	1996 <sup>б</sup> г.	700±250	н.д.	н.д.	н.д.
	2001 <sup>б</sup> г.	320±32	38±6 (н.д.)	н.д.	н.д.
	2003 <sup>б</sup> г.	н.д.	49±18 (н.д.)	н.д.	н.д.
Поверхностный водоток из-под насыпи устья боевой скважины	5-08, 03.08.2008 г.	18±5	0.398±0.028 (н.д.)	0.29±0.01(н.д.)	н.д.
Грунтовые воды скв. 8, глубина ~ 1.5 м, западнее насыпи	скв. № 8, 2007 <sup>г</sup> г.	н.д.	н.д. (8.75±1.63)	н.д.	н.д.
Грунтовые воды скв. 7, глубина ~1.5 м у насыпи	скв. № 7, 03.08.2008 г.	19±6	2.39±0.07 (н.д.)	0.16±0.04 (н.д.)	н.д.
Грунтовые склоновые воды из закопуши на берегу р. Мархи	1-08, 03.08.2008 г.	22±6	2.35±0.07(н.д.)	0.15±0.04(н.д.)	нд
	51-09, 10.08.2009 г.	67.2±1.9	н.д. (1.99±0.07)	н.д. $((4 \pm 0.16) \cdot 10^{-4})$	$(7.8 \pm 0.3) \cdot 10^{-3}$
р. Марха	50-09, 10.08.2009 г.	13±2.0	н.д.	н.д.	н.д.
	2-08, 03.08.2008 г.	22±5	2.82±0.03(н.д.)	0.42±0.02(н.д.)	н.д.
	49-09, 10.08.2009 г	14±1.5	н.д.	н.д.	н.д.
	49-09, 11.08.2009 г.	48±2.4*	н.д. (0.078±0.003)	н.д. $((6 \pm 0.24) \cdot 10^{-4})$	$(18.6 \pm 0.7) \cdot 10^{-3}$
	48-09, 10.08.2009 г.	52.1±2.6	н.д.	н.д.	н.д.
	48-09, 11.08.2009 г.	45.2±2.1	н.д.	н.д.	н.д.
	47-09, 11.08.2009 г.	44.3±2.2	0.011±0.010(н.д.)	0.026±0.013(н.д.)	н.д.
	27-09, 09.08.2009 г.	9±1	н.д.	н.д.	н.д.
	26-09, 09.08.2009 г.	5±2	н.д.	н.д.	н.д.
	25-09, 09.08.2009 г.	6±2	н.д.	н.д.	н.д.
Водоток левого берега р. Мархи	28-09, 09.08.2009 г.	7.5±0.5	н.д.	н.д.	н.д.
УВ воды		7700	1 (5)	0.2 (0.56 )	0.6

Примечание: Номера проб соответствуют точкам на рис.88. н.д. – нет данных,

<sup>а</sup> – [Рамзаев, 2004], <sup>б</sup> – [Ramzaev et al., 2009], <sup>в</sup> – [Ушницкий, 2004], <sup>г</sup> – [Новгородов и др., 2008]

**Таблица 40. Общий химический состав природных вод района ПЯВ «Кратон-3», мг/л**

Место, год		pH	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Ручей из под навала	2008	6.7	134	4.9	33.4	14.7	<0.05	265	103
Грунтовые воды у эпицентра.	2008 набл, скв. 7	6.3	145	4.25	51.5	6.4	3.2	250	198
	2011 набл скв.7	6.5	154	24.9	434	247	4.2	1550	210
	2008 Набл, скв,8,	6.8	143	5.55	60.6	17.0	4.94	298	173
	2011 под склоном		11.9	0.002	47.5	17.7	3.1	15	315
Водоотводной канал	2008	7.4	2.65	0.90	51.5	25.7	5.5	3.55	311
Сток из погибшего леса	2008	8.0	Но	0.85	63.5	28.0	3.9	3.55	336
Руч. Безымянный	2008	8.22	Но	0.25	53.3	26.7	10.2	1.77	311
Руч. Прав. Берег р. Марха	2008	7.7	2.28	0.53	73.9	35.0	7.6	39.0	360
Р. Марха	2008	7.65	Но	0.43	39.1	22.0	7.8	1.77	229
	2011-1	7.3	11.7	0.003	46.7	18.0	4.2	1.6	245
	2011-2	7.4	11.9	0.007	46.3	18.3	8.2	1.75	258
	2011-3	7.4	14.0	0.0063	47.7	19.9	6.3	1.48	251
Р. Марха у устья р. Далдын	2006	6.9	5.75	0.43	22	11.8	16	6.4	109

\* - данные Министерства охраны природы РС(Я) 2003 г., нд – нет данных, но – ниже предела обнаружения

Очевидно, что постоянный водный массоперенос радионуклидов из мертвого леса осуществляется поверхностными водотоками, при этом механический снос для изотопов Pu и  $^{137}\text{Cs}$  значителен только в период паводков.

В водах р. Мархи вблизи объекта ПЯВ «Кратон-3» установлены следующие активность радионуклидов, Бк/л:  $^{90}\text{Sr}$  ( $0.078 \pm 0.003$ ),  $^{239,240}\text{Pu}$  -  $(6 \pm 0.24) \cdot 10^{-4}$ ,  $^{238}\text{Pu}$  ( $18.6 \pm 0.7$ )  $\cdot 10^{-3}$ ,  $^3\text{H}$  ( $13 \pm 2.0$ )–( $52.1 \pm 2.6$ ) (см. рис. 88, табл. 39, тт. 48-09–50-09). Для вод р. Мархи отношение  $^{90}\text{Sr}/^{239,240}\text{Pu} = 130$ , а активность  $^{238}\text{Pu}$  31 раз больше активности  $^{239,240}\text{Pu}$ . Удивительно, но в водах р. Мархи активность  $^{238}\text{Pu}$  в 10-30 раз выше активности  $^{239,240}\text{Pu}$ . Это свидетельствует о большей водной подвижности изотопа  $^{238}\text{Pu}$  (см. табл. 39) и принципиально отличается от данных для лишайников, почв мертвого леса (см. табл. 38) и пробы паводковой воды руч. Безымянный 2002 г. (см. табл. 39).

По нашим оценкам, расход р. Мархи примерно в 10–20 раз превосходит расход ручья Безымянный (с учетом измеренных нами скоростей течения, глубины, ширины водотоков). В связи с этим после смешения с водами руч. Безымянный – основным поставщиком радионуклидов – активность трития должно было составить всего 8.4–8.8 Бк/л. Однако, в водах р. Мархи установлены высокие активности трития – до 52 Бк/л (см. табл. 39, т.47-09, 48-09, 49-09), что сопоставимо с его активностью в стоках с ближнего следа мертвого леса (см. табл.39, т. 6-08) и в руч. Безымянный (т. 52-09). Столь высокая активность трития в полноводной р. Мархе, т.е. отсутствие эффекта разбавления (см. табл.39), оказалось неожиданным фактом, требующим дальнейших исследований.

В р. Марху стекают не только стоки из загрязненного мертвого леса, но и стоки из могильника загрязненной техники, расположенного рядом с устьем боевой скважины. В 2008 г. на поверхности ручейка, вытекающего из-под насыпи, обнаружены разноцветные пятна горюче-смазочных материалов, что, вероятнее всего, обусловлено вымыванием из могильника захороненной техники. В пробе из этого ручейка (см. рис.88, т. 5-08, табл. 39) установлены значения радиоактивности, Бк/л: активность трития – 18, общая  $\beta$ -активность – ( $0.398 \pm 0.028$ ), что меньше УВ почти в 2 раза,  $\alpha$ -активность – ( $0.29 \pm 0.01$ ), что выше УВ [СанПиН..., 2009].

В водоеме, сформировавшемся после взрыва рядом с устьем боевой скважины и существовавшем вплоть до строительства в 2006 г. насыпи, в 1996 г. была установлена активность трития в ( $700 \pm 250$ ) Бк/л, а в 2001 г. – уже в ( $320 \pm 32$ ) Бк/л [Ramzaev et.al., 2009]. В 2001 г. и 2003 г. в этом водоеме активность  $^{90}\text{Sr}$  составило ( $38 \pm 6$ ) [Ramzaev et.al., 2009] и ( $49 \pm 18$ ) Бк/л соответственно [Ушницкий, 2004], что почти в 7.5–10 раз превышает УВ. Ниже по склону, в грунтовых водах, в 2007 г. установленная активность растворенного  $^{90}\text{Sr}$  ( $8.75 \pm 1.63$ ) Бк/л почти в 1.5 раза превышало УВ [Новгородов и др.,

2008]. В 2008-2009 гг. в грунтовых водах (т. 1-08 и 51-09) нами установлены следующие активности радионуклидов, Бк/л:  $^{90}\text{Sr}$  ( $1.99 \pm 0.07$ ),  $^3\text{H}$  ( $22 \pm 6$ ) до ( $67.2 \pm 1.9$ ) Бк/л,  $^{239,240}\text{Pu}$  ( $4 \pm 0.16$ )  $\cdot 10^{-4}$ ,  $^{238}\text{Pu}$  ( $7.8 \pm 0.3$ )  $\cdot 10^{-3}$ . Полученные данные меньше УВ (см. табл. 39). Помимо стоков из мертвого леса и могильника, может существовать и третий источник радионуклидов. Вспомним, что аварийный объект ПЯВ «Кратон-3» – это сложный радиогеоэкологический объект. По сути, полость взрыва представляет собой неконтролируемый подземный пункт размещения радиоактивных отходов, откуда на поверхность могут просачиваться радионуклиды. Далее рассмотрим ионный состав природных вод.

Местные поверхностные воды – слабощелочные гидрокарбонатные магниевые-кальциевые (табл. 40), обусловленные составом подстилающих пород района – известняками и доломитами. Формула Курлова описывает их следующим образом:

$$M_{0,3 \text{ г/л}} \frac{\text{HCO}_3^- 96 \text{ SO}_4^{2-} 3 \text{ Cl}^- 1}{\text{Ca}^{2+} 52 \text{ Mg}^{2+} 38 \text{ Na}^+ 10} \text{ pH } 7.4$$

При одинаковом ионном составе наблюдается последовательное снижение минерализации от малого водотока к большему, мг/л: стоки из мертвого леса – 430, руч. Безымянный – 330–390, р. Марха – 290–170, – что можно объяснить эффектом разбавления по мере увеличения расхода водотоков в этой цепи.

Три наблюдательные скважины у насыпи объекта ПЯВ «Кратон-3» пробурены всего на глубину до 2.5-3 м (см. рис. 88), из которых только скважины № 7 и 8 захватывают воды сезонно-талого слоя. Последние формируются в основном поверхностными и метеорными водами, и то преимущественно в годы с превышением среднегодовалого уровня осадков (многоводные годы). Третья скважина (№ 9) заложена неудачно (сухая). В грунтовых водах двух скважин (см. табл. 38, рис. 83) при их минерализации 515–560 мг/л обнаружены высокие концентрации хлоридов (до 250–298 мг/л) и натрия (до 143–145 мг/л); тип вод – гидрокарбонатно-хлоридный кальциево-натриевый:

$$M_{2,6 \text{ г/л}} \frac{\text{Cl}^- 79 \text{ HCO}_3^- 20}{\text{Na}^+ 51 \text{ Ca}^{2+} 29 \text{ Mg}^{2+} 19 \text{ K}^+ 1} \text{ pH } 6.6$$

Известно [Климовский, Готовцев, 1994], что в регионе развиты напорные соленые подземные водоносные горизонты. Данные по ионному составу вод из наблюдательных скважин свидетельствуют о просачивании этих подземных соленых вод по ослабленной зоне вокруг боевой скважины на поверхность. Другого объяснения появления хлоридов натрия в грунтовых водах под насыпью объекта ПЯВ «Кратон-3» у соискателя нет. Наличие в значимых концентрациях  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  в ручейке из-под насыпи (см. рис.88, т.

5-08) и в грунтовых водах из закопуши на подножье склона на берегу р. Мархи (т. 1-08, 51-09) также указывает на следы просочившихся подземных соленых вод после их смешения с пресными грунтовыми водами.

Таким образом, анализ имеющихся данных свидетельствует о том, что активность вод руч. Безымянный и мелких поверхностных водотоков у опушки мертвого леса (выше по рельефу от насыпи) формируется в результате загрязнения из зоны мертвого леса – очевидного поверхностного источника радиоактивности. По-видимому, в активность поверхностных и грунтовых вод у боевой скважины и ниже по склону могут вносить свой вклад и другие источники: существующий под насыпью радиоактивный могильник, подземные соленые воды, просочившиеся по ослабленной зоне вокруг боевой скважины (в случае, если последние загрязнены от подземного источника – полости взрыва).

Вместе с тем выявлено, что в речной воде высокие концентрации радионуклидов, отсутствует эффект разбавления.

В р. Мархе, куда стекают грунтовые воды со склона, активности радионуклидов даже выше, чем в грунтовых склоновых водах, Бк/л:  $^{239,240}\text{Pu}$   $(6 \pm 0.24) \cdot 10^{-4}$ ,  $^{238}\text{Pu}$   $(18.6 \pm 0.7) \cdot 10^{-3}$ , трития  $(52.1 \pm 2.6)$  (см. рис.88, табл.39, т. 48-09, 49-09), т.е. концентрация радионуклидов не снижается. Если высокие активности радионуклидов в грунтовых водах склона ожидаемы и логичны, то их высокие активности в речной воде невозможно объяснить только поверхностными склоновыми стоками. Можно предположить, что существует второй путь просачивания радионуклидов из подземного источника – полости взрыва – по столбу обрушения, образовавшемуся вследствие взрыва, и по трещиноватой зоне тектонического разлома с выходом в реку под землей. И именно наличие этого постоянного подводного выхода активности под склоном р. Мархи, скорее всего, и определяет высокую активность радионуклидов в речной воде и слабый эффект разбавления речной водой.

По мнению авторов [Микуленко и др., 2006], ПЯВ «Кратон-3» был произведен в непосредственной близости от тектонического разлома северо-северо-западного простирания (выявленного при дешифрировании аэроснимков), проходящего по руслу р. Мархи. Известно, что при бурении боевой скважины в 1977 г. в интервале 165-186 м глубины был пройден трещиноватый горизонт, поглощающий промывочную жидкость, который, по нашему мнению, и был зоной разлома. В результате аварийного ПЯВ «Кратон-3» сильно изменился не только поверхностный ландшафт, но и недра и, кроме того, мог раскрыться тектонический разлом. Факт просачивания на поверхность радионуклидов из полости взрыва по трещиноватой зоне тектонического разлома можно

установить путем массового отбора природных вод района и определения в них активности трития или проведения так называемой тритиевой съемки.

В 2009 г. проанализировано 59 проб из бочажин и ручейков у подножия бортов р. Мархи и речной воды с обоих берегов на протяжении до 3.6 км вниз и до 400 м выше по течению от боевой скважины ПЯВ «Кратон-3» (см. рис. 89, 90, кривая 3). На рис. 90 показано распределение трития в долине р. Мархи, причем за нулевую отметку по оси абсцисс принята т. 50-09, поскольку она расположена по прямой от устья боевой скважины ПЯВ «Кратон-3».

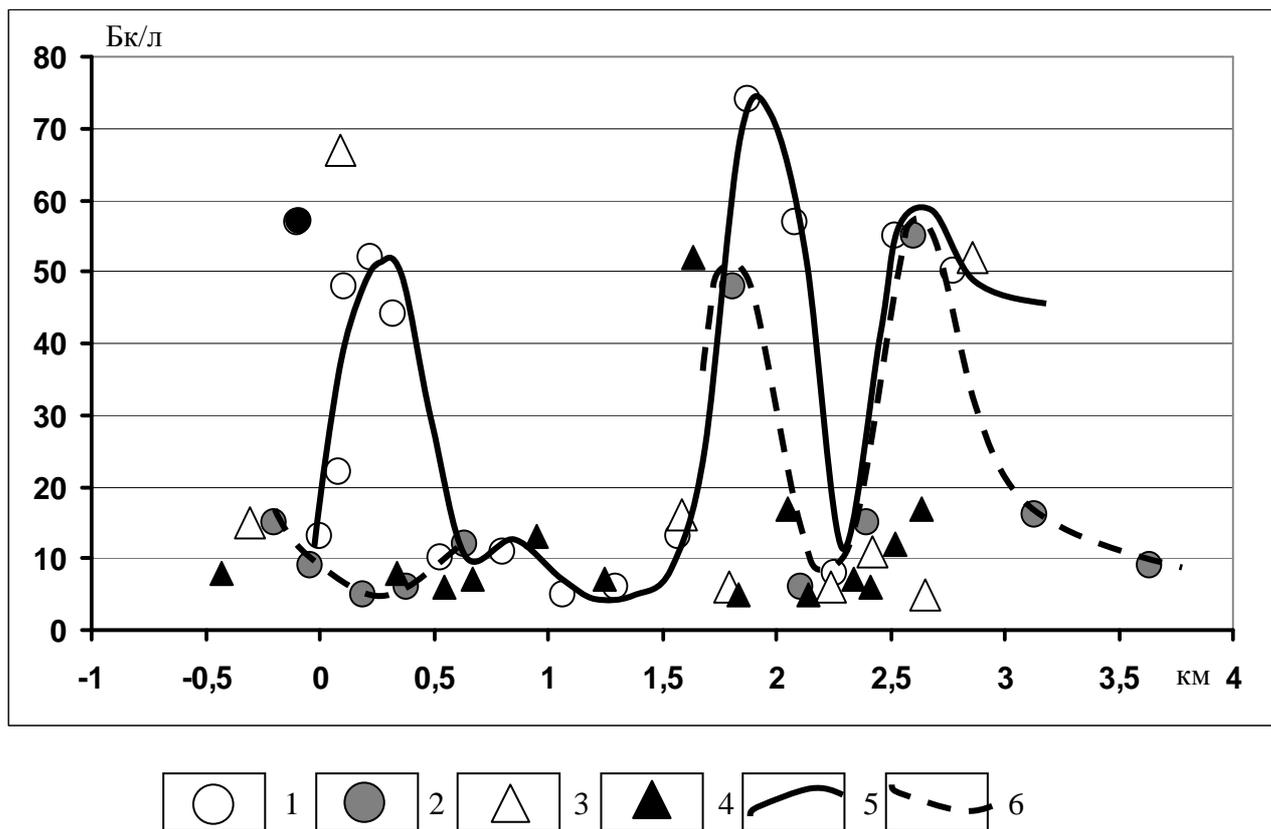


Рис.90. Распределение активности трития в природных водах в долине р. Марха (за нулевую точку отсчета принята т. 50-09, расположенная под склоном у устья боевой скважины: 0–4 – расстояния ниже по течению, 0...– –1 – выше по течению): 1 – речная вода с правого берега, 2 – речная вода с левого берега; 3 – воды мелких ручейков и бочажин, стекающих с правого берега р. Мархи, 4 – воды мелких ручейков и бочажин, стекающих с левого берега р. Мархи; кривые аномалий: 5, 6 – кривые аномалий, установленных по данным о активности трития в пробах воды, отобранных со стороны правого (5) и левого (6) берегов.

В речной воде в т. 50-09 активность  $^3\text{H}$  составляет всего  $(13 \pm 2.0)$  Бк/л (см. табл. 39 и рис. 88, 89). Примерно в 100 м ниже по течению от т. 50-09 зафиксирован первый пик высокой активности  $^3\text{H}$  (44–52 Бк/л), который прослеживается ниже по течению на протяжении еще 225 м ниже. В водах со стороны противоположного (левого) берега этого участка реки выявлены низкие активности трития – 5–15 Бк/л, среднее – 9.4 Бк/л.

Максимальная активность  $^3\text{H}$  в 74 Бк/л установлена в речной воде со стороны правого берега в 1.9 км ниже по течению от объекта ПЯВ. В речной воде со стороны левого берега примерно на том же месте (в 1.8 км ниже по течению) наблюдается также резкий пик активности трития – до 48 Бк/л при фоновом уровне 5–6 Бк/л. Рядом в ручейке зафиксирована активность в 52 Бк/л.

Третий пик активности трития зафиксирован ниже по течению в 2.5–2.85 км от т. 50-09: в речной воде с обоих берегов установлены активности в 50-55 Бк/л. Активность  $^3\text{H}$  в бочажине правого берега здесь также составила 52 Бк/л (рис. 88, в, 90). Полученные данные свидетельствуют о постоянном поступлении радионуклидов из локального источника, однако стоки из мертвого леса в данном случае исключаются из-за особенностей рельефа местности (см. рис. 88). Кроме того, обнаружены повышенные активности трития (до 17 Бк/л) в водах р. Чукуки – левого притока р. Мархи, впадающего в него в 4 км ниже по течению от объекта ПЯВ. Это может указывать на поток радионуклидов из полости взрыва по тектоническому разлому, выходящему по руслу р. Мархи и, возможно, связанному с р. Чукукой. Уровень трития в водах р. Чукуки снижается до 9 Бк/л только на расстоянии в 8.5 км выше её устья (рис.91).

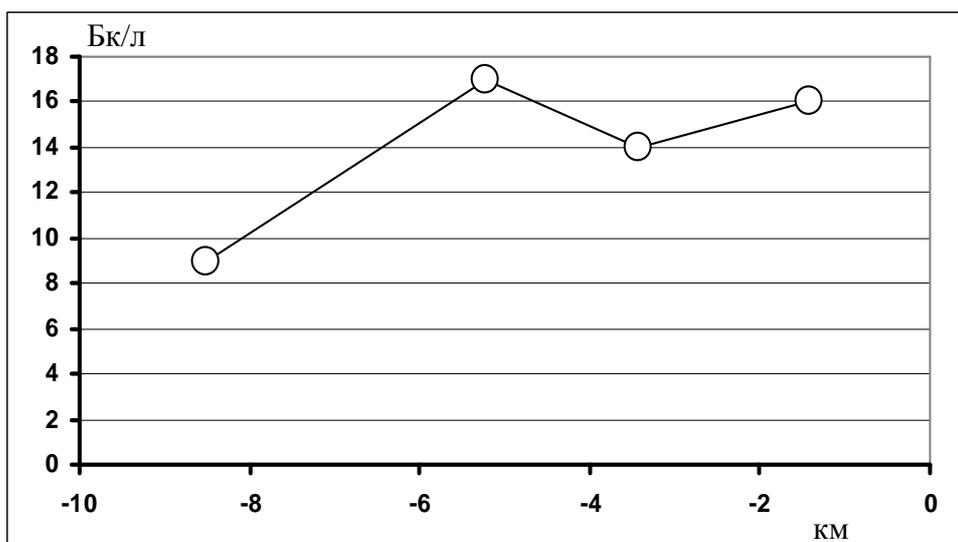


Рис. 91. Активность трития в речной воде р. Чукуки вверх от устья, расположенного в 4 км севернее от объекта ПЯВ «Кратон-3» и принятого за точку отсчета расстояния.

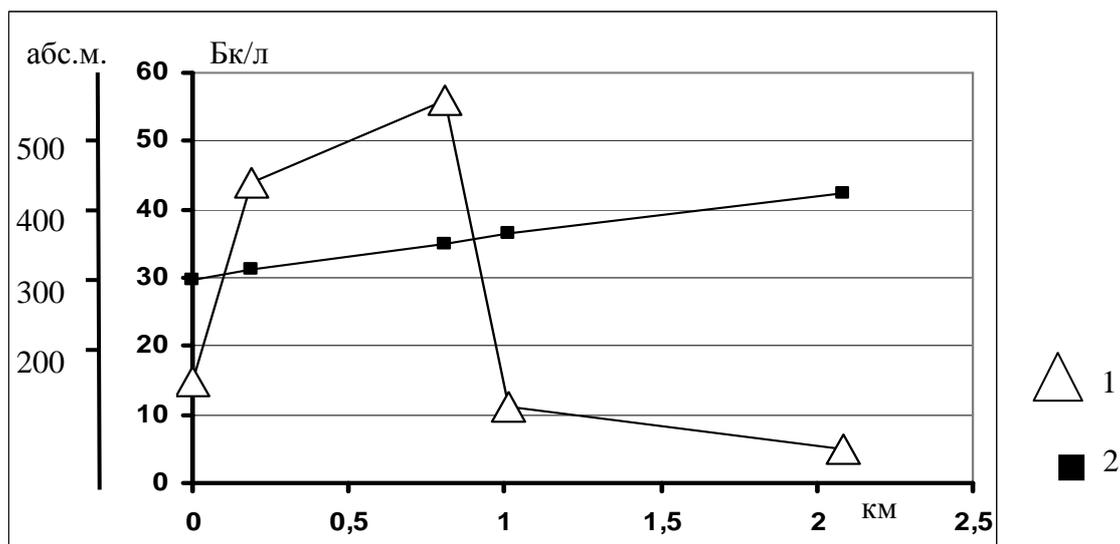


Рис.92. Активность трития в бочажинах по профилю «водораздел- долина» правого берега р. Мархи в 500 м южнее объекта ПЯВ «Кратон-3»(1) и абсолютным высотам точек проботбора (2).

На правом берегу р. Мархи в 500 м к югу от боевой скважины в пределах ненарушенного живого леса (МЭД 5–6 мкР/ч, иногда до 8–9 мкР/ч) нами опробованы воды бочажин по профилю длиной около 2 км. Оказалось, что здесь активность  $^3\text{H}$  изменяется также в широком диапазоне – от 5 до 56 Бк/л (рис. 92).

Заключаем, что из приведенных радиоэкогехимических данных следует, что объект ПЯВ «Кратон-3» представляет собой сложный радиогеоэкологический объект и служит поверхностным и подземным источниками радиоактивности.

1. Мохово-лишайниковый слой, лесная подстилка и первые несколько сантиметров гумусового горизонта почв являются основными депонентами поверхностной активности в пределах мертвого леса; высокие активности в них  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{239,240}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{Pu}$  на ближнем и среднем следах позволяют отнести их к твердым радиоактивным отходам.

2. Выявлен постоянный водный массоперенос радионуклидов, представленных в основном  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238,239,240}\text{Pu}$ ,  $^3\text{H}$  из зоны мертвого леса поверхностными водотоками. В условиях равнинно-холмистого рельефа из-за небольших скоростей водотоков массоперенос радионуклидов осуществляется преимущественно в жидком виде, за исключением весенних паводков, во время которых механический снос изотопов Pu и  $^{137}\text{Cs}$  становится значительным. Активность  $^{90}\text{Sr}$ , изотопов Pu и трития в пробах вод р. Мархи и руч. Безымянный, отобранных в 2009 г., намного меньше УВ [СанПиН..., 2009], но превышают фоновые уровни для сибирских рек на 1-3 порядка [Рихванов, 2009, Bolsunovsky, Bondareva, 2003].

3. Смещение соотношений активностей радионуклидов позволило установить, что изотопам  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{238}\text{Pu}$  свойственна высокая водная подвижность.

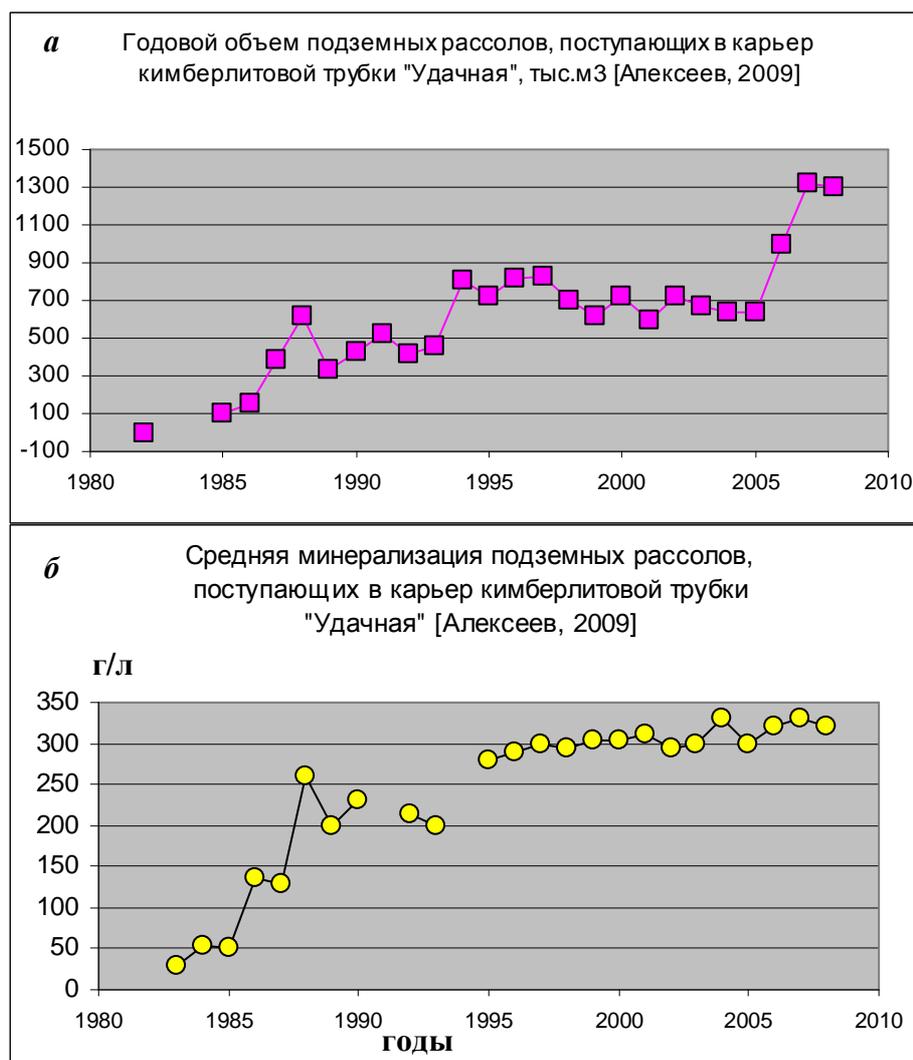
4. Пространственное распределение активности трития и других радионуклидов в природных водах района указывает на несомненный смыв радионуклидов из подземного могильника, расположенного рядом с устьем боевой скважины, а также на постоянный выход радионуклидов из полости взрыва на поверхность земли вместе с напорными солеными подземными водами. При этом выход активности вместе с подземными рассолами из недр осуществляется следующим образом: 1) по ослабленной зоне вокруг боевой скважины и выходом на поверхность рядом с устьем скважины; 2) по трещиноватой зоне тектонического разлома, протяженного вдоль русла р. Мархи и выходом на поверхность вдоль русла р. Мархи как рядом с объектом ПЯВ «Кратон-3», так и на удалении до 3 км. Просачивание активности из недр, возможно, идет и долине р. Чукуки - левого притока р. Мархи в 4 км ниже по течению от объекта ПЯВ «Кратон-3», так как в ней активность трития в 3.5 раза выше по сравнению с глобальным уровнем.

### **6.3. Флюидопроницаемая геоструктура подземных водоносных горизонтов как проводник подземной радиоактивности при взаимодействии двух геотехногенных систем: объекта ПЯВ «Кристалл» и сверхглубокого карьера кимберлитовой трубки «Удачная»**

В 3.5 км к юго-западу от объекта ПЯВ «Кристалл» расположен карьер кимберлитовой трубки «Удачная». В 1983 г., когда дно карьера на кимберлитовой трубке «Удачная» (см. рис.63, 67) достигло абсолютных отметок в 190-200 м, на его северо-западном борту возникла «стена плача» [Голубов и др., 2004] из-за начала разгрузки рассолов верхнекембрийского водоносного горизонта в карьер. Именно тогда впервые появилась проблема откачки подземных соленых вод и рассолов, поступающих в карьер, в специальные пруды, в том числе в хвостохранилища, и их последующей закачки (захоронения) в подземные водоносные горизонты [Климовский и др., 2002]. В настоящее время добыча ведется в руднике на глубине до – 800 абс.м, а добыча в карьере ведётся на глубине около -275 абс. м. В рудник и карьер продолжают поступать подземные рассолы и их объемы со временем увеличиваются [Алексеев, 2009](рис.93), что связано со вскрытием среднекембрийского водоносного горизонта, которому характерна большая водообильность. Эти рассолы закачивают в полигоны подземного захоронения (рис.63, б)

В 2004 г. к востоку от карьера в скважине №323 зафиксированы уровни подземных вод на уровне +130 – +70 абс. м. В карьере трубки «Удачная» сейчас соленые воды верхнекембрийского водоносного горизонта (слоя С-1) разгружаются на уровне +25 - –25 абс.м, здесь с уровнями +10, +5, –5, –25 абс. м проведен отбор проб воды [Голубов и др., 2004, Касаткин и др., 2004]. Снижение уровней разгрузки вод горизонта С-1 примерно на

200 м на бортах карьера, скорее всего, обусловлено образованием гидрогеологической депрессионной воронки по мере углубления карьера и откачки поступающих в него подземных вод (см. рис.67). В карьер кимберлитовой трубки «Удачная» разгружаются загрязненные радионуклидами (табл.28) подземные соленые воды и натрий-кальциевые хлоридные рассолы с минерализацией до 550 г/л (табл.29), что подтверждается также данными других исследователей [Голубов и др., 2004, Касаткин и др., 2004].



**Рис.93.** Суммарные среднегодовые объемы рассолов, закачанные в подземные полигоны (тыс.м<sup>3</sup>) (а) и их минерализация (б) [Алексеев, 2009, дополн.]. Условные обозначения: 1 - годовой объем, тыс.м<sup>3</sup>; 2 - уровень дна карьера, абс.м.; минерализация рассолов: 3 - минимальная, 4 - максимальная, 5 - средняя.

В 2002 г. в 300 м от полости взрыва на уровне +165 абс.м скважины № 104 активность <sup>3</sup>H составил 106 Бк/л, а в 3.5 км – на стенке карьера трубки «Удачная» (уровень от +10 до –25 абс.м) – от 23.8 до 61 Бк/л. Эти радиоактивные соленые воды относятся к верхнекембрийскому водоносному горизонту. Весьма подвижный тритий зафиксирован также в рассолах I среднекембрийского водоносного горизонта на стенках и

дне карьера: от –125 до –265 абс. м с концентрацией от 29.5 до 146 Бк/л (см. табл.28, рис.67). В 2008 г. в рассолах, отобранных в руднике на уровне –600 абс. м, нами выявлен тритий с концентрацией 117 Бк/л.

В 2002 г. в рассолах верхнекембрийского водоносного горизонта установлено активность  $^{90}\text{Sr}$  до 18.8 Бк/л (уровень –25 абс.м), а в верхней части I среднекембрийского водоносного горизонта (уровень –125 абс.м) установлены активность  $^{90}\text{Sr}$  до 47 Бк/л [Голубов и др., 2004]. В рассолах I среднекембрийского горизонта на уровне –265 абс. м (на дне карьера) в 2008 г. нами установлено активность  $^{90}\text{Sr}$  – от 1.47 Бк/л, а в 2009 г. на глубине –275 абс.м (на дне карьера) – всего 0.14 Бк/л. В рассолах из рудника с глубины –380 абс.м установлена активность  $^{90}\text{Sr}$ – 0.28 Бк/л. В рассолах этого горизонта на глубине –600 абс. м в 2008 г. выявлена активность  $^{239,240}\text{Pu}$  -  $0.62\pm 0.04$  Бк/л,  $^{238}\text{Pu}$  -  $0.0151\pm 0.003$  Бк/л. Радионуклиды найдены не только в рассолах карьера кимберлитовой трубки «Удачная», но и в рассолах скважин в нескольких километрах к югу и западу от ПЯВ (см. табл.28).

Итак, проведение ПЯВ привело к локальному поднятию верхнекембрийского и среднекембрийского водоносных горизонтов до их контакта с подземным очагом активности. Это обусловило загрязнение радионуклидами рассолов верхнекембрийского и верхнего слоя I среднекембрийского водоносного горизонтов. При наличии напора вертикальная миграция радионуклидов в нижние пласты I среднекембрийского водоносного горизонта должна быть практически приравнена к нулю (возможны диффузия и др. малоскоростные процессы). Поствзрывной техногенез, а именно углубление карьера, проходка рудника (шахты) на кимберлитовой трубке «Удачная» при постоянной откачке поступающих рассолов, способствовали формированию огромной гидрогеологической депрессионной воронки и обусловили постоянный приток радиоактивных рассолов с очага взрыва в карьер и рудник. По нашему мнению, смешение загрязненных радионуклидами рассолов верхнекембрийского и верхней части I среднекембрийского водоносного горизонта с рассолами нижних пластов происходит у стенок карьера в пределах депрессионной воронки.

По мере углубления карьера вовлекались в депрессионную воронку карьера все более глубокозалегающие водоносные комплексы, насыщенные более крепкими метаморфизованными рассолами, минерализация которых увеличивается от 40 до 550 г/л, также растет водообильность водоносных горизонтов. В этих условиях с годами росли объемы рассолов, поступающих в карьер, и они со временем становились все более минерализованные.

Сброс рассолов из карьера в хвостохранилища отразился на составе вод хвостохранилищ: их активность в 2-5 раза выше активности природных поверхностных

вод, как, например, реки Далдын (табл.28). Захоронение рассолов из карьера в подземные водоносные горизонты на спецполигонах Октябрьский и Киэнгский, приуроченных к Октябрьскому тектоническому разлому (см. рис.63), в течение длительного времени [Климовский и др., 2002] явилось следующим витком дальнейшего техногенного распространения радионуклидов в геологической среде. Это было решение горно-технологической задачи, а не подземное захоронение жидких отходов, содержащих радионуклиды, поскольку о радиоактивной составляющей рассолов стало известно позже.

При достижении в 1983 г. глубины карьера на кимберлитовой трубке «Удачная» 100 м (190-200 абс.м.) началась разгрузка верхнекембрийских подземных рассолов в карьер. По мере дальнейшего углубления карьера при постоянном его осушении (позднее и рудника) сформировалась глубокая депрессионная воронка, в которую устремились радиоактивные подземные рассолы из зоны МПЯВ «Кристалл». В депрессионной воронке происходит смешение радиоактивных рассолов с рассолами нижележащих горизонтов, о чем свидетельствует выявление радионуклидов в рассолах шахты на глубине –600 абс.м. Таким образом, поствзрывная техногенная дестабилизация геотехногенной системы полость МПЯВ – вмещающая геологическая среда привела к открытию этой системы и интенсивному выходу активности.

4. Сброс загрязненных рассолов из карьера в хвостохранилища и закачка в подземные спецполигоны являются дальнейшим техногенным этапом насильственного распространения радионуклидов в окружающей среде. Существует экологический риск просачивания радионуклидов на поверхность, в том числе в питьевой водозабор, из спецполигонов захоронения по трещиноватым зонам тектонических разломов. Примером последнего служит установленный факт просачивания радиоактивных подземных вод на поверхность по ослабленной зоне ствола боевой скважины МПЯВ «Кристалл» (второй вид выхода активности на поверхность).

Таким образом, с помощью комплекса методов разработана модель геотехногенной системы объект ПЯВ «Кристалл» – вмещающая геологическая среда – поверхностные системы, верифицированная данными бурения и изучения карьера.

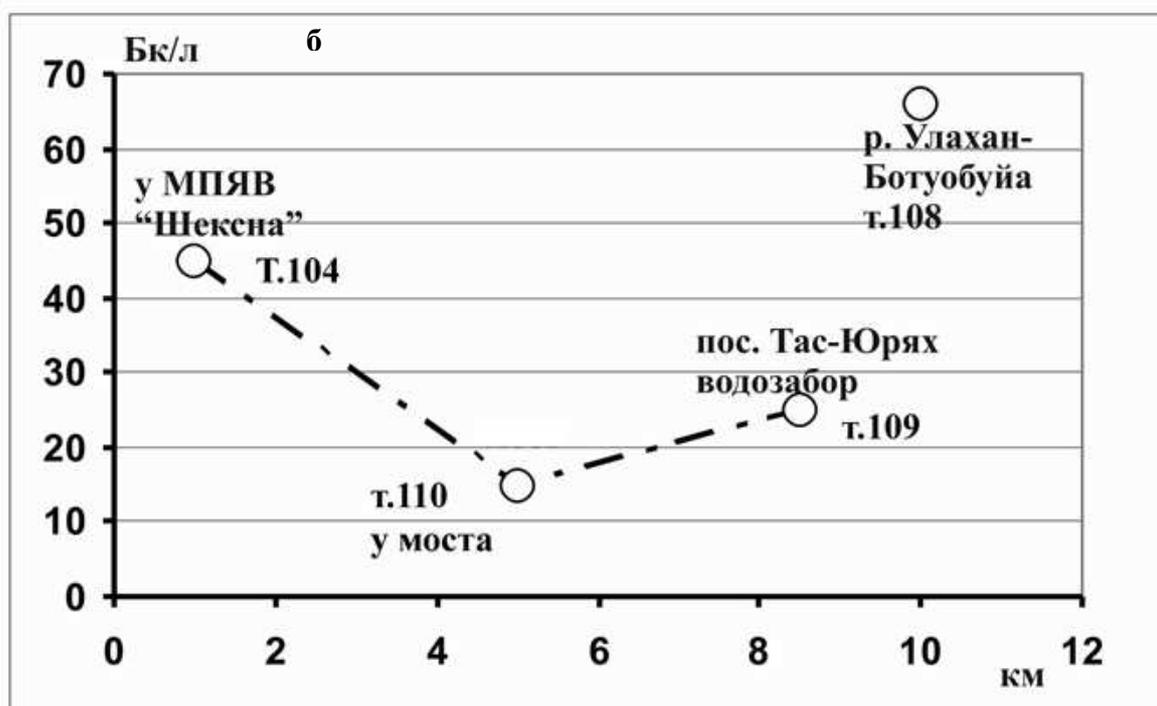
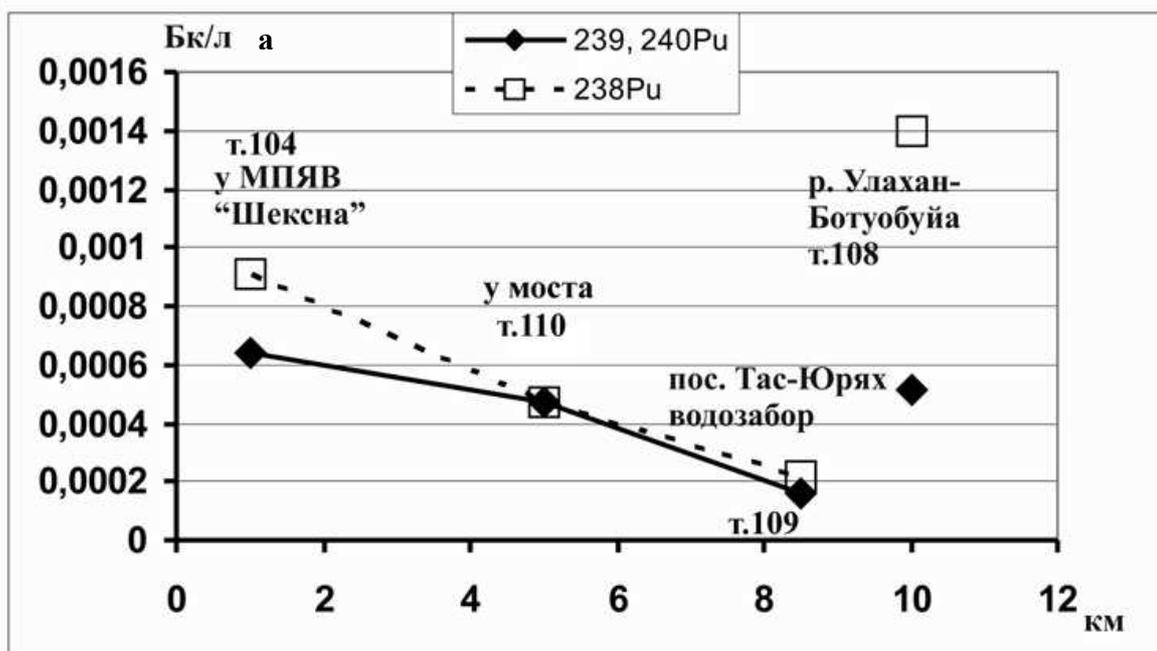
#### **6.4. Естественные флюидопроницаемые геоструктуры на Среднеботуобинском нефтегазоконденсатном месторождении**

Анализ полученных радиоэкологических данных Среднеботуобинского месторождения, где было проведено 7 камуфлетных ПЯВ в штатном режиме, указывает на наличие, кроме ослабленных зон вокруг боевых скважин, также других геоструктур, служащих проводниками для переноса радионуклидов в геологической среде и выхода

радиоактивности на поверхность земли. Посмотрим на результаты анализа пробы воды р. Улахан- Ботубуйа выше устья правого притока руч. Тас-Юрях (рис.74).

Несмотря на то, что расход самой крупной в районе реки Улахан-Ботубуйа превышает расходы других водотоков – ее притоков в десятки и более раз, в ней (т.108, рис.74, в, рис.94, табл.35) сохраняются (и даже увеличиваются) уровни активностей техногенных радионуклидов:  $^3\text{H}$  – 66 Бк/л,  $^{239, 240}\text{Pu}$  –  $5,1 \times 10^{-4}$  Бк/л,  $^{238}\text{Pu}$  –  $1,4 \times 10^{-3}$  Бк/л. Здесь несомненно мы наблюдаем отсутствие эффекта разбавления. Проба в р. Улахан-Ботубуйа отобрана в 4.3 км выше устья р. Тас-Юрях, так что радионуклиды с объекта «Шексна» с поверхностным стоком р. Тас-Юрях не могли попасть сюда.

Источником техногенных радионуклидов, зафиксированных здесь, может быть как полость взрыва «Шексна», так и полости других ПЯВ СБНГКМ в равной мере, но только при наличии подземного подводящего проводника, например, при просачивании радионуклидов с подземными водами по трещиноватым зонам тектонических разломов и водоносных горизонтов. На рис. 74, б приведена одна из последних тектонических схем разломов района СБНГКМ. Тектонические дислокации взбросо-надвигового типа и сопутствующих им пликвативных структур разбивают район на ряд блоков. Практически все объекты МПЯВ были произведены вблизи разломных зон, особенно объект «Шексна» практически «сидит» на разломе регионального масштаба. Взрывы могли приоткрыть разломные зоны, по которым загрязненные радионуклидами напорные рассолы подсолевого III водоносного комплекса (с пластовым давлением до ~30- 32 МПа) могли начать просачиваться вверх. В районе СБНГКМ выше на 300- 400 м от полостей 6-ти ПЯВ расположено интрузивное тело пластовых траппов, трещиноватые контактные зоны которых при установлении гидравлической связи с полостями взрывов могут также служить проводниками радиоактивных флюидов по геологической среде и способствовать их выходу на поверхность земли. Данное заключение подтверждается повсеместно высокими концентрациями трития не только в воде площадок боевых скважин, но в целом во всех водотоках района СБНГКМ (табл.35).



**Рис.94.** Активность изотопов Рu (а) и трития (б) в р. Улахан-Ботубуйа и р. Тас-Юрях по мере удаления от объекта ПЯВ «Шексна», км (расположение точек отбора проб см. рис.74, в).

Формы нахождения трития в полости взрыва не освещены в открытой печати, но в поверхностных условиях тритий находится преимущественно в виде молекулы воды  $^1\text{H}^3\text{HO}$  [Рихванов, 2009], что обуславливает его высокую подвижность и возможность его использования в качестве индикатора современных потоков водного массопереноса техногенных радионуклидов в системе «полость взрыва – геологическая среда – поверхность земли». Средняя активность трития в поверхностных водах СБНГКМ

составляет 51.1 Бк/л. В водных пробах буровых площадок МПЯВ (т.е. в пределах ослабленной зоны вокруг боевой скважины) максимальная активность трития достигает 170 Бк/л, что превышает в 34 раза глобальный и региональный фон трития в поверхностных водах, равный 5 Бк/л. Нами в июле 2010 г. в р. Лена у г. Ленск определено активность трития в  $7 \pm 2.4$  Бк/л, а в августе 2011 г. в поверхностных водах долины Туймаада около г. Якутск – также в  $6 \pm 2$  Бк/л, что в целом соответствует глобальному фону (в рамках относительной погрешности метода) и принято нами за региональный фон.

Появление высокой активности трития в 108 Бк/л в ручье на верховье р. Тэлгэспит в 3.5 км выше по течению от объектов ПЯВ (т.33, рис.74, б, табл.35) мы не можем объяснить поступлением радионуклидов по ослабленной зоне вокруг боевой скважины (поскольку здесь нет объектов ПЯВ) или привнесом поверхностными стоками реки (поскольку получается против течения), если только не допустить вариант просачивания радионуклидов из подземных источников по проводящим геологическим структурам, возможно, по системам «полость взрыва – столб обрушения – тектонические разломы» или «полость взрыва – столб обрушения – тектонические разломы – водоносные горизонты – контактные зоны траппов – тектонические разломы» и другим вариантам сочетания проводящих геоструктур.

На верховье р. Тэлгэспит в 6 км от объектов МПЯВ из кустовых скважин (см. рис.74, б, т.79) с глубины 1541-1717 м были отобраны пробы бурового шлама и подземных рассолов. В буровом шламе установлены техногенные радионуклиды:  $^{90}\text{Sr}$  – 1.2 - 2.9 Бк/кг,  $^{239,240}\text{Pu}$  – 0.2 Бк/кг,  $^{238}\text{Pu}$  – 0.2 Бк/кг. В подземных рассолах скважин зафиксирован радиостронций: на глубине 1541-1558 м активность  $^{90}\text{Sr}$  составило – 0.049 Бк/л, на глубине 1709 м – 0.054 Бк/л, на глубине 1717 м – 0.702 Бк/л.

Уникальность геологической среды СБНГКМ заключена в том, что в нижней части геологического разреза района (с 1830 м глубины и ниже) развита аномальная депрессионная водонапорная система с дефицитом пластового давления от 2.5 до 5 МПа, тогда как в верхней части разреза сформирована элизионная водонапорная система. И именно аномальная депрессионная водонапорная система могла привести к перетеканию радиоактивных рассолов из зон взрывов на уровне 1501-1541 м в более нижние горизонты (примерно на 250 м), и поэтому наблюдаются более высокие активности радиостронция на глубине 1717 м, нежели на уровне 1541-1558 м. В зону кустовых скважин т.79 техногенные радионуклиды из зоны взрывов несомненно могли попасть только по подземным флюидопроницаемым геоструктурам – по водоносным горизонтам, или трещиноватым зонам тектонических разломов, которые будут рассмотрены ниже.

Соискателем предполагается, что широкому переносу радиоактивных флюидов в геологической среде СБНГКМ и их интенсивному просачиванию на поверхность земли способствует существующее сейчас активное техногенное воздействие на флюидодинамический режим подземных водоносных горизонтов. При добыче углеводородного сырья создаются динамические депрессионные воронки у одних скважин, производится закачка и нагнетание растворов (в т.ч. кислотных) по сети других буровых скважин с целью усиления нефтеотдачи продуктивных пластов и т.п. Кроме того, высокая разбуренность территории СБНГКМ (известно 98 скважин) создает возможность межслоевого перетекания подземных флюидов (см. рис.71, б), в том числе радиоактивных, по стволам и околоствольному пространству потерявших герметичность старых буровых скважин. При старении оборудования скважин, деформации и разрушении цементных пробок, дальнейшего трещинообразования и деградации мерзлоты в зоне боевых скважин, значит, и подвижек пород, не только сами эти ослабленные зоны вокруг боевой скважины, но собственно стволы скважин (колонна и заколонное пространство) могут стать проводниками радиоактивности в поверхностные системы. По результатам обследования наиболее критичной признана ситуация на объекте ПЯВ «Ока» (рис.59). Здесь на буровой площадке в пределах ослабленной зоны вокруг боевой скважины активно идут термокарстовые процессы, деградация мерзлоты привела к таянию полигонально-жильных льдов и развитию на площадке крупно- и мелкополигонального холмистого («байджарахового») рельефа с развитием полостей и трещин в их ложбинах, в которых собираются выходящие на поверхность подземные радиоактивные соленые воды.

Вторым по критичности признано положение на объекте «Нева-1», где наблюдаются интенсивные склоновые эрозионные процессы. Необходимо отметить скважину «Нева-4» №101, как объект, который нуждается в безотлагательном техническом изучении: в ходе полевых работ установлено, что через ее устьевое оборудование идет интенсивное истечение газов (определено по запаху). Герметичность подземной емкости объекта «Нева-4» в пласте каменной соли остается невыясненной.

Итак, на основе радиоэкогехимического изучения поверхностных вод СБНГКМ выявлено, что, несмотря на штатный режим поведения ПЯВ, геотехногенные системы ПЯВ на СБНГКМ являются открытыми системами и по цепи «полость взрыва – вмещающая геологическая среда – дневная поверхность» идет интенсивный перенос радионуклидов и сопутствующих элементов вместе с напорными подземными рассолами. Аномальная депрессионная водонапорная система, развитая в нижней части геологического разреза СБНГКМ, по-видимому, создает условия для перетоков

подземных флюидов, в.т.ч. радиоактивных, в нижние горизонты, что подтверждает обнаружение изотопов Pu,  $^{90}\text{Sr}$  в буровом шламе и  $^{90}\text{Sr}$  рассолах в 6 км от объектов ПЯВ на глубине 1717 м (что ниже примерно на 200 м уровня закладки ЯВУ на СБНГКМ).

Повсеместно высокая активность трития в водотоках СБНГКМ – до 108 Бк/л при средней активности 51 Бк/л, превышающее глобальный уровень в 20-10 раз, обусловлено уникально высокой подвижностью трития и его повсеместному выходу по естественным и техногенным проводящим геоструктурам на поверхность земли. Тритий в силу его подвижности может служить основным радиогеохимическим индикатором процессов массопереноса радионуклидов в системе «полость ПЯВ – вмещающая геологическая среда – дневная поверхность»

Основными естественными проводниками радиоактивности в системе «полость взрыва – геологическая среда … поверхность земли» служат зоны тектонических разломов, которые, в свою очередь, могли дополнительно раскрыться вследствие механического воздействия взрывов, подземные водоносные горизонты и, возможно, контактные зоны пластовых тел траппов.

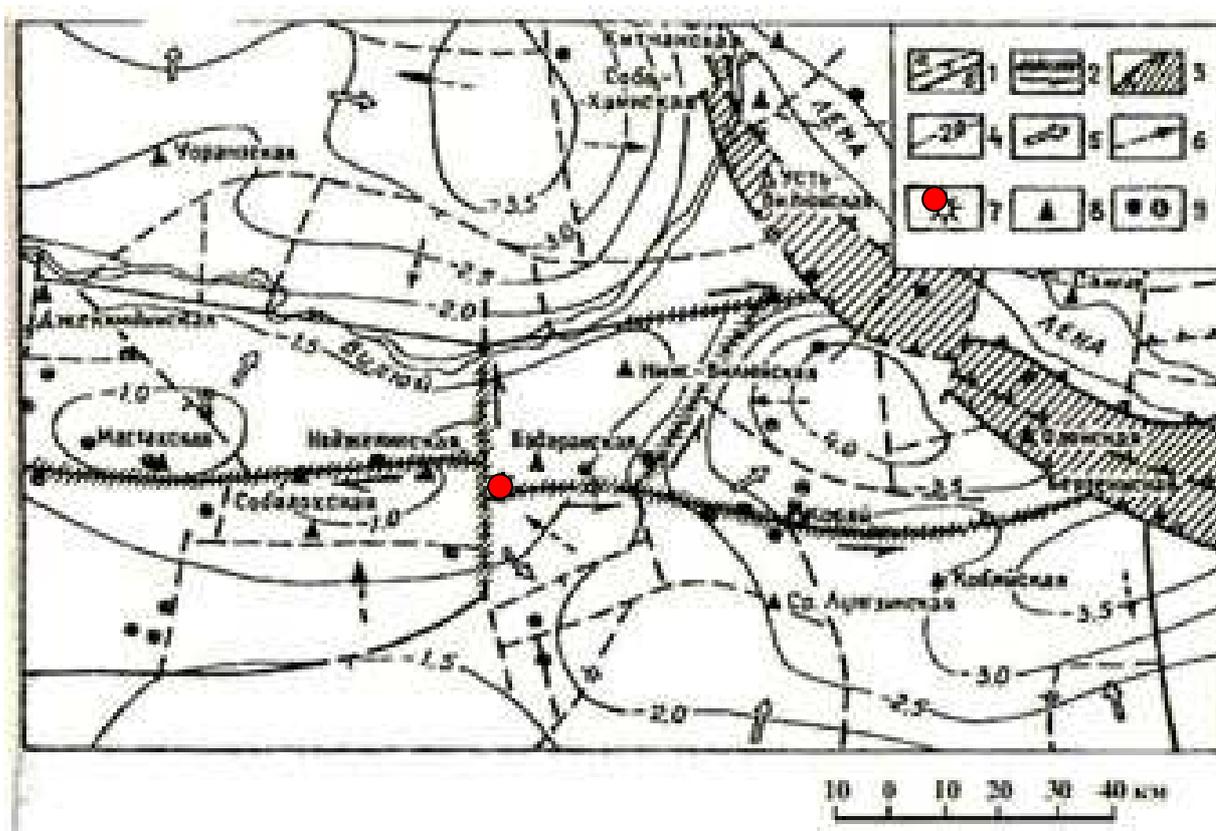
Наличие изотопов  $^3\text{H}$ ,  $^{238, 239, 240}\text{Pu}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ , превышающие глобальный уровень в ~ 10 и более раз в пробах водотоков района вдали от объектов ПЯВ, в том числе выше по течению от объектов ПЯВ, отсутствие эффекта разбавления концентраций этих радионуклидов в самом крупном водотоке района – р. Улахан-Ботубуйа, обнаружение  $^{238, 239, 240}\text{Pu}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  в буровом шламе и рассолах на расстоянии в 6 км от объектов ПЯВ и на 250 м ниже по разрезу подтверждают данный вывод.

По-видимому, широкому массопереносу радиоактивных флюидов в геологической среде СБНГКМ и их интенсивному просачиванию на поверхность земли способствует активное техногенное воздействие на флюидодинамический режим подземных водоносных горизонтов при добыче углеводородного сырья: создание депрессионных воронок у одних скважин, закачка и нагнетание растворов (в т.ч. кислотных) по сети других буровых скважин с целью усиления нефтеотдачи продуктивных пластов и т.п.

Проведенные исследования показали, что наличие многослойных соляных пластов, отличающихся пластичностью, способностью самозалечивания трещин, в геологической среде СБНГКМ в полной мере не обеспечивает изоляцию подземной активности объектов ПЯВ. Идея об использовании нижней части геологического разреза СБНГКМ с аномально-депрессионной водонапорной системой в качестве места геологического захоронения РАО требует дальнейшего исследования.

## 6.5. Радиоэкогеохимические индикаторы выхода подземной радиоактивных флюидов в районе ПЯВ «Кратон-4»

Объект ПЯВ «Кратон-4» расположен на глубине 574 м на восточном склоне погребенного Хапчагайского мегавала, в зоне перехода Вилюйской гемисинеклизы в Предверхоанский краевой прогиб в слаболитифицированных песчаниках и алевролитах. В условиях инфильтрационной водонапорной системы верхней части геологической среды радионуклиды из полости взрыва вместе с подземными водами преимущественно двигаются к востоку по склону Хапчагайского мегавала, чему способствует тектонический разлом восточного простирания [Тектоника..., 2001, Микуленко и др., 2006 ] (рис.95).



**Рис.95.** Структурно-тектоническая схема ПЯВ «Кратон-4» [Микуленко и др., 2006]. Условные обозначения: 1 – тектонические разлома: установленные (а), предполагаемые (б); 2- разломы флюидопроводящие и направления (показаны стрелками) миграции флюидов вдоль них; 3 – тектонические флюидобарьеры; 4 – стратоизогипсы (км); 5 – главные направления миграции подземных вод в гранулярных коллекторских секторах; 6 – главные направления миграции углеводородов (нефть, газ) в гранулярных коллекторах; 7 – эпицентр ПЯВ; 8 – глубокие скважины нефтеразведочных площадей; 9 – населенные пункты.

Поскольку глубина объекта «Кратон-4» ниже уровня дренажа р.Лены, выход радиоактивных стоков на поверхность земли был бы маловероятным, если бы инфильтрационная водонапорная система не осложнялась восходящими глубинными потоками подземных вод, поступающих по зонам надвиговых нарушений со стороны Предверхоанского прогиба [Тектоника..., 2001] при наличии литологических алевролитовых

и аргиллитовых подпоров в геологическом разрезе. Проведенные исследования подтвердили предположение соискателя о вероятном захвате радионуклидов восходящими потоками подземных вод.

Выявлены выходы техногенных радионуклидов к востоку от объекта «Кратон-4». В 2.6-4 км к востоку от объекта «Кратон-4» в донных отложениях обнаружены:  $^{137}\text{Cs}$  – до 54 Бк/кг,  $^{90}\text{Sr}$  – до 17 Бк/кг,  $^{239, 240}\text{Pu}$  – до 2.08 Бк/кг, тогда как к западу от объекта ПЯВ активность радионуклидов намного ниже: в 8 км в донных отложениях озера обнаружен  $^{137}\text{Cs}$  на порядок ниже – 5.7 Бк/кг,  $^{90}\text{Sr}$  – 2.8-10 Бк/кг, изотопы Pu – не установлены.

В донных отложениях среднее содержание U – 0.5 г/т, Th – 2.4 г/т, в поверхностных водах фоновое содержание U 0.012 мкг/л, а Th не обнаружен, и эти низкие содержания соответствуют фоновым содержаниям, характерным для местных геохимических ландшафтах, развитых на кварц-полевошпатовых песчаниках. Выявлено, что в пределах ослабленной зоны боевой скважины «Кратон-4» и к востоку от нее концентрации U в поверхностных водах увеличиваются в 22–73 раза и составляют 0.25–0.85 мкг/л. Отмечено примерно двухкратное увеличение содержания Th и U в донных отложениях к востоку от ПЯВ.

Наилучшим индикатором радиоактивных подземных флюидов с объекта ПЯВ «Кратон-4» стало  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  отношение. В донных отложениях озер, расположенных к востоку от объекта «Кратон-4»  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  снижено до 132 (вместо природного 138) (рис.97). В озерной воде и водотоках у боевой скважины и к востоку от объекта ПЯВ  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  смещено до 126.8 (рис.97). Если бы в озерную систему  $^{235}\text{U}$  поступил при взрыве, то за прошедший период постоянное поступление метеорных вод давно бы снивелировало  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  соотношение до природного 138. А наличие смещения изотопного соотношения  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  указывает на продолжающийся процесс выхода радионуклидов из недр.

В донных отложениях 5-ти озер, расположенных к востоку от ПЯВ «Кратон-4» установлены редкие элементы: Be – 2.9–5.1 г/т, Co – 15-21 г/т, Y – 24-32 г/т, тогда как в донных отложениях других озер района Be не установлен, а содержание Co ниже в 3-4 раз (всего 4.5 г/т), Y – ниже в 4-5 раз (всего 6.8 г/т). Кроме того, в донных отложениях этих озер зафиксировано увеличение содержания лантаноидов, которое формирует отдельное геохимическое поле на диаграмме La+Ce/Yb+Lu (рис.98, 99). В поверхностных водах эти редкие элементы и микроэлементы обнаружены в единичных пробах ослабленной зоны вокруг боевой скважины обнаружены (Be – 0.1 мкг/л, Co – 1.11 мкг/л, Y – 0.4 мкг/л).

На восточном склоне погребенного Хапчагайского мегавала в зоне перехода Вилюйской синеклизы в Предверхоаянский прогиб среди слаболитифицированных песчаников

**Таблица 41.** Общий химический состав поверхностных вод района объекта МПЯВ «Кратон-4», мг/л

№ пробы	Место озеро	координаты	Дата	М	pH	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
14	озеро №8	N63 40.370 E125 21.312	04.09.2011	51	6,12	7,1	1,13	30,5	0,58
39	озеро Соболах	N63 41.911 E125 28.917	04.09.2011	207	6,4	8,6	0,87	183	0,29
40	озеро Ничалах	N63 42.047 E125 29.779	04.09.2011	93	6,5	8,9	0,81	63	0,42
2а	озеро Ничалах (подледная)	N63 42.043 E125 29.739	18.04.2012	165		5,7	49	75	0,8
34	озеро Сордонгнох	N63 40.705 E125 31.599	06.09.2011	110	6,59	9,1	0,76	80	0,38
1а	озеро Сордонгнох (подледная)	N63 40.689 E125 31.589	18.04.2012	129		5,3	13,8	85	0,6
15	озеро Лаха	N63 39.785 E125 33.916	03.09.2011	104	6,39	8,2	2,78	79	0,55
17	озеро Луку	N63 38.504 E125 37.048	03.09.2011	81	6,15	8,0	0,9	61	0,47
41	озеро Согуруу Кель	N63 40.494 E125 56.463	07.09.2011	256	6,82	10	0,98	190	0,58
43	озеро Олорор Кель	N63 41.228 E125 57.107	07.09.2011	338	7,51	9,8	0,76	250	0,49
4а	озеро Джикимдэ (подледная)	N63 41.210 E125 57.100	19.04.2012	344		6,8	28,8	280	0,7
44	озеро Харыйалах	N63 41.253 E125 59.643	07.09.2011	222	7,08	10,8	0,68	165	0,61
3а	озеро Харыйалах (подледная)	N63 41.554 E125 59.595	19.04.2012	442		6,6	170	210	0,9

М\*- минерализация.

**Продолжение таблицы 41.** Общий химический состав поверхностных вод района объекта МПЯВ «Кратон-4», мг/л

№ пробы	Место озера	координаты	Дата	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
14	озеро №8	N63 40.370 E125 21.312	04.09.2011	4,41	1,9	0,00092	5,3
39	озеро Соболах	N63 41.911 E125 28.917	04.09.2011	3,54	2,3	0,00097	7,5
40	озеро Ничалах	N63 42.047 E125 29.779	04.09.2011	4,44	2,6	0,00025	9,4
2а	озеро Ничалах (подледная)	N63 42.043 E125 29.739	18.04.2012	8,5	10	0,79	15
34	озеро Сордонгнох	N63 40.705 E125 31.599	06.09.2011	4,1	3	0,00230	10,8
1а	озеро Сордонгнох (подледная)	N63 40.689 E125 31.589	18.04.2012	9,1	6	0,54	8,3
15	озеро Лаха	N63 39.785 E125 33.916	03.09.2011	3,5	2,2	0,00112	6,7
17	озеро Луку	N63 38.504 E125 37.048	03.09.2011	2,8	1,7	0,00056	5,5
41	озеро Согуруу Кель	N63 40.494 E125 56.463	07.09.2011	9,6	16,3	<0,0001	29,7
43	озеро Олорор Кель	N63 41.228 E125 57.107	07.09.2011	18,1	23,7	0,00063	34,6
4а	озеро Джикимдэ (подледная)	N63 41.210 E125 57.100	19.04.2012	7,1	8,4	0,73	11
44	озеро Харыйалах	N63 41.253 E125 59.643	07.09.2011	6,7	14,9	0,00048	23,0
3а	озеро Харыйалах (подледная)	N63 41.554 E125 59.595	19.04.2012	9,6	19	1	25

**Таблица 42.** Содержание радионуклидов и микроэлементов в поверхностных районах объекта «Кратон-4», мкг/л и Бк/л

№ пробы	Место озера	координаты	Be, мкг/л	Ti, мкг/л	Co, мкг/л	Th, мкг/л	U, мкг/л	<sup>238</sup> U/ <sup>235</sup> U	<sup>3</sup> H, Бк/л	<sup>90</sup> Sr, Бк/л	<sup>239,240</sup> Pu, Бк/л	<sup>238</sup> Pu, Бк/л
14	Озеро Арылах №8	N63 40.370 E125 21.312	< 0.1	0.93	0.22	<0.01	0.009	139.87	3±1			
39	озеро Соболах	N63 41.911 E125 28.917	< 0.1	2.43	0.36	<0.01	0.014	137.35	<3			
40	озеро Ничалах	N63 42.047 E125 29.779	< 0.1	1.98	0.11	<0.01	0.003	140.07	6±2	0.013	<0.00002	<0.00002
2а	озеро Ничалах	N63 42.043 E125 29.739	0.055	54	0.45	0.65	0.033	137.8	5±2			
20	руч Хаптасыннах	N63 41.932 E125 30.947	< 0.1	3.05	<b>1.7</b>	<0.01	0.68	133.6	5±2			
20	руч Хаптасыннах	N63 41.927 E125 30.933	<0.01	2.65	0.35	0.004	0.769	137.5	нд			
34	озеро Сордонгнох	N63 40.705 E125 31.599	< 0.1	1.92	0.66	<0.01	0.031	126.8	4±1	0.02	<0.00002	<0.00002
34	озеро Сордонгнох	N63 40.695 E125 31.577	<b>0.011</b>	<b>6.08</b>	0.20	0.018	0.022	135.81	нд			
1а	озеро Сордонгнох	N63 40.689 E125 31.589	<b>0.025</b>	72	0.38	1	0.253	138	3±1			
3	бочажина б/н	N63 40.554 E125 31.595	< 0.1	0.99	<b>1.04</b>	0.01	0.01	137.4	3±1			
5	ручей № 2	N63 40.033 E125 32.131	< 0.1	1.88	<b>1.11</b>	0.01	0.85	138.09	4±1			
15	озеро Лаха	N63 39.785 E125 33.916	< 0.1	1.28	0.26	<0.01	0	141.95	5±1			

Продолжение таблицы 42												
№ пробы	Место озера	координаты	Be, мкг/л	Ti, мкг/л	Co, мкг/л	Th, мкг/л	U, мкг/л	<sup>238</sup> U/ <sup>235</sup> U	<sup>3</sup> H, Бк/л	<sup>90</sup> Sr, Бк/л	<sup>239,240</sup> Pu,Бк/л	<sup>238</sup> Pu,Бк/л
16	руч из озера Лаха	N63 39.177 E125 34.945	< 0.1	1.06	0.55	<0.01	0.011	131.6	4±1			
19	озеро Арылах-2	N63 40.264 E125 36.384	< 0.1	1.53	<b>0.94</b>	<0.01	0.4	137.15	6±1			
17	озеро Луку	N63 38.504 E125 37.048	<b>0.1</b>	0.48	0.26	<0.01	0.013	135	<3			
18	руч из озера Луку	N63 38.533 E125 37.186	< 0.1	0.76	0.85	<0.01	0.013	137.77	3±1			
41	озеро Согуруу Кель	N63 40.494 E125 56.463	< 0.1	0.85	0.28	<0.01	0.25	135.19	5±1			
43	озеро Олорор Кель	N63 41.228 E125 57.107	< 0.1	0.95	0.23	<0.01	0.34	135.3	4±1	0.015	<0.00002	<0.00002
4а	озеро Джикимдэ	N63 41.210 E125 57.100	0.034	110	0.34	2	0.475	139	4±1			
44	озеро Харыйалах	N63 41.253 E125 59.643	< 0.1	0.70	0.14	<0.01	0.14	129.97	3±1			
3а	озеро Харыйалах	N63 41.554 E125 59.595	0.021	2.3	0.23	0.022	0.301	137	4±1			
7	№ 7	N63 40.706 E125 19.652	< 0.1	0.9	0.14	<0.01	нпо	138.00	5±1			
6а	№6	N63 39.100 E125 25.541	< 0.1	0.76	0.18	<0.01	0.01	139.20	5±1			
17а	Сеттэ	N63 42.816 E125 32.261	< 0.1	0.78	0.2	<0.01	0.02	138.00	4±1			
45	б/н	N63 40.725 E125 46.296	< 0.1	0.82	0.67	<0.01	0.03	138.0	5±1			
41а	озеро Согуруу Кель	N63 40.348 E125 53.468	< 0.1	0.84	0.32	<0.01	0.27	135.20	5±1			

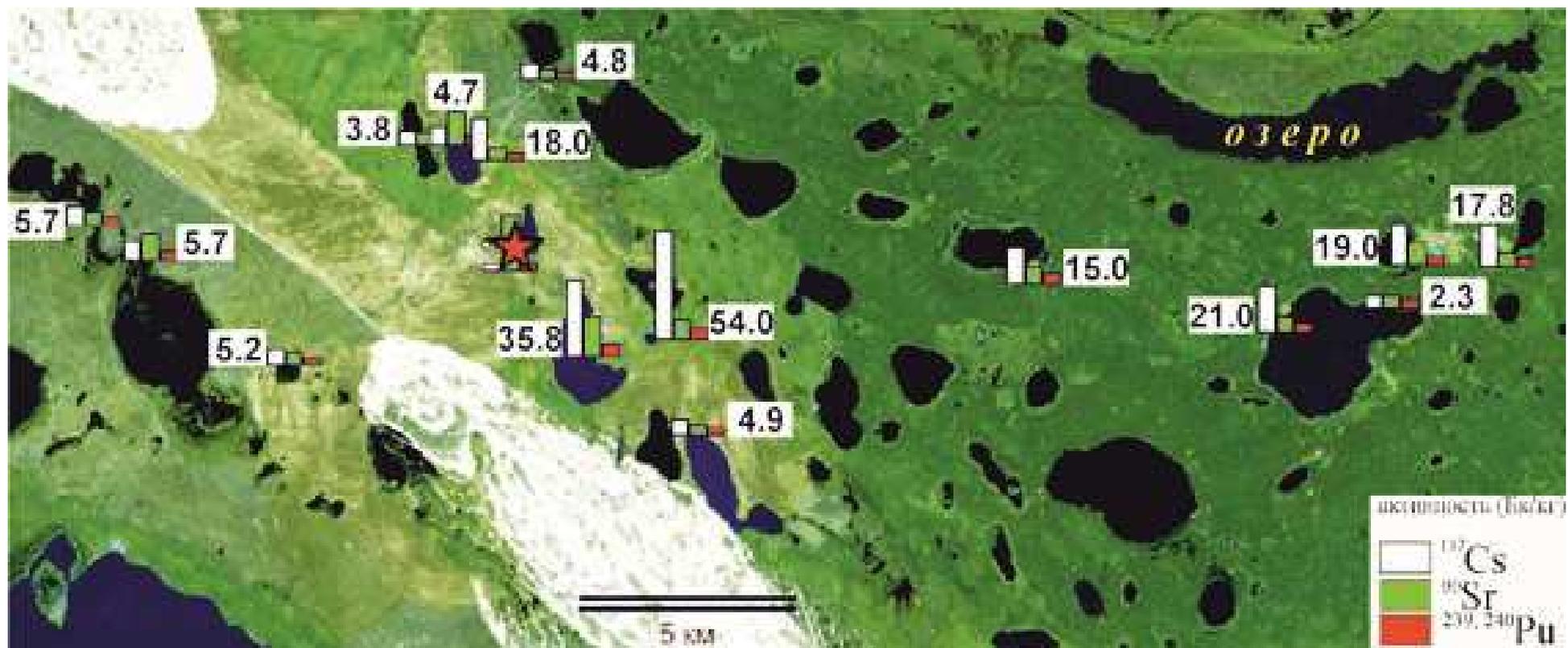
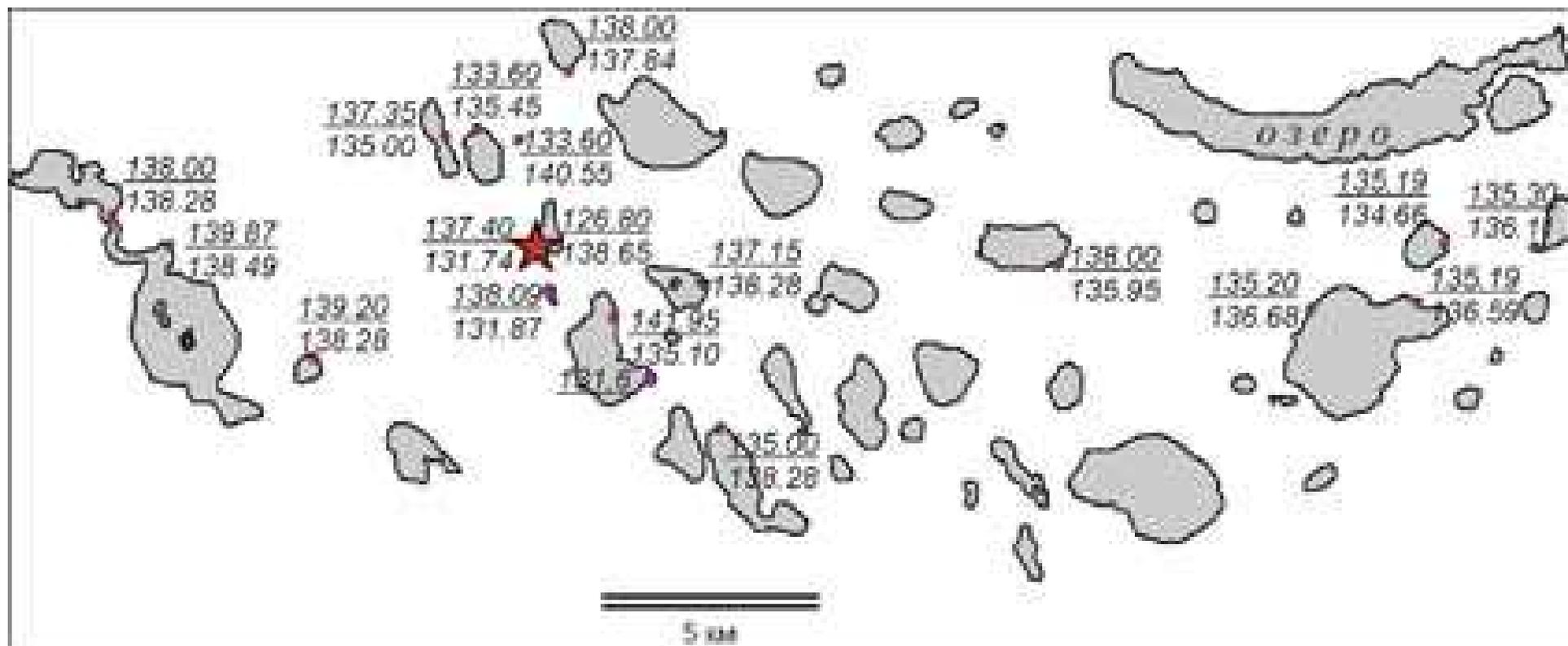


Рис.96. Содержание  $^{90}\text{Sr}$  (1),  $^{137}\text{Cs}$  (2, показано цифрами),  $^{239,240}\text{Pu}$  (3) в донных отложениях района ПЯВ «Кратон-4», Бк/кг.



**Рис.97.** Соотношение  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  в поверхностных водах (в числителе) и в донных отложениях (в донных отложениях) поверхностных вод района ПЯВ «Кратон-4». Звездочкой показано устье боевой скважины. Серым показаны контуры озер, звездой – устье боевой скважины ПЯВ «Кратон-4»

**Таблица 43. Микроэлементный состав донных отложений района ПЯВ «Кратон-4» по результатам ICP-MS, г/т**

озеро	широта град	Долгота град	Be	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Sr	Y	Zr	Nb
Арылах (№8)	63,67283	125,3552	нпо	150	3.2	18.6	0	24	140	6.5	130	3.4
Соболох	63,69852	125,482	нпо	100	2.1	16.3	0.0	11	94	3.6	90	1.76
Ничалах	63,70078	125,4963	нпо	340	6.6	95	0	19	106	8.8	70	1.70
руч Хаптасыннах	63,69887	125,5158	нпо	670	6.9	25	0	19	220	13.1	100	3.8
Сордонгнох 6 (0-3 см)	63,67777	125,5247	нпо	98	2.2	12.2	0	13.0	145	5.4	81	2.1
Сордонгнох 6 (3-10 см)	63,67777	125,5247	нпо	56	1.6	9.2	0	4.0	120	5.6	130	2.5
Сордонгнох	63,67842	125,5267	нпо	260	6.2	91	75	15	130	8.2	53	1.82
Лаха	63,66308	125,5653	3.7	670	15	38	0	60	96	24	67	3.3
Арылах	63,67107	125,6064	2.9	890	22	53	383	84	170	32	114	5.6
Луку	63,64173	125,6175	нпо	85	1.2	9.2	0	8.0	98	2.3	38	0.68
Согуруу Кель	63,6749	125,9411	5.1	600	21	65	65	86	430	28	240	13
Олорор Кель	63,68713	125,9518	4.4	800	20	71	0	185	410	32	240	14
Харыйалах	63,68755	125,9941	3.4	800	20	84	64	180	420	24	230	11
№7	63,67843	125,3275	нпо	150	3.0	17.3	0.0	11	94	4.2	125	2.1
№6	63,65166	125,4257	нпо	170	2.6	16.8	0.0	19	94	4.1	100	1.5
б/н	63,71359	125,5377	нпо	210	2.8	38	0.0	22	94	3.6	90	1.76
б/н 2	63,67874	125,7716	3.1	890	8.2	33	0	84	170	4	110	5.6
Согуруу Кель	63,67246	125,8911	4.9	620	21	65	65	86	430	27	230	13

Продолжение 1 таблицы 43

озеро	широта град	Долгота град	<b>Sb</b>	<b>Ba</b>	<b>Mo</b>	<b>Cd</b>	<b>Sn</b>	<b>La</b>	<b>Ce</b>	<b>Pr</b>	<b>Nd</b>	<b>Sm</b>	<b>Eu</b>
Арылах (№8)	63,67283	125,3552	0.25	540	1.2	0.093	нпо	8.8	17.2	1.63	7.1	1.21	0.32
Соболох	63,69852	125,482	0.24	400	нпо	0.046	нпо	4.4	8.2	0.82	3.0	0.58	0.12
Ничалах	63,70078	125,4963	0.54	420	9.2	0.057	1	8.7	19.6	2.1	8.8	1.98	0.58
руч Хаптасыннах	63,69887	125,5158	0.39	730	1.8	0.000	нпо	16.4	34	3.7	14.5	3.4	0.65
Сордонгнох 6 (0-3 см)	63,67777	125,5247	0.18	570	нпо	0.091	нпо	8.4	17.0	1.73	6.7	1.12	0.25
Сордонгнох 6 (3-10 см)	63,67777	125,5247	0.15	540	нпо	0.18	нпо	7.8	15.9	1.5	6.1	0.99	0.20
Сордонгнох	63,67842	125,5267	0.73	540	7.9	0.13	0.89	10.7	23	2.6	10.3	2.5	0.49
Лаха	63,66308	125,5653	0.32	740	2.4	0.40	нпо	22	50	5.3	24	5.7	1.12
Арылах	63,67107	125,6064	0.58	750	2.5	0.22	нпо	29	66	7.6	34	6.7	1.24
Луку	63,64173	125,6175	0.13	390	нпо	нпо	нпо	3.0	6.1	0.62	2.3	0.45	0.17
Согуруу Кель	63,6749	125,9411	1.80	800	2.1	0.45	0.30	39	77	8.2	33	7.2	1.45
Олорор Кель	63,68713	125,9518	0.82	920	4.4	0.20	нпо	40	76	8.0	35	6.3	0.96
Харыйалах	63,68755	125,9941	0.51	700	7.4	0.68	0.17	28	58	5.9	24	5.2	1.00
№7	63,67843	125,3275	0.24	540	1.2	0.046	нпо	8.5	17.5	1.78	6.89	1.18	0.31
№6	63,65166	125,4257	0.19	400	1.0	0.046	нпо	10.9	20.4	2.1	7.54	1.46	0.29
б/н	63,71359	125,5377	0.21	400	1.1	0.046	нпо	9.9	18.1	1.8	7.10	1.24	0.32
б/н 2	63,67874	125,7716	0.69	735	2.1	0.22	нпо	20.9	42.6	4.7	18.4	4.3	0.93
Согуруу Кель	63,67246	125,8911	1.80	790	2.1	0.45	0.30	36.00	82.4	7.5	29.0	6.5	1.20

Продолжение 2 таблицы 43

озеро	широта	долгота	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	W	Tl
Арылах (№8)	63.67283	125.3552	0.91	0.11	0.75	0.16	0.53	0.090	0.66	0.10	2.9	0.95	нпо
Соболох	63.69852	125.482	0.49	0.055	0.40	0.079	0.26	0.040	0.31	0.040	1.74	0.47	нпо
Ничалах	63.70078	125.4963	1.78	0.24	1.28	0.23	0.56	0.090	0.71	0.10	1.58	3.8	нпо
руч Хаптасыннах	63.69887	125.5158	2.4	0.39	2.0	0.33	1.00	0.14	0.98	0.15	2.7	0.81	0.19
Сордонгнох 6 (0-3 см)	63.67777	125.5247	0.89	0.11	0.74	0.15	0.42	0.070	0.47	0.070	1.91	0.53	нпо
Сордонгнох 6 (3-10 см)	63.67777	125.5247	0.92	0.16	0.90	0.16	0.45	0.065	0.47	0.067	2.7	0.34	0.11
Сордонгнох	63.67842	125.5267	1.74	0.21	1.32	0.23	0.69	0.11	0.67	0.11	1.41	3.5	нпо
Лаха	63.66308	125.5653	3.6	0.58	3.0	0.70	1.80	0.29	2.0	0.30	1.65	1.4	нпо
Арылах	63.67107	125.6064	6.1	0.72	4.4	0.81	2.4	0.44	3.0	0.44	2.7	1.0	нпо
Луку	63.64173	125.6175	0.44	0.060	0.34	0.065	0.16	0.030	0.23	0.037	0.97	0.20	нпо
Согуруу Кель	63.6749	125.9411	4.4	0.71	4.2	0.87	2.3	0.41	2.5	0.37	5.8	1.4	нпо
Олорор Кель	63.68713	125.9518	5.6	0.84	4.6	0.79	2.5	0.37	2.3	0.40	5.1	1.5	нпо
Харыйалах	63.68755	125.9941	4.8	0.62	3.6	0.66	1.98	0.30	1.98	0.30	5.7	2.7	0.13
№7	63.67843	125.3275	1.10	0.16	0.89	0.21	0.52	0.09	0.58	0.09	1.74	0.47	нпо
№6	63.65166	125.4257	1.24	0.17	1.00	0.20	0.66	0.10	0.71	0.10	1.74	0.47	нпо
б/н	63.71359	125.5377	1.14	0.18	1.10	0.23	0.64	0.11	0.65	0.08	1.74	0.47	нпо
б/н 2	63.67874	125.7716	3.10	0.50	3.10	0.58	1.56	0.26	1.58	0.25	2.7	1.0	нпо
Согуруу Кель	63.67246	125.8911	4.65	0.70	4.50	0.92	2.60	0.38	2.30	0.36	5.8	1.4	нпо

Продолжение 3 таблицы 43

озеро	Широта град	Долгота град	Pb	Bi	Th	U	Th/U	<sup>238</sup> U/ <sup>235</sup> U	<sup>137</sup> Cs	<sup>90</sup> Sr	<sup>239+240</sup> Pu	<sup>238</sup> Pu
Арылах (№8)	63.67283	125.3552	9.0	0.041	1.7	0.47	3.71	138.49	5.7	10	нда	нда
Соболох	63.69852	125.482	5.8	0	0.96	0.25	3.84	135.00	3.8	2.8	0.12	нда
Ничалах	63.70078	125.4963	143	0.051	1.4	0.40	3.49	135.45	4.7	13	0.63	нда
руч Хаптасыннах	63.69887	125.5158	13	нпо	3.2	0.77	4.22	140.55	18	2.9	0.38	0.13
Сордонгнох 6 (0-3 см)	63.67777	125.5247	9.1	нпо	1.6	0.42	3.83	131.74	нда	25	нда	нда
Сордонгнох 6 (3-10 см)	63.67777	125.5247	6.8	нпо	1.4	0.42	3.36	131.87	нда	1.8	0.25	нда
Сордонгнох	63.67842	125.5267	76	0.044	1.6	0.50	3.19	138.65	нда	1.4	нда	нда
Лаха	63.66308	125.5653	10	0	5.3	0.84	6.35	132.28	35.8	17	2.08	0.14
Арылах	63.67107	125.6064	16	0.096	6.0	1.00	5.98	135.05	54.0	6.2	1.31	0.14
Луку	63.64173	125.6175	6.0	0	0.56	0.23	2.43	135.10	4.9	1.5	0.40	нда
Согуруу Кель	63.6749	125.9411	25	0.15	10	3.4	3.06	136.59	2.3	2.3	0.29	нда
Олорор Кель	63.68713	125.9518	24	0.14	11	4.8	2.30	134.66	19	8.2	1.16	0.11
Харыйалах	63.68755	125.9941	16	0.11	8.3	4.7	1.75	136.11	17.8	3.2	0.62	нда
№7	63.67843	125.3275	5.8	нпо	0.96	0.25	3.84	138.28	5.7	2.8	нда	нда
№6	63.65166	125.4257	5.8	нпо	0.96	0.25	3.84	138.22	5.2	2.8	0.12	нда
б/н	63.71359	125.5377	5.8	нпо	0.96	0.25	3.84	137.84	4.8	1.5	0.12	нда
б/н 2	63.67874	125.7716	16	0.096	6.0	1.00	5.98	135.95	15	5.3	1.20	0.14
Согуруу Кель	63.67246	125.8911	25	0.15	10	3.4	3.06	136.68	21	4.5	0.31	нда

нда –ниже детектируемой активности

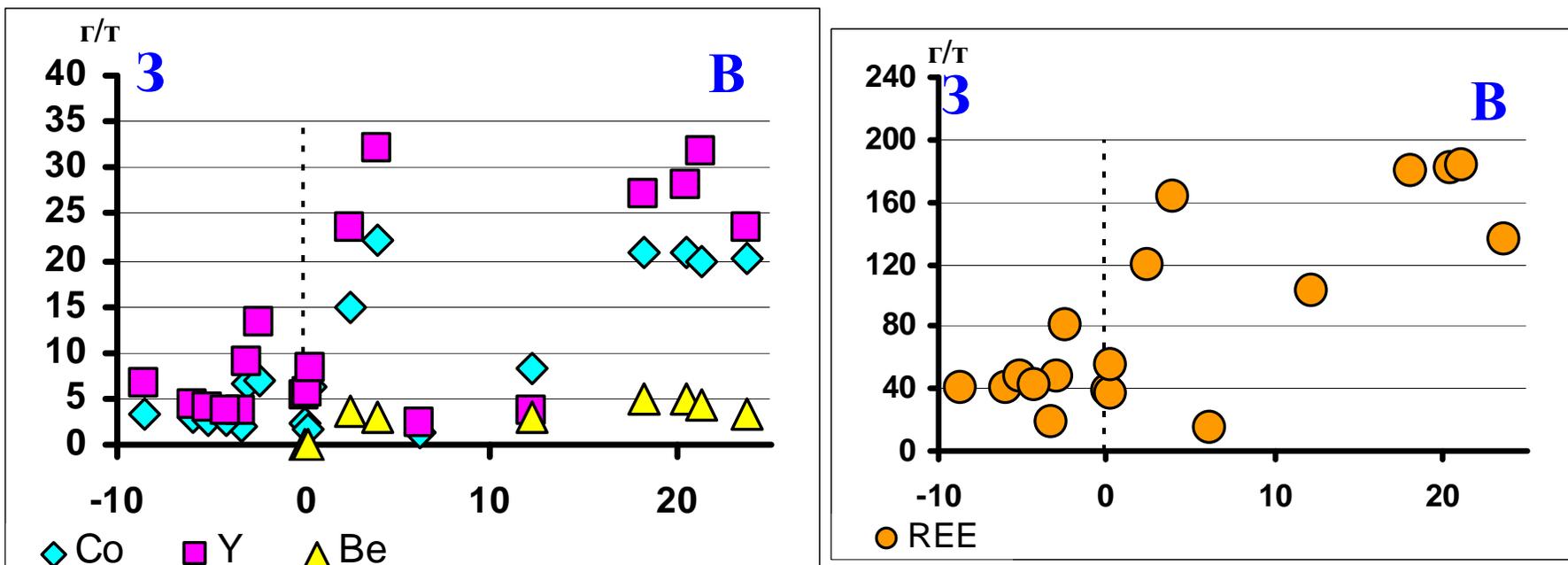


Рис.98. Содержание микроэлементов и суммы редкоземельных в донных отложениях района ПЯВ «Кратон-4». по горизонтали показано расстояние (км) от устья боевой скважины ПЯВ «Кратон-4» (принятого за 0) на запад и восток.

и алевролитов на глубине 574 м «подвисает» полость взрыва ПЯВ «Кратон-4» (рис.34). В условиях инфильтрационной водонапорной системы радионуклиды из полости взрыва преимущественно двигаются в латеральном направлении вместе с подземными водами к северо-востоку-востоку по склону погребенного Хапчагайского мегавала. Наличие в районе регионального тектонического разлома раннепалеозойского заложения восточного простирания способствует движению инфильтрационных метеорных и подземных флюидов верхней части разреза по трещиноватой зоне разлома к востоку (рис.95)[Тектоника.... 2001].

Выявлено, что в компонентах природной среды: как в поверхностных водах и донных отложениях в пределах ослабленной зоны вокруг устья боевой скважины «Кратон-4» и предположительных выходов подземных радиоактивных флюидов изотопное соотношение  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  снижается: максимально до 126.8 вместо природного 138 (рис.97, табл. 42,43) вследствие повышенного содержания оружейного урана – остатков делящегося материала ЯВУ. В районе «Кратон-4» при слабой интенсивности просачивания подземных радиоактивных флюидов, когда не работают другие индикаторы, изотопное соотношение  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  установлен как основной индикатор массопереноса радионуклидов в геологической среде.

В донных отложениях ослабленных зон ПЯВ и мест выходов подземных радиоактивных флюидов выявлен рост содержания лантаноидов по сравнению с фоновыми участками и формирует отдельное геохимическое поле на диаграммах (рис.98). Лантаноиды – это типичные продукты распада осколочной активности, но они также, предположительно, должны содержаться изначально в подземных рассолах. Донные отложения в пределах ослабленной зоны ПЯВ «Кристалл» больше загрязнены Eu по сравнению с районом ПЯВ «Кратон-4» (рис.99). Таким образом, в местах выхода подземных радиоактивных флюидов повышены содержания техногенных радионуклидов в поверхностных водах, донных отложениях, которые превышают местный и региональный фоновый уровень:  $^3\text{H}$  – в 2-34 раза,  $^{90}\text{Sr}$  – в 2-16,  $^{239+240}\text{Pu}$  – в 10-25; также по сравнению с местным фоновым уровнем в несколько раз повышены концентрации лантаноидов, Y, Co, Be и других редких металлов. наблюдается снижение изотопного соотношения  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  до 126 вместо естественного 138.

Поскольку глубины заложения объекта «Кратон-4» ниже уровня дренажа р.Лены, то в условиях инфильтрационной водонапорной системы были бы маловероятны выходы радиоактивных стоков на поверхность земли. По мнению Микуленко К.И. в местной геологической среде, состоящей из гранулярных слаболитифицированных терригенных пород – песчаников и их разностей при отсутствии высоконапорных подземных вод даже при раскрытии полости взрыва загрязненные подземные воды в основном будут двигаться к северо-востоку-востоку. Но данная водонапорная система осложняется восходящими

напорными глубинными потоками подземных вод, поступающих по зонам надвиговых нарушений со стороны Предверхоаянского прогиба при наличии литологических алевролитовых и аргиллитовых подпоров в геологическом разрезе.

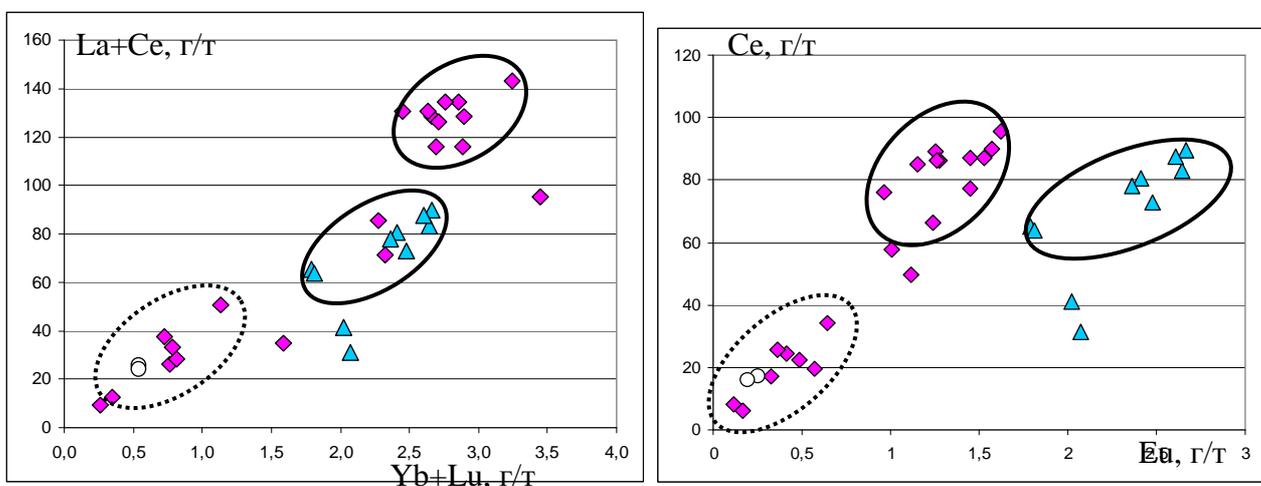


Рис.99. Соотношение  $La+Ce/Yb+Lu$  и  $Ce/Eu$  в донных оложениях районов ПЯВ «Кристалл» (треугольники) и «Кратон-4» (ромбики). Овалами сплошной линией показаны геохимические поля в местах выхода радиоактивных подземных флюидов, прерывистой линией – вне зоны влияния радиоактивных подземных флюидов.

Проведенные исследования подтвердили выход техногенных радионуклидов из недр с подземными водами к востоку от объекта «Кратон-4» на расстоянии примерно в 20 км: в донных отложениях и поверхностных водах озер Лаха (в 2.6 км), Арылах (в 4 км), Согурукель (в 20.5 км), Дьикимдэ (21.2) и Харыйалах (в 23.7 км) содержания техногенных радионуклидов выше, чем в донных отложениях на эпицентре взрыва и пробах, отобранных к западу от объекта ПЯВ (рис. 96, 98). В 20 км к востоку от объекта «Кратон-4» в донных отложениях обнаружены:  $^{137}Cs$  – до 19 Бк/кг,  $^{90}Sr$  – до 8.2 Бк/кг,  $^{239, 240}Pu$  – до 1.16 Бк/кг, в 2.6- 4 км к востоку радионуклидов в донных отложениях озер больше 2-3 раза:  $^{137}Cs$  – до 54 Бк/кг,  $^{90}Sr$  – до 17 Бк/кг,  $^{239, 240}Pu$  – до 2.08 Бк/кг. Вместе с тем в донных отложениях озер в 8 км к западу активности радионуклидов намного ниже:  $^{137}Cs$  на порядок ниже – 5.7 Бк/кг,  $^{90}Sr$  – 2.8-10 Бк/кг, изотопы  $Pu$  – не установлены. В пробах воды активность  $^{90}Sr$  составили 0.013-0.02 Бк/л, что выше регионального фонового уровня в 2.5–4 раза, а изотопы  $Pu$  не установлены (ниже предела обнаружения  $<0.000002$  Бк/л). Активность  $^3H$  низкое: от 3 до 6 Бк/л, что можно объяснить разбавлением его концентраций при слабой интенсивности выхода на поверхность. Наиболее информативным оказалось  $^{238}U/^{235}U$  отношение, на которое интенсивность просачивания и абсолютные содержания влияют мало. В донных отложениях озер, расположенных к востоку от объекта «Кратон-4»  $^{238}U/^{235}U$  снижено до 132. В озерной воде и водотоках эпицентральной части и к востоку от объекта ПЯВ  $^{238}U/^{235}U$  смещено до 126.8 (при природном 138), что указывает на современные процессы переноса

радионуклидов из подземного источника – полости взрыва (рис.97). Если бы поступление  $^{235}\text{U}$  в озерную систему было одномоментным (при ядерном взрыве), то за прошедший период после взрыва постоянное поступление в озера метеорных вод и водотоков снивелировало бы давно  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  соотношение в поверхностных водах до природных значений (138).

Низкие валовые содержания U, Th соответствует местному геохимическому ландшафту района: в донных отложениях низкие – в среднем 0.5 и 2.4 г/т, в поверхностных водах фоновых озер концентрация U в среднем составляет 0.012 мкг/л, а Th не обнаружен. Между тем в озерах в пределах ослабленной зоны и к востоку от объекта «Кратон-4» концентрации U в поверхностных водах увеличиваются в 22–73 раза – от 0.25 до 0.85 мкг/л. Отмечено примерно двухкратное увеличение содержания Th и U в донных отложениях озер Лаха и Арылах.

В донных отложениях вышеназванных 5-ти озер, где отмечены признаки выхода подземных флюидов, выявлены наличие редких элементов: Be – 2.9–5.1 г/т, Co – 15-21 г/т, Y – 24-32 г/т, тогда как в донных отложениях других озер района Be не установлен. Среднее содержание Co ниже в 3-4 раза и составляет 4.5 г/т при диапазоне 2.1 – 6.6 г/т, Y – ниже в 4-5 раз и составляет в среднем 6.8 г/т при диапазоне 3.6-8.8 г/т. Кроме того, в донных отложениях этих 5-ти озер зафиксировано увеличение содержания лантаноидов, которое формирует отдельное геохимическое поле на диаграмме La+Ce/Yb+Lu (рис.98, 99).

В поверхностных водах эти элементы обнаружены в единичных пробах в пределах ослабленной зоны вокруг боевой скважины (Be – 0.1 мкг/л, Co – 1.11 мкг/л, Y – 0.4 мкг/л). Итак, в условиях инфильтрационной водонапорной системы выявленные вариации концентраций радиоэкогеохимических индикаторов в районе ПЯВ «Кратон-4» достоверно свидетельствуют о преимущественно латеральном массопереносе радиоактивных флюидов в системе «полость взрыва – вмещающая геологическая среда … поверхность земли» в восточном направлении.

В многочисленных озера района ПЯВ «Кратон-4» водится много рыбы, а именно карасей, являющихся одним из продуктов питания местного населения. Интересным является факт обнаружения техногенных радионуклидов в тканях рыбы (табл.44). Из естественных радионуклидов присутствует в тканях рыбы  $^{40}\text{K}$  – его содержание меняется в узком интервале и подкрепляет наши данные по другим радионуклидам. В карасе и в щуке обнаружен радиоцезий, радиостронций. Карась питается детритом в донных отложениях, и, по-видимому, поэтому хорошо накапливает радионуклиды. Щука является хищной рыбой. Радиостронций лучше накапливается в костной ткани вследствие химического сродства с кальцием. Необходим дальнейший набор материала для изучения, тем не менее эти данные

**Таблица 44.** Активность техногенных радионуклидов в сырой ткани рыбы из озер района ПЯВ «Кратон-4», 2011-2012 г. г

№ пробы	дата	место			Cs-137	Sr-90	U	K
					Бк/кг	Бк/кг	г/г	Бк/кг
201	06.01.2012	Кэптэни	карась	костная ткань	<0.176	4.939		42
203	07.01.12	Ниджили	карась	костная ткань	0.670	1.516	<0.2	51
205	16.01.12	Ничалах	карась	костная ткань	0.332	4.580	<0.2	44
1135	09.2011	Дьикимдэ	карась	костная ткань	1.156	85.01	<0.2	51
202	06.01.12	Кэптэни	карась	мышечная ткань	<0.102	0.363	<0.2	60
204	07.01.12	Ниджили	карась	мышечная ткань	0.804	0.529	<0.2	63
206	15.01.12	Ничалах	карась	мышечная ткань	<0.029	0.287	<0.2	47
1134	09.2011	Дьикимдэ	карась	мышечная ткань	<0.067	1.564	<0.2	75
207	11.01.12	Сордоннох	щука	костная ткань	1.575	1.168	<0.2	120
207	10.01.12	Сордоннох	щука	мышечная ткань	1.322	0.066	<0.2	98
СанПиН 2.3.2.1078-01 от 06.11.2012 г. допустимые уровни Бк/кг, не более					130	100	-	-

показывают, что имеются пищевые цепи для дальнейшего переноса и распространения техногенных радионуклидов из геотехногенной системы ПЯВ в среду обитания человека, и эти пути требуют дальнейшего изучения. Вместе с тем надо отметить, что выявленные содержания радионуклидов в тканях рыбы соответствуют нормам безопасности, поскольку намного ниже допустимых уровней, принятых для пищевых продуктов согласно СанПиН 2.3.2.1078-01 от 06.11.2012 г.

## 6.6. ВЫВОДЫ

1. Объект ПЯВ «Кратон-3» представляет собой сложный радиогеоэкологический объект и служит поверхностным и подземным источниками радиоактивности. Поверхностный источник радионуклидно загрязнения – это погибший при аварийном взрыве массив тайги. Мохово-лишайниковый слой, лесная подстилка и первые несколько сантиметров гумусового горизонта почв в пределах мертвого леса являются основными депонентами поверхностной активности; высокие активности в них  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{239,240}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{Pu}$  на ближнем и среднем следах позволяют отнести их к твердым радиоактивным отходам.

2. Выявлен постоянный водный массоперенос радионуклидов, представленных в основном  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238,239,240}\text{Pu}$ ,  $^3\text{H}$  из зоны мертвого леса поверхностными водотоками. В условиях равнинно-холмистого рельефа из-за небольших скоростей водотоков массоперенос радионуклидов осуществляется преимущественно в жидком виде, за исключением весенних паводков, во время которых механический снос изотопов Pu и  $^{137}\text{Cs}$  становится значительным. Активность  $^{90}\text{Sr}$ , изотопов Pu и трития в пробах вод р. Мархи и руч. Безымянный, отобранных в 2009 г., намного меньше УВ [СанПиН..., 2009], но превышают фоновые уровни для сибирских рек на 1-3 порядка [Рихванов, 2009, Bolsunovsky, Bondareva, 2003].

3. Смещение отношений активностей радионуклидов позволило установить, что изотопам  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{238}\text{Pu}$  свойственна высокая водная подвижность.

4. Выявлена локальная гидрогеологическая аномалия: подъем уровней напорных подземных рассолов на 300 м в эпицентре ПЯВ «Кратон-3» и примерно на 100 м - на удалении в 1 км от эпицентра в долине р. Марха. Предполагается соединение столба обрушения с зоной тектонического разлома и наличие пути массопереноса радионуклидов из зоны взрыва по системе «полость взрыва «Кратон-3» – столб обрушения – обновленная трещиноватая зона тектонического разлома – дневная поверхность». Наше предположение подкрепляется зафиксированными высокими концентрациями техногенных радионуклидов при отсутствии эффекта разбавления в бочажинах, ручейках, втекающих в р. Марха и в самой речной воде на удалении до 3 км от эпицентра взрыва [Артамонова, 2012].

Просачивание радионуклидов из недр, возможно, идет и долине р. Чукуки - левого притока р. Мархи в 4 км ниже по течению от объекта ПЯВ «Кратон-3», так как в ней активность трития в 3.5 раза выше по сравнению с глобальным уровнем.

На примере геотехногенных систем ПЯВ «Кристалл» и горнотехнической системы сверхглубокого карьера тр. «Удачная» показано, что подземный водоносный горизонт служит проводником для переноса радионуклидов и сопутствующих элементов из зоны взрыва в карьер при развитии искусственной сверхглубокой депрессионной воронки вокруг карьера. По мере углубления карьера вовлекались в депрессионную воронку карьера все более глубокозалегающие водоносные комплексы, насыщенные более крепкими метаморфизованными рассолами, минерализация которых увеличивается от 40 до 550 г/л, также растет водообильность водоносных горизонтов. Разработана модель геотехногенной системы объект ПЯВ «Кристалл» – вмещающая геологическая среда – поверхностные системы, верифицированная данными бурения и изучения карьера.

Аномальная депрессионная водонапорная система, развитая в нижней части геологического разреза СБНГКМ, по-видимому, создает условия для перетоков подземных

флюидов, в.т.ч. радиоактивных, в нижние горизонты, что подтверждает обнаружение изотопов Pu,  $^{90}\text{Sr}$  в буровом шламе и  $^{90}\text{Sr}$  рассолах в 6 км от объектов ПЯВ на глубине 1717 м (что ниже примерно на 200 м уровня закладки ЯВУ на СБНГКМ).

Основными естественными проводниками радиоактивности в системе «полость взрыва – геологическая среда … поверхность земли» служат зоны тектонических разломов, которые, в свою очередь, могли дополнительно раскрыться вследствие механического воздействия взрывов, подземные водоносные горизонты и, возможно, контактные зоны пластовых тел траппов. Проведенные исследования показали, что наличие многослойных соляных пластов, отличающихся пластичностью, способностью самозалечивания трещин, в геологической среде СБНГКМ в полной мере не обеспечивает изоляцию подземной активности объектов ПЯВ. Идея об использовании нижней части геологического разреза СБНГКМ с аномально-депрессивной водонапорной системой в качестве места геологического захоронения РАО требует дальнейшего исследования.

В условиях инфильтрационной водонапорной системы района ПЯВ «Кратон-4» преобладает латеральное движение подземных флюидов и слабый выход радионуклидов из зоны взрыва на поверхность земли.

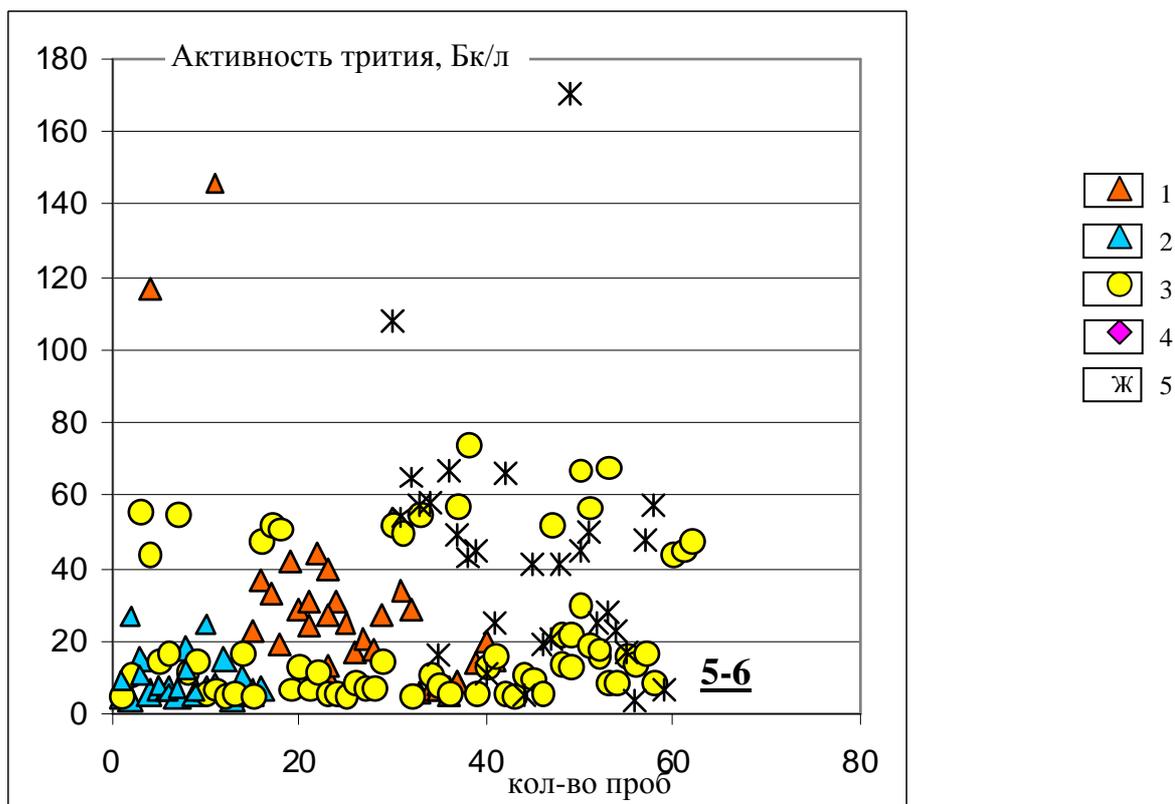
Индикаторами переноса радионуклидов в системе **«полость взрыва – геологическая среда … поверхность земли»** служат: увеличение активности  $^3\text{H}$  – в 2-34,  $^{90}\text{Sr}$  – в 2-16,  $^{239+240}\text{Pu}$  – в 10-25 раза выше регионального фонового уровня; повышение концентрации лантаноидов, Y, Co, Be в несколько раз по сравнению с местным фоновым уровнем; снижение изотопного соотношения  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  до 126 (вместо естественного 138). В области распространения напорных подземных рассолов индикатором выхода подземных флюидов на поверхность земли служит появление соленых (с минерализацией, как правило, выше 1 г/л) хлоридных поверхностных вод, тогда как районам характерны пресные гидрокарбонатные, гидрокарбонатно-сульфатные поверхностные воды.

Тритий в силу его подвижности может служить основным радиогеохимическим индикатором процессов массопереноса радионуклидов в системе ««полость ПЯВ – вмещающая геологическая среда – дневная поверхность»».

Перенос радионуклидов по системе «полость взрыва – геологическая среда … поверхность земли» осуществляется с помощью следующих естественных флюидопроницаемых геоструктур: 1) тектонические разломы, в т.ч. подновленные при ПЯВ. 2) подземные водоносные горизонты; а также не исключаются трещиноватые контактные зоны развития траппов и кимберлитовых трубок.

## Глава 7. Геоэкологические модели геотехногенных систем ПЯВ на территории Якутии.

Итак, на основе полученных радиоэкогеохимических данных изучения 10-ти объектов ПЯВ на территории Якутии, можем сказать, что в силу высокой подвижности в форме  ${}^3\text{H}^1\text{NO}$  тритий является одним из ярких индикаторов современных потоков радионуклидов в геотехногенной системе «полость взрыва – геологическая среда – поверхность земли»: в пробах подземных рассолов максимальное активность трития достигает 146 Бк/л, поверхностных вод – 170 Бк/л, что превышает в 34 раза региональный фоновый уровень (рис.100).



**Рис.100.** Активность трития в компонентах природной среды: 1 – в подземных рассолах района ПЯВ «Кристалл» (2008-2012 гг.), в поверхностных водах районов ПЯВ: 2 – «Кристалл», 3 – «Кратон-3», 4 – «Кратон-4», 5 – на территории СБНГКМ. Отдельно показан местный и региональный фоновый уровень  ${}^3\text{H}$  в поверхностных водах, равный 5-6 Бк/л.

Радионуклиды  ${}^{90}\text{Sr}$ ,  ${}^{238,239,240}\text{Pu}$ ,  ${}^{137}\text{Cs}$  также являются индикаторами массопереноса в геологической среде, но широкое применение  ${}^{90}\text{Sr}$ ,  ${}^{238,239,240}\text{Pu}$  в качестве индикаторов ограничено трудоемкостью пробоподготовки, а  ${}^{137}\text{Cs}$  определялся только в твердых пробах (донных отложениях и выпаренных рассолах), основное  $\gamma$ -излучение техногеннозагрязненных почв и донных отложений формируется за счет  ${}^{137}\text{Cs}$ .

В 2012 г. проведено расширенное изучение состава подземных рассолов в районе ПЯВ «Кристалл» из верхнекембрийского и среднекембрийского водоносного горизонтов

методом ВПГМ, бета-радиометрии и жидкостно-сцинтилляционной спектрометрии. Параллельно определялись плотность и минерализация рассолов путем взвешивания и выпаривания. Результаты приведены в таблице 45, схема скважин на рис.101.

**Таблица 45. Состав подземных рассолов района ПЯВ «Кристалл» (2012 г.)**

	глубина	$\rho$	минер- я	U-238	U-238	Pb-210	Ra-226
№ скважины	абс.м.	г/мл	г/л	мг/л	Бк/л	Бк/л	Бк/л
<b>18-Н</b>	136,6	1,11	272	0,035	0,434	0,462	4,0
<b>111</b>	44,7	1,12	284	0,051	0,652	0,113	12,5
<b>стена карьера «Удачный»</b>	-5	1,00	5,3	0,005	0,057	0,021	0,049
<b>323</b>	-40,5	1,21	463	0,083	1,07	нда	21,8
<b>520</b>	-145,6	1,17	383	0,065	0,803	нда	10,7
<b>322</b>	-156,2	1,22	496	нда	нда	нда	13,9
<b>323</b>	-240,5	1,20	427	0,017	0,213	6,8	13,2
<b>111</b>	-255,3	1,24	555	0,017	0,222	5,0	16,6
<b>Зумпф карьера "Удачный"</b>	-320	1,19	419	нда	нда	1,26	19,3
<b>рудник «Удачный»</b>	-380	1,27	612	0,018	0,245	1,16	17,1
<b>322</b>	-406,2	1,23	506	0,101	1,21	4,55	20,7
<b>520</b>	-595,6	1,29	667	0,120	0,267	0	21,2
<b>рудник «Удачный»</b>	-580	1,08	176	0,048	0,601	1,81	1,8
<b>рудник «Удачный»</b>	-580	1,26	606	нда	нда	1,82	17

Нда – ниже детектируемой активности.

	Pb-212	Ac-228	Cs-137	K-40	Sr-90	3H
№ скважины	Бк/л	Бк/л	Бк/л	Бк/л	Бк/л	Бк/л
<b>18-Н</b>	0,2	0,65	0,299	100	2,1	17±3
<b>111</b>	2,1	8,23	0,227	112	0,2	31±3
<b>стена карьера «Удачный»</b>	0,003	0,007	0,008	3,7	0,37	6±1
<b>323</b>	1,2	10,19	нда	306	5,1	34±3
<b>520</b>	1,5	8,42	нда	207	0,85	27±4
<b>322</b>	1,5	5,45	нда	282	0,81	21±4
<b>323</b>	2,2	5,55	нда	279	0,71	29±2
<b>111</b>	2,4	2,55	0,499	322	2,8	25±2
<b>зумпф карьера "Удачный"</b>	0,7	2,05	0,544	295	1,8	8±2
<b>рудник «Удачный»</b>	1,0	0,43	нда	389	3,9	5±2
<b>322</b>	0,7	1,52	нда	279	1,8	18±2
<b>520</b>	1,5	2,27	нда	660	2,2	9±2
<b>рудник «Удачный»</b>	0,16	0,158	0,106	140	0,74	7±1
<b>рудник «Удачный»</b>	1,3	1,03	0,788	360	1,7	54±3



Рис.101. Схема расположения гидрогеологических скважин в районе ПЯВ «Кристалл»

Голубые кружки – устья гидрогеологических скважин и их №, красный кружок – шахта (рудник) у южного борта карьера кимберлитовой трубки «Удачная».

Из 14 проб 2 пробы сразу выбиваются – у них изменен состав: снижены минерализация и плотность не в соответствии с уровнем пробоотбора (не соответствие с ожидаемыми значениями минерализации и плотности местных подземных рассолов). Проба с уровня -5 м с борта карьера – это слабосоленые воды с разубоженными концентрациями компонентов, отобрана со стены карьера. По видимому, в ее составе преобладают атмосферные воды (дождевая вода). Вторая проба – рассол в руднике был отобран неправильно, скорее всего, из разбавленного технической водой рассола, с сниженной минерализацией несоответствующей природным сверхкрепким кальциевым рассолам нижнекембрийского водоносного горизонта. Эти две пробы исключены из анализа и обсуждения результатов.

Все скважины расположены между карьером и ПЯВ «Кристалл», так что их состав должен сто-тосказать о процессе переноса радионуклидов из зоны взрыва в сторону депрессионной воронки, образованной вокруг карьера и шахты.

В рассолах выявлен тритий от 5 до 54 Бк/л. Тритий присутствует во всех пробах - он найден не только к пробам из карьера, но и рассолах из скважин. Это подтверждает наши ранее полученные результаты и подкрепляет разработанную модель взаимодействия двух геотехногенных систем: ПЯВ и карьера. Рассолы обогащены  $^{226}\text{Ra}$  из-за его химического сродства с кальцием, и при метаморфизации рассолов [Шварцев, 1973] при выводе сульфатов из системы в виде сероводорода и обогащения рассолов кальцием, также в рассол поступал радий. Изотоп  $^{226}\text{Ra}$  после  $^{40}\text{K}$  второй доминирующий естественный изотоп, его активность в рассолах составляет от 4 до 21.8 Бк/л, при этом с глубиной его концентрации повышаются. Тогда как индифферентного урана в рассолах очень мало.

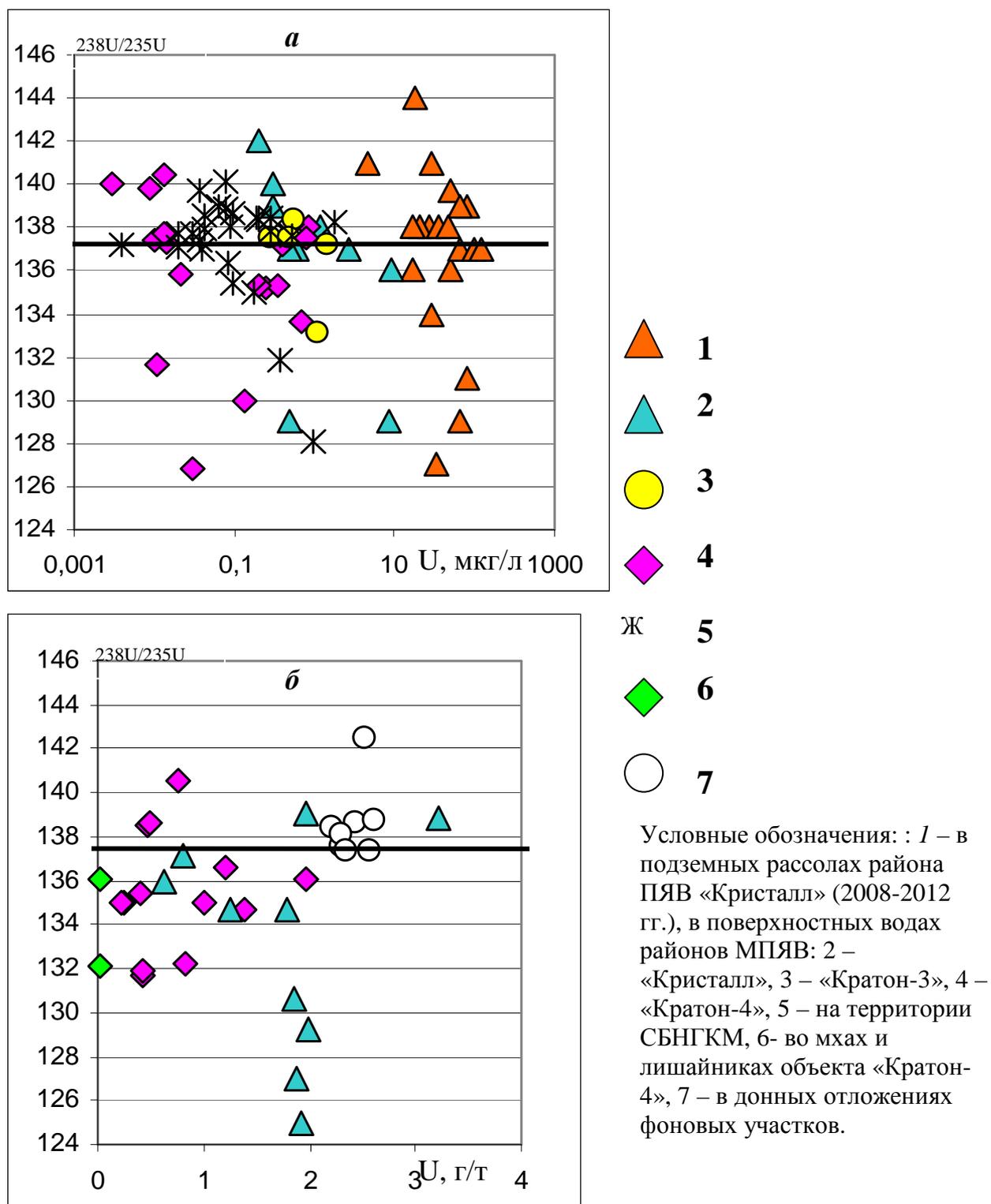
Необходимо подчеркнуть, что активности  $^{226}\text{Ra}$  и  $^3\text{H}$  в рассолах не коррелируют между собой ( $R=-0.08$ ), это разные изотопы разной природы и их появление в рассолах продиктовано разными причинами и их перепутывание исключено, вопреки предположению Степанова В.Е. [Степанов и др., 2013]. Да и современная аналитическая методика и оборудование исключают возможность перепутывания при анализе изотопов. Наличие трития в рассолах подтверждено внешней лабораторией МосНПО «Радон». После этот факт пришлось признать представителям Росатома [Касаткин и др, 2011]. Конечно, уровни активности  $^3\text{H}$  в рассолах очень низкие, гораздо ниже уровней вмешательства [НРБ-99] и не представляют опасности. Но тритий в рассолах карьера - это индикатор, указывающий на существование взаимосвязи между двумя геотехногенными системами: системой ПЯВ и системой карьера. Также тритий показывает о продолжении процессов переноса радионуклидов в геологической среде.

В условиях затрудненного водообмена природный космический тритий, или тритий из поверхностных вод не могут попасть в подземные рассолы. (В случае привноса поверхностных вод с фоновой активностью трития, в первую очередь рассолы были бы разубожены, наблюдалось бы снижение их минерализации и плотности), а тритий, который бы содержался изначально в морской воде в венде –кембрии, не мог остаться в рассолах, он давно распался (период полураспада трития 12.3 года).

Данную точку зрения подкрепляют активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , выявленные в рассолах. Радиоцезий распространен меньше – он на верхних горизонтах обнаруживается только в ближайших к ПЯВ скважинах, а рядом с карьером в рассолах выше – 250 абс.м. присутствует в существенно меньших количествах. Его активности в целом тяготеют именно к нижним горизонтам карьера, что подкрепляет мнение о наличии вынужденного привноса рассолов через подземные водоносные горизонты именно в депрессионную воронку.

Кроме этого индикатора, еще есть ряд других, подкрепляющие адекватность разработанных соискателем моделей геотехногенных систем «полость взрыва – вмещающая

геологическая среда – поверхность земли». Выявлено, что в компонентах природной среды: как в подземных рассолах, так и в поверхностных водах и донных отложениях у выходов подземных радиоактивных флюидов изотопное отношение  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  снижается вследствие повышенного содержания оружейного урана – остатков делящегося материала ЯВУ: до 126 вместо природного 138 (рис.102).



**Рис.102.** Отношение  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  и содержание U в подземных рассолах и поверхностных водах (а) и в донных отложениях (б) районов ПЯВ.

В районе «Кратон-4» при слабой интенсивности просачивания подземных радиоактивных флюидов, когда не работают другие индикаторы, изотопное отношение  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  стал основным геохимическим индикатором массопереноса радионуклидов в геологической среде.

В зоне распространения подземных рассолов в условиях элизионной водонапорной системы  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  в поверхностных водах становятся дополнительными индикаторами выхода подземных флюидов на поверхность земли. Как правило, высокие концентрации хлоридов  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$   $>300$  мг/л создаются в малых водоемах и ручейках в пределах ослабленных зон вокруг устьев боевых скважин ПЯВ. В крупных водотоках и водоемах из-за разбавления данные индикаторы не работают. Галогенез предполагает изначальное содержание целого ряда микроэлементов в рассолах. Известно, что подземные рассолы Сибирской платформы обогащены редкими элементами, и они могут быть использованы в качестве жидких руд для получения Li, Ba, Rb, Sr, Br, V, I [Шварцев, 1973, Анциферов, 1989, Зелинская, Воронин, 2009]. В рассолах района ПЯВ «Кристалл» нами обнаружены следующие содержания: Li – 30-36 мг/л, V- 110-180 мг/л, Rb – 25-115 мг/л, Sr – 600-1650 мг/л, Br – 3-12 г/л, Ba – 1-6.7 мг/л, I – 4 -9.6 мг/л. В поверхностных водах ослабленных зон боевых скважин «Кристалл», «Кратон-3», «Ока», «Шексна», «Нева-3» зафиксированы содержание типоморфных элементов: Sr – 1,5- 8.8 мг/л, Rb – 16-96 мкг/л, Br – 1.7-35 мг/л, Ba – 0.35-0.45 мг/л, I – до 0.4 мкг/л, V – до 3.5 мг/л. Помимо перечисленных, здесь в поверхностных водах установлены (мкг/л): Be – 1.9, Y – 6.6, Co - 19, La – 7 (лантаноиды) и металлы Cr – 54, Ti – 31.7, V – 18, чуждые местным геохимическим ландшафтам и не свойственные для подземных рассолов (отсутствуют опубликованные данные). В условиях кислородной среды лантаноидам, Co, Cr, Ti, V характерна низкая миграционная способность в воде (быстро оседают в осадок), наверное, поэтому они обнаружены только в пробах, отобранных рядом с устьями боевых скважин – в местах их предполагаемого постоянного выхода.

Известно, что обычно в боевых ЯВУ использовался шар из металлического Be с Y- $^{238}\text{Pu}$  покрытием в качестве импульсного нейтронного инициатора (урчина) – первичного источника нейтронов для резкого снижения критической массы и ускорения начала реакции (при сжатии происходит смешение  $^{238}\text{Pu}$  и Be с выбросом большого количества нейтронов).

В районах ПЯВ отношение  $^{238}\text{Pu}/^{239, 240}\text{Pu}$  в поверхностных водах составляет часто больше 1, в районе СБНКГМ максимальное отношение  $^{238}\text{Pu}/^{239, 240}\text{Pu}$  достигает – 2.75, «Кратон-3» – 31. Высокая активность  $^{238}\text{Pu}$ , часто превышающее активность  $^{239, 240}\text{Pu}$  (табл.16, 20), усиливает предположение о техногенном происхождении фиксируемых в пробах Y, Be, источником которых, по-видимому, являются остатки ЯВУ, и сопоставление

этих данных приводит к мысли о применении в камуфлетных ПЯВ в районе исследования ЯВУ с большим нейтронным фактором.

В силу высокой ионной силы подземные рассолы могут захватывать микроэлементы из вмещающей среды, в т.ч. из остатков конструкций боевой скважины и ЯВУ (агрессивность подземных рассолов к инженерным конструкциям – одна из технических проблем при добыче алмазов). Выявленные металлы Co, Cr, Ti, V в поверхностных водах ослабленных зон, вероятнее всего, связаны с выносом вещества из металлических конструкций боевых скважин.

В донных отложениях ослабленных зон ПЯВ и мест выходов подземных радиоактивных флюидов выявлен рост содержания лантаноидов по сравнению с фоновыми участками и формирует отдельное геохимическое поле на диаграммах (рис.99). Лантаноиды – это типичные продукты распада осколочной активности, но они также, предположительно, должны содержаться изначально в подземных рассолах. Донные отложения в пределах ослабленной зоны ПЯВ «Кристалл» больше загрязнены Eu по сравнению с районом ПЯВ «Кратон-4» (рис.99). Таким образом, в местах выхода подземных радиоактивных флюидов повышены активности техногенных радионуклидов в поверхностных водах, донных отложения, которые превышают местный и региональный фоновый уровень:  $^3\text{H}$  – в 2-34 раза,  $^{90}\text{Sr}$  – в 2-16,  $^{239+240}\text{Pu}$  – в 10-25; также по сравнению с местным фоновым уровнем в несколько раз повышены концентрации лантаноидов, Y, Co, Be и других редких металлов, наблюдается снижение изотопного соотношения  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  до 126 вместо естественного 138.

В условиях элизионной водонапорной системы Оленекского и Якутского криоартезианских бассейнов в зоне распространения подземных рассолов дополнительным индикатором проводящей геоструктуры и выходов подземных флюидов на поверхность земли является резкое увеличение минерализации поверхностных вод  $\geq 1$  г/л за счет роста в них содержаний  $\text{Cl}^- \geq 300$  мг/л,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+ \geq 300$  мг/л.

Гидрогеологические условия районов ПЯВ определяют характер массопереноса техногенных радионуклидов в системе «полость взрыва – вмещающая геологическая среда … поверхность земли». При элизионном типе водонапорной системы преобладает вертикальный массоперенос радионуклидов, при инфильтрационном типе – латеральный массоперенос радионуклидов, при депрессионном типе водонапорной системы массоперенос радионуклидов может быть направлен вниз по разрезу.

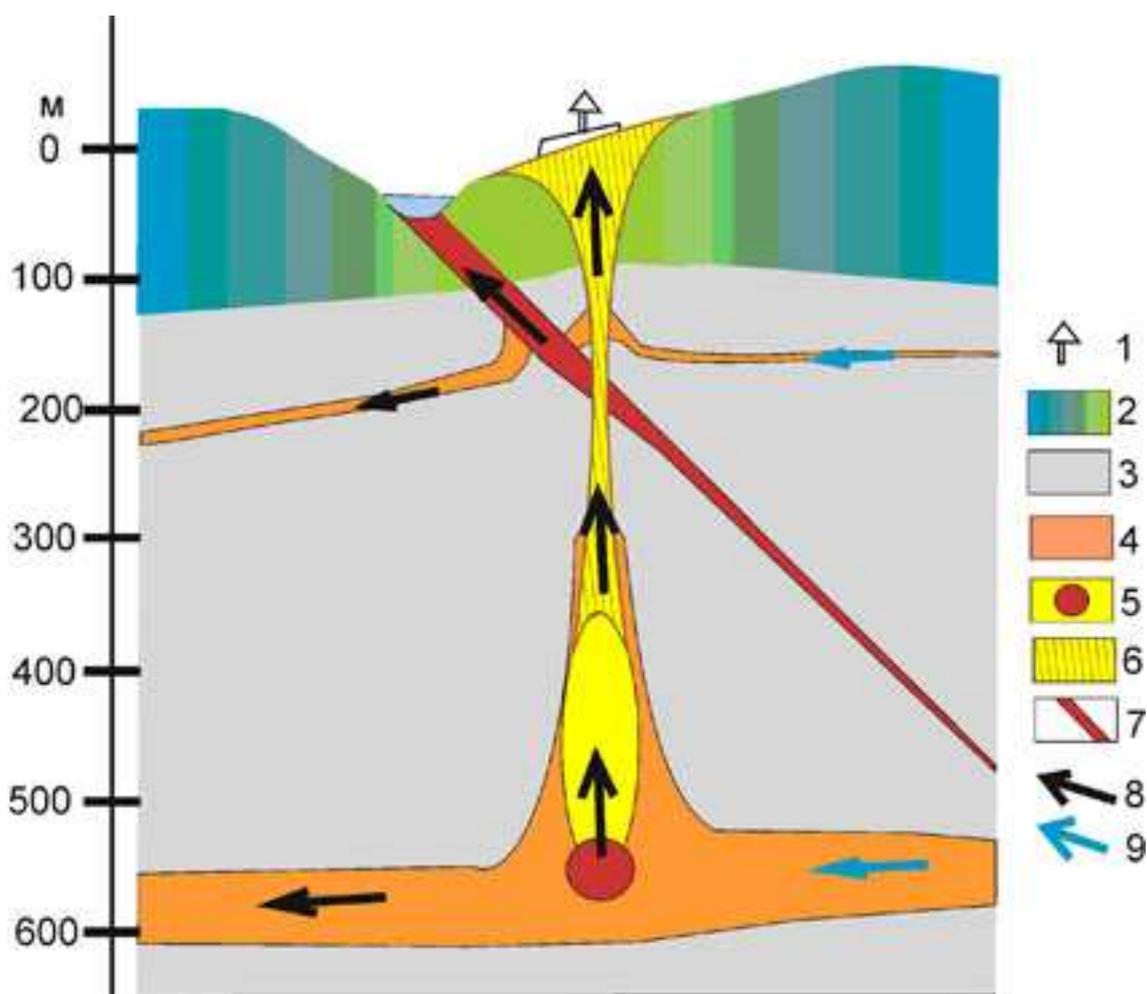


Рис.103. Геоэкологическая модель объекта ПЯВ «Кратон-3» в условиях элизионной водонапорной системы. Условные обозначения:

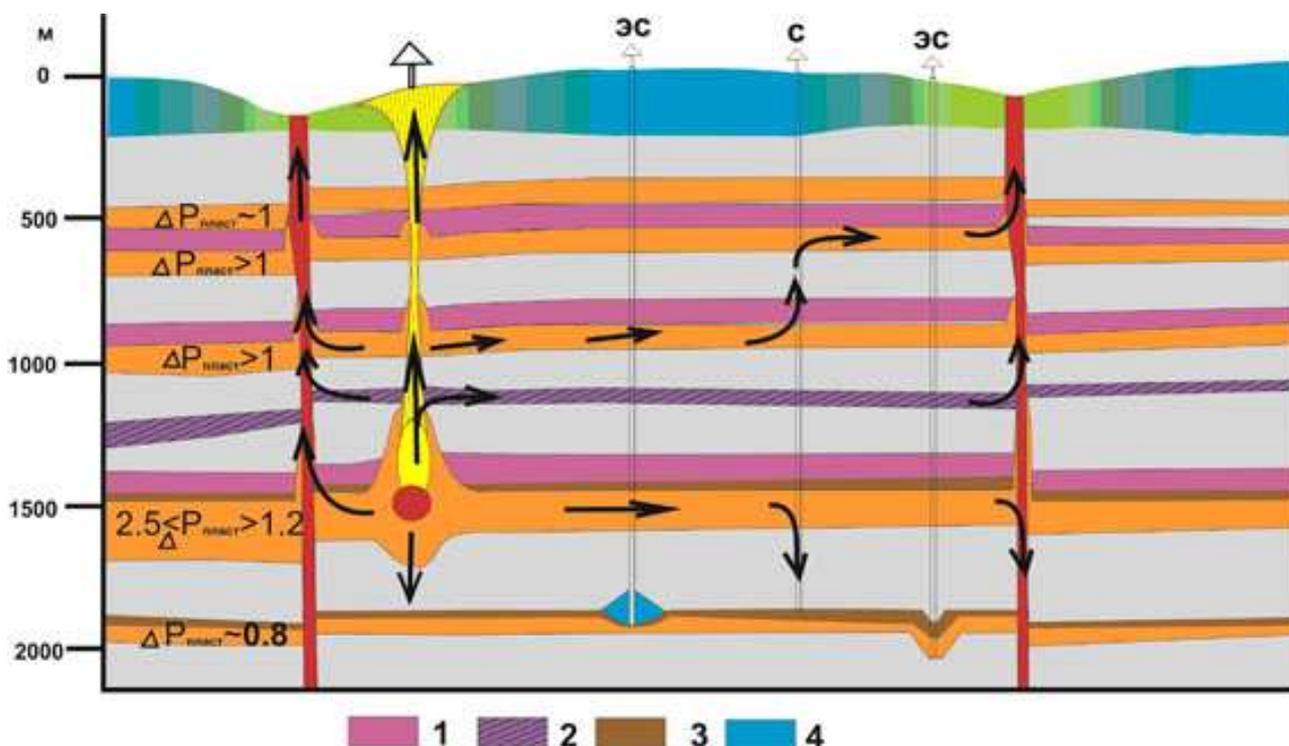
1. – устье боевой скважины; 2 - слой многолетнемерзлых пород (синий цвет – мерзлые, зеленый - талые); 2 – вмещающие осадочные породы (доломиты и известняки); 3 – подземные водоносные горизонты с рассолами; 5 – полость взрыва; 6 - столб обрушения и ослабленная зона вокруг боевой скважины; 7 – тектонический разлом; 8 – направление движения подземных флюидов с радионуклидами; 9 – региональное направление движения подземных флюидов.

В условиях элизионной водонапорной системы Оленекского и Якутского криоартезианских бассейнов идет интенсивное просачивание подземных радиоактивных флюидов из полостей ПЯВ на поверхность (рис.103). Обнаружение существенных концентраций техногенных радионуклидов, хлоридов  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , фиксирование Y, Be, La в поверхностных водах и донных отложениях ослабленных зон вокруг боевых скважин указывает на доминирование вертикальных направлений в движении радиоактивных подземных флюидов. Здесь также наблюдаются признаки выхода подземных радиоактивных флюидов на удалении 10 и более км от объектов ПЯВ. Дальность влияния ПЯВ на геологическую среду достигает десятков км при наличии подходящих проводящих геоструктур: водоносных горизонтов, тектонических разломов и других. В районе ПЯВ

«Кратон-3» выходы радиоактивных флюидов по индикатору - тритию наблюдаются вдоль тектонического разлома, выходящего по руслу р. Марха на удалении до 3-х км от объекта.

На территории СБНГКМ большая активность трития в речной воде как рядом с объектами ПЯВ, так и в 3.5 км выше по течению от объектов ПЯВ (т.33, рис.74) и в полноводной р. Улахан-Ботубуйа в 9.3 км от ближайшего объекта ПЯВ, свидетельствуют о повсеместном выходе подземной активности по сети тектонических разломов, разбивающих геологический массив на ряд блоков. Многослойные мощные пласты каменной соли, отличающиеся пластичностью, непроницаемостью для флюидов, а также обладающие свойством залечивания старых и вновь возникающих трещин и разломов, хотя и перекрывают сверху полости 6-ти ПЯВ, но, как оказалось, в реальных условиях СБНГКМ не препятствуют выходу радиоактивных флюидов с подземными напорными рассолами на поверхность земли.

Между тем известно, что на СБНГКМ элизионная водонапорная система, характерная для межсолевого и подсолевого разрезов, на глубине 1800-2100 м около подошвы платформенного чехла сменяется на аномально – депрессионную с дефицитом пластового давления от 2.5 до 5 МПа. Подобные условия способствуют перетеканиям подземных флюидов в нижние слои, что подтвердили первые результаты исследования бурового шлама и рассолов. На верховье р. Тэлгэспит в 6 км к югу от объектов ПЯВ из кустовых скважин (см. рис.74, б, т.79) с глубины 1541-1717 м были отобраны пробы бурового шлама и подземных рассолов. Конечно, буровой шлам – это технологический объект, смешанный с измельченными вмещающими породами и подземными рассолами, но наличие в них техногенных радионуклидов становится ценной информацией (поскольку изначальное содержание техногенных радионуклидов в технологическом растворе исключается). В буровом шламе, отобранном на глубине 1709 и 1717 м, активность  $^{90}\text{Sr}$  составило 1.2 и 2.9 Бк/кг соответственно, в пробе из глубины 1717 м обнаружены изотопы Pu:  $^{239,240}\text{Pu}$  – 0.2 Бк/кг,  $^{238}\text{Pu}$  – 0.2 Бк/кг. В подземных рассолах интервала 1541-1558 м активность  $^{90}\text{Sr}$  составило 0.049 Бк/л, 1709 м – 0.054 Бк/л, 1717 м – 0.702 Бк/л. В подземных рассолах нижних горизонтов увеличивается активность радиостронция в 10 раз. Ближайшие (в 6 км) к скважинам опробования объекты ПЯВ «Нева-2», «Нева-3» и «Нева-4» были проведены на глубинах 1527, 1515 и 815 м, а находим мы техногенные радионуклиды на интервале 1717 м глубины. Эти данные указывают не только на горизонтальное движение радиоактивных флюидов в геологической среде, но и их вертикальные перетекания вниз в нижние слои разреза с более низкими пластовыми давлениями.

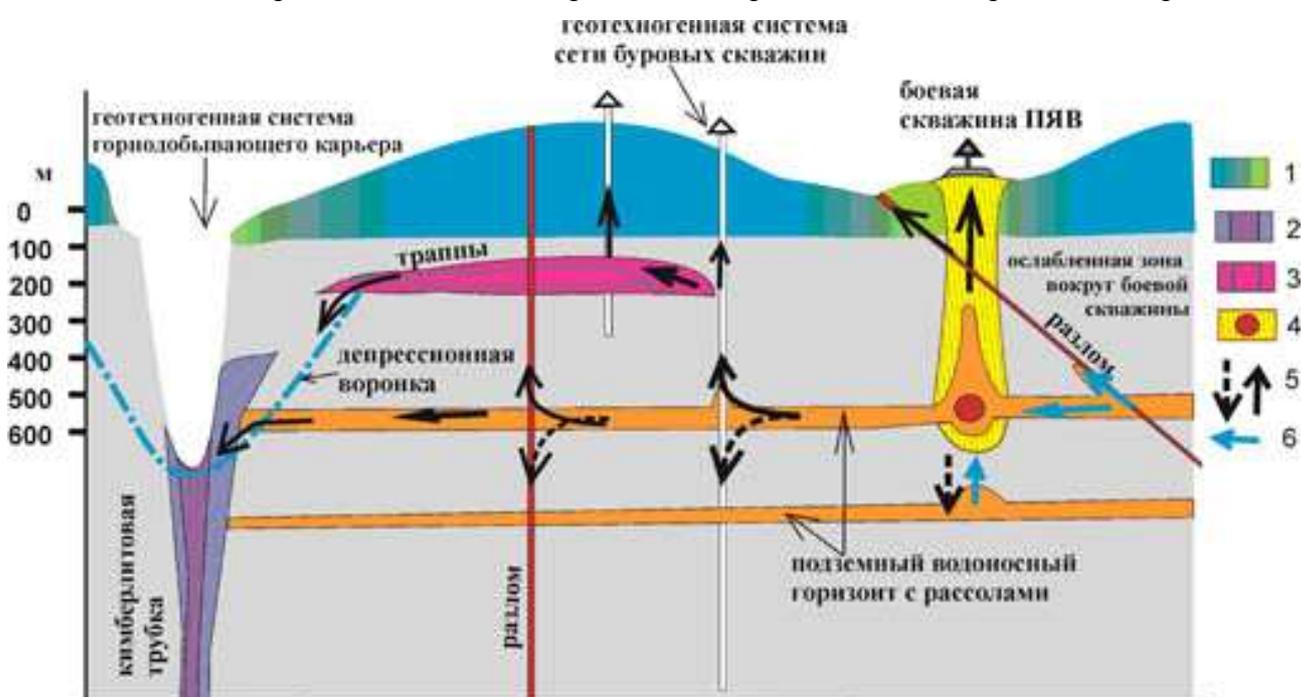


**Рис.104.** Геоэкологическая модель объектов ПЯВ на СБНГКМ в условиях элизионной водонапорной системы, переходящей на глубине ~1800 м в anomalно-депресссионную водонапорную систему. Условные обозначения: 1- соленосные толщи, 2 – трапповое тело; 3 – продуктивные пласты; 4 – искусственные гидрогеологические подпоры (нагнетание растворов);  $\nabla P_{\text{пласт}}$  – пластовой давление/ гидростатическое давление; эс- эксплуатируемые рабочие скважины; с – старая разгерметизированная геологоразведочная скважина; остальные условные обозначения – см. рис.103.

В условиях элизионной водонапорной системы межсолевого и подсолевого разрезов до глубин 1700 м и anomalно депрессионной водонапорной системы в нижней части разреза (ниже 1800 м) в геологической среде СБНГКМ идет массоперенос радионуклидов из полости взрывов как к поверхности земли, так и в нижезалегающие горизонты в зависимости от конкретных геологических условий и изменений флюидодинамического режима подземных вод (рис.100). Проводниками радиоактивных флюидов из глубинных подсолевых горизонтов на поверхность земли, так и на более нижние горизонты, по-видимому, служат естественные геоструктуры тектонических разломов, водоносные горизонты, контактные зоны траппов, а также техногенные геоструктуры ослабленных зон вокруг боевых скважин, возможно, сеть старых геологоразведочных скважин, потерявших герметичность. Сделано предположение, что интенсивному массопереносу радиоактивных флюидов в геологической среде СБНГКМ и их выходу на поверхность земли способствует активное техногенное воздействие на флюидодинамический режим подземных водоносных горизонтов при добыче углеводородного сырья: создание депрессионных воронок у одних скважин, закачка и нагнетание растворов (в т.ч. кислотных) по сети других буровых скважин с целью усиления

нефтеотдачи продуктивных пластов и т.п. Высокая разбуренность (рис. 71) территории СБНГКМ создает возможность межслоевого перетекания флюидов, в том числе радиоактивных, по стволам и околоствольному пространству потерявших герметичность старых геологоразведочных буровых скважин.

Таким образом, в условиях элизионной водонапорной системы в верхней части разреза и аномально депрессионной водонапорной системы в нижней части разреза (ниже 1800 м) идет перенос радиоактивных флюидов из зон ПЯВ как к поверхности земли, так и их переток в нижезалегающие горизонты в зависимости от конкретных условий и техногенного влияния на флюидодинамический режим при добыче нефти. Соответствующая обобщенная модель «полость взрыва-геологическая среда - - поверхность земли» приведена на рис.101.



**Рис.105.** Обобщенная модель геотехногенной системы «полость взрыва – геологическая среда - - поверхность земли» в условиях элизионной водонапорной системы (и штрихом – в условиях аномально-депрессионной водонапорной системы в нижней части разреза). Условные обозначения: 1 – многолетнемерзлые породы (зеленый - талики); 2 – кимберлитовая трубка и ее контактная зона; 3 - трапповый интрузив с контактной зоной; 4 – полость ПЯВ и ослабленная зона вокруг боевой скважины; 5 – направления движения подземных флюидов, загрязненных техногенными радионуклидами, сопутствующими элементами и хлоридами  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ; 6 – поступление природных подземных флюидов.

Каждый участок ослабленной зоны вокруг боевой скважины – одной из главных составляющих геоэкологической модели ПЯВ количественно охарактеризована физическими эмпирическими формулами. Геоэкологическая модель количественно характеризуется параметрами удельного электрического сопротивления пород, а также на поверхности земли и в геологических «окнах» (карьерах, скважинах) – геохимическими

параметрами количественного содержания хлоридов  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , техногенных радионуклидов и сопутствующих элементов в поверхностных водах, донных отложениях и подземных рассолах.

Развитие геоэкологической модели ПЯВ «Кратон-4» в зоне перехода Вилюйской синеклизы в Предверхооянский прогиб детерминируют особенности геологической среды:

- развитие инфильтрационной водонапорной системы во вмещающих слаболитифицированных песчаниках и алевролитах,
- расположение на восточном склоне погребенного Хапчагайского мегавала – геоструктуры 2-го порядка
- наличие тектонического разлома, простирающегося в субширотном направлении на восток.

В условиях инфильтрационной водонапорной системы радионуклиды из полости взрыва преимущественно двигаются в латеральном направлении вместе с подземными водами к северо-востоку-востоку по склону погребенного Хапчагайского мегавала. Наличие в районе регионального тектонического разлома раннепалеозойского заложения восточного простирания способствует движению инфильтрационных метеорных и подземных флюидов верхней части разреза по трещиноватой зоне разлома к востоку [Тектоника..., 2001].

Но данная инфильтрационная водонапорная система осложняется восходящими напорными глубинными потоками подземных вод, поступающих по зонам надвиговых нарушений со стороны Предверхооянского прогиба при наличии литологических алевролитовых и аргиллитовых подпоров в геологическом разрезе, то есть становится элизионной к востоку от объекта ПЯВ «Кратон-4» .

Данная модель охарактеризована на поверхности земли геохимическим параметрами: количественными данными активности техногенных радионуклидов в поверхностных водах и донных отложениях к востоку от объекта «Кратон-4»: их активности повышены по сравнению с пробами фоновых участков и участков к западу от объекта ПЯВ «Кратон-4» (рис. 96, 98). На расстоянии примерно до 20 км в донных отложениях активность  $^{137}\text{Cs}$  достигает 54 Бк/кг,  $^{90}\text{Sr}$  – 17 Бк/кг,  $^{239,240}\text{Pu}$  – 2.08 Бк/кг, тогда как к западу от ПЯВ «Кратон-4» активности радионуклидов в донных отложениях намного ниже:  $^{137}\text{Cs}$  на порядок ниже – 5.7 Бк/кг,  $^{90}\text{Sr}$  – 2.8-10 Бк/кг, изотопы  $\text{Pu}$  – не установлены. В пробах поверхностных вод к востоку от объекта ПЯВ «Кратон-4» активность  $^{90}\text{Sr}$  составляет 0.013-0.02 Бк/л, что выше регионального фонового уровня в 2.5–4 раза. Наиболее информативным оказалось  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  отношение: в донных отложениях и воде озер, расположенных к востоку от объекта «Кратон-4»  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  снижено до 132 и до 126.8 соответственно, тогда как природное отношение равно 138. Факт пониженного отношения  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  указывает на современные

процессы переноса радионуклидов по системе «полость взрыва – геологическая среда – поверхность земли» (рис.106). Если бы поступление  $^{235}\text{U}$  в озерную систему было одновременным (при взрыве), то за прошедший период после взрыва постоянное поступление в озера метеорных вод и водотоков сивелировало бы давно  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  отношение в поверхностных водах до природных значений (138).

Низкие валовые содержания U, Th соответствует местному геохимическому ландшафту района: в донных отложениях низкие – в среднем 0.5 и 2.4 г/т, в поверхностных водах фоновых озер концентрация U в среднем составляет 0.012 мкг/л, а Th не обнаружен. Между тем в озерах в пределах ослабленной зоны и к востоку от объекта «Кратон-4» концентрации U в поверхностных водах увеличиваются в 22–73 раза – от 0.25 до 0.85 мкг/л. Отмечено примерно двухкратное увеличение содержания Th и U в донных отложениях озер Лаха и Арылах. В донных отложениях вышеназванных 5-ти озер, где отмечены признаки выходов подземных флюидов, установлены содержания редких элементов: Be – 2.9–5.1 г/т, Co – 15-21 г/т, Y – 24-32 г/т, тогда как в донных отложениях других озер района Be не установлен, среднее содержание Co ниже в 3-4 раз и составляет 4.5 г/т при диапазоне 2.1 – 6.6 г/т, Y – ниже в 4-5 раз и составляет в среднем 6.8 г/т при диапазоне 3.6-8.8 г/т. Кроме того, в донных отложениях этих 5-ти озер зафиксировано увеличение содержания лантаноидов, которое формирует отдельное геохимическое поле на диаграмме La+Ce/Yb+Lu (рис.98, 99). В поверхностных водах эти элементы обнаружены в единичных пробах в пределах ослабленной зоны вокруг боевой скважины (Be – 0.1 мкг/л, Co – 1.11 мкг/л, Y – 0.4 мкг/л).

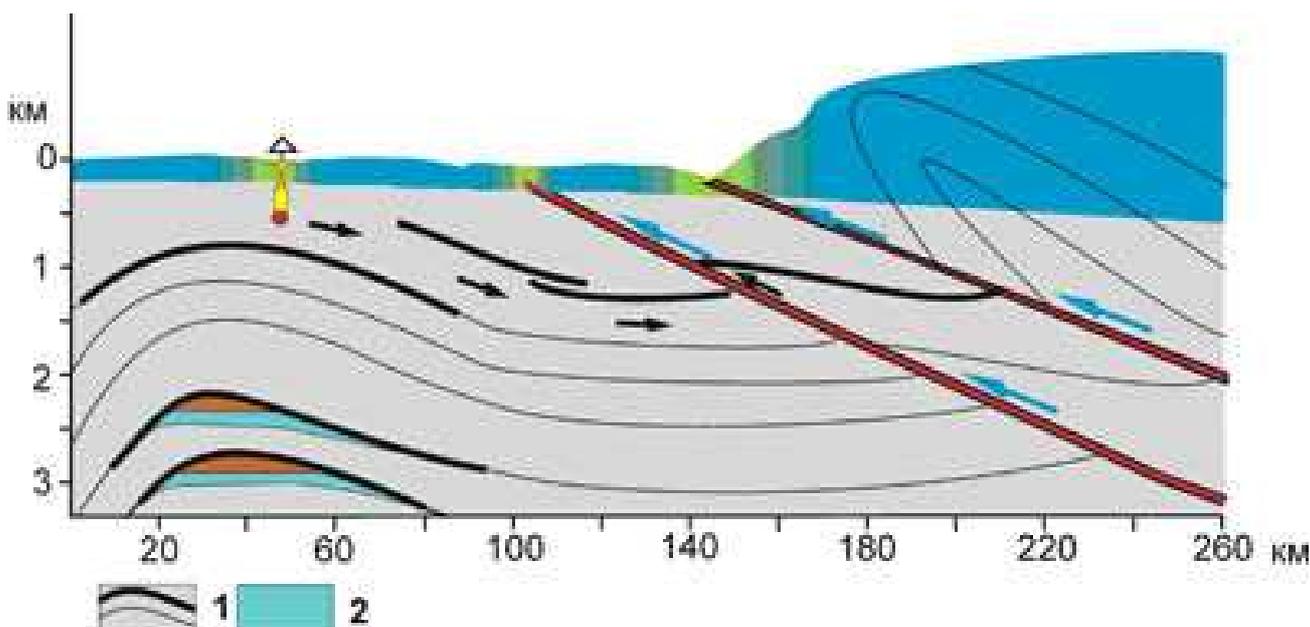


Рис.106. Геоэкологическая модель района ПЯВ «Кратон-4». Условные обозначения: 1 – вмещающие песчаники, алевролиты с водоупорными аргиллитами (в виде черных линий), 2 – подземные водоносные горизонты; остальные - см. рис. 103-105.

Таким образом, в условиях инфильтрационной водонапорной системы выявленные вариации концентраций радиоэкогеохимических параметров в районе ПЯВ «Кратон-4» достоверно свидетельствуют о преимущественно латеральном массопереносе радиоактивных флюидов в системе «полость взрыва – вмещающая геологическая среда … поверхность земли» в восточном направлении.

## **Глава 8. Геоэкологический мониторинг и пути снижения рисков радиоактивного загрязнения в районах ПЯВ.**

8.1. Поиск путей снижения радиоактивного загрязнения окружающей среды остается одной из актуальных практических проблем в области охраны природы и рационального природопользования [Ковалев и др., 1996, Рихванов, 1997, 2009].

На основе разработанных соискателем модели геотехногенной системы «полость взрыва – вмещающая геологическая среда – поверхность земли» и ее верификации на целом ряде объектов, сделаны практические рекомендации по мониторингу объектов ПЯВ, в том числе рекомендован комплекс методик обследования природной среды, обоснование периодичности замеров и густоты сети наблюдений. В связи с высокой подвижностью тритий является хорошим индикатором переноса радионуклидов в геотехногенной системе «полость взрыва - вмещающая геологическая среда - поверхность земли». Жидкостно-сцинтилляционная спектрометрия с относительно несложной пробоподготовкой и доступностью по ценам рекомендована как оптимальный метод мониторинга объектов ПЯВ. Массовый пробоотбор поверхностных вод и определение в них активности трития позволит определить основные пути переноса и протяженность распространения техногенных радионуклидов в районе ПЯВ.

Дальнейшее совершенствование модели будет происходить при выявлении с ее помощью других аномалий различной природы.

8.2. Для снижения распространения радионуклидов в геологической среде районов ПЯВ соискателем рекомендована методика специальных горных отводов - выделения особых охранных зон в недрах около объектов ПЯВ, где запрещается хозяйственная деятельность. В этой связи соискателем подготовлен Проект специального горного отвода (охранной зоны) объекта ПЯВ «Кратон-3», в пределах которого без разрешения надзорных органов запрещено ведение любой хозяйственной деятельности. Проект специального горного отвода (охранной зоны) объекта ПЯВ «Кратон-3» передан государственному заказчику – Министерству охраны природы РС(Я) и находится на стадии государственной экспертизы. На рис. 107

приведена примерная схема специального горного отвода (охранной зоны) объекта ПЯВ «Кратон-3».

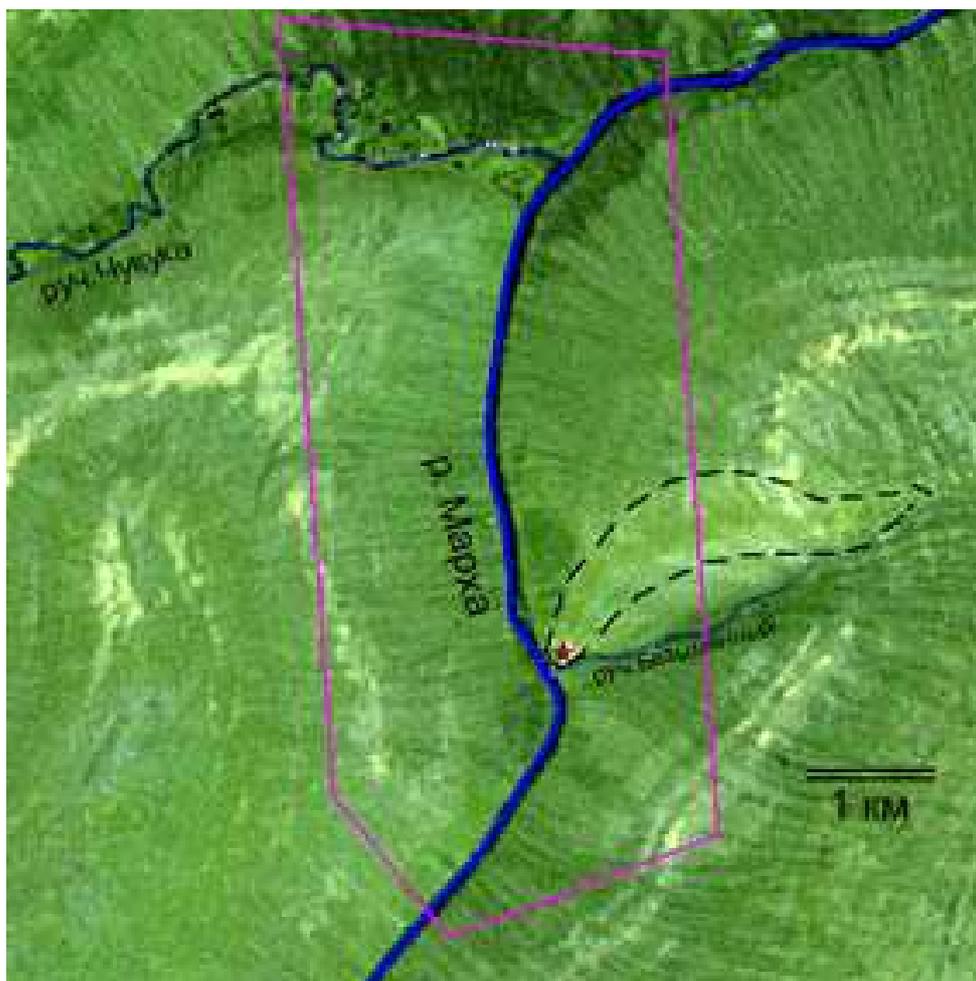


Рис.107. Схема специального горного отвода (охранной зоны) объекта ПЯВ «Кратон-3», в пределах которого без разрешения надзорных органов запрещено ведение любой хозяйственной деятельности

8.3. Для снижения распространения радионуклидов в сопряженных геохимических ландшафтах с целью разработки органо-минеральных барьеров проведены экспериментальные работы по применению цеолитов в качестве сорбентов радионуклидов. Для исследований были взяты пробы цеолитов из близкорасположенного якутского месторождения цеолитов, также использованы пробы глин из сибирских месторождений, торф из верховых и низинных сибирских болот [Артамонова, Разворотнева, 2009, 2010].

В последнее десятилетие наметилась тенденция использования геохимических методов, в которой основной задачей безопасного захоронения радиоактивных отходов является не только их изоляция, но и геоконсервация в наименее подвижных формах, как это имеет место в месторождениях, в т.ч. вторичных в зонах гипергенеза. Организации проточных минерально-сорбционных реакторов - геохимических барьеров в местах

интенсивного выхода загрязненных вод на поверхность земли может помочь предотвратить дальнейшую миграцию радионуклидов в геохимических ландшафтах. Для предотвращения попадания радионуклидов в сопряженные ландшафты и их дальнейшего распространения по трофическим цепям весьма эффективно проявляют себя сорбционные барьеры на неорганических минералах (глины, цеолиты и т.д.) и на органических веществах (торф, сапропели). Помимо установления физико-химических особенностей природных материалов-сорбентов, необходимо изучение источников радионуклидов на объектах ПЯВ. На примере исследования миграции радионуклидов на объекте ПЯВ «Кратон-3» были проведены экспериментальные работы по поиску наиболее подходящих природных материалов для создания противомиграционного геохимического барьера и установлению взаимосвязи между кристаллохимическими особенностями различных структурных типов природных материалов и их способностью поглощать и долговременно удерживать радионуклиды.

Эксперименты проводились на образцах глинистых минералов различных структурных типов (монтмориллониты, каолиниты, иллиты), принадлежащих ряду месторождений Сибири (Трошковского, Камалинского, Таганского и т.д.). Из этих образцов были получены фракции менее 2 мкм седиментационным путем без какого-либо предварительного растирания, чтобы избежать появления неконтролируемых дефектов структуры. В работе использовались образцы торфа различного генезиса – верховой, переходный и низинный, взятые из различных месторождений Сибири (Яринского месторождения Новосибирской области, торфяников севера Омской области и Ямало-Ненецкого округа). Пробоподготовка включала в себя просеивание, затем разделение на фракции седиментационным путем и высушивание подготовленных фракций при комнатной температуре, а для методов физико-химического анализа при 105 °С в течение 4 часов. Сорбционную емкость определяли по изменению концентрации исходных растворов радионуклидов в жидкой фазе после контакта с навеской образца в течение фиксируемых промежутков времени. Отношение жидкой и твердой фаз варьировалось в интервале 100:1 – 100:3. Разделение фаз после сорбции проводилось на центрифуге (15 тыс. об/мин.). Концентрации урана в диапазоне  $10^{-1}$ – $10^{-7}$  г/л определяли на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой IRIS Advantage (ICP-AES). Для анализа низких концентраций радионуклидов использовали метод масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) высокого разрешения ELEMENT фирмы FINNIGAN MAT (Germany) с магнитным сектором и двойной фокусировкой. Перед началом измерений проводилась настройка прибора и оптимизация инструментальных параметров с целью получения максимального значения аналитического сигнала и его воспроизводимости

при минимальном вкладе в сигнал оксидных и двухзарядных ионов и низком фоновом уровне. Оптимизированные инструментальные параметры получены при использовании стандартного раствора 10090a977 фирмы «Merk». Расчет концентраций проводился автоматически. Погрешность определения составляла 1-5%.

Фазовый состав образцов исследовали рентгеноструктурным методом на дифрактометре ДРОН-3 (CuK $\alpha$ , графический монохроматор). ИК-спектры снимали в режиме пропускания на двухлучевом спектрометре Specord 75 IR в области 400-4000 см<sup>-1</sup> с таблеткой чистого KBr в канале сравнения. Оценка термических показателей проводилась на дериватографе системы «Paulik-J» с нагреванием образцов массой 300 мг в воздушной среде до 600 °C со скоростью 5 град./мин.

Первые эксперименты показали, что это направление имеет определенное будущее. Использование природных материалов, апробированных самой природой, позволяет с одной стороны гарантировать надежность и длительность консервации, с другой стороны большинство этих материалов (торф, глина, цеолиты и т.д.) достаточно распространены и дешевы.

*Сорбция на глинах.* Все типы глинистых минералов обладают значительными удельными поверхностями, на которых проявляют свое действие отрицательные некомпенсированные или слабо скомпенсированные заряды. Давно установлена и используется в практических целях катионообменная способность глинистых минералов [Ковалев и др., 1996]. Наилучшими хемосорбентами являются глинистые минералы со структурным мотивом 2:1, у которых обе стороны пакета заряжены отрицательно. Это набухающие смектиты – монтмориллонит, бейделлит и др. Глинистые минералы с одним слоем кремнезема и с одним слоем гиббсита в пакете (структурный мотив 1:1) – это ненабухающие глины: кандиты, к которым принадлежат каолиниты, иллиты. Хемосорбционная емкость смектитов и кандитов отличается в среднем на порядок (100–150 мг-экв/100 г у первых и 10–15 мг-экв/100 г у вторых).

При изучении мобильности радиоактивных элементов большое внимание уделяется сорбционным свойствам глинистых минералов (на их долю приходится до 65-80% объема всех осадочных минералов), которые вследствие своей низкой проницаемости и высокой поглощающей способности являются эффективным геохимическим барьером. Общепринято, что одним из главных процессов сорбции радионуклидов глинистыми минералами является ионный обмен между катионами обменного комплекса алюмосиликатной матрицы и растворимыми формами радионуклидов водной фазы [Lu, Mason, 2001, Мироненко и др., 2006]. Нами было установлено, что глины сохраняют способность к катионному обмену в достаточно широком диапазоне pH от 4 до 9, что охватывает подавляющее большинство

кислотности природных и техногенных вод. Эксперименты по сорбции радионуклидов на примере азотнокислых солей  $\text{Sr}^{+2}$ ,  $\text{UO}_2^{+2}$  были выполнены на образцах монтмориллонитов, каолинитов и иллитов. В результате установлено, что значения максимальной сорбционной емкости глин в зависимости от типа месторождения варьируют от 45 до 320 мг-экв/100 г. Наилучшими показателями отличается монтмориллонит за счет внедрения сорбируемого катиона в межслоевое пространство структуры. Использование метода ICP-MS позволило определить содержание радионуклидов после прохождения их через глинистые сорбционные барьеры (табл. 46).

**Таблица 46. Содержание ионов радионуклидов (г/л) в исходном растворе ( $C_0$ ) и после прохождения через глинистые сорбционные барьеры ( $C_x$ )**

Минерал (месторождение)	$\text{UO}_2^{+2}$		$\text{Sr}^{+2}$		$\text{Cs}^+$	
	$C_0$	$C_x$	$C_0$	$C_x$	$C_0$	$C_x$
Щелочной монтмориллонит (Таганское)	$9,5 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$7,3 \cdot 10^{-2}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$
Щелочноземельный монтмориллонит (Таганское)	$9,5 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$7,3 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$
Щелочноземельный монтмориллонит (Камалинское)	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$5,3 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$4,8 \cdot 10^{-4}$	$7,3 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$
Щелочноземельный монтмориллонит (Трошковское)	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$6,4 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$7,3 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$
Каолинит (Трошковское)	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$4,8 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$7,6 \cdot 10^{-4}$	$7,3 \cdot 10^{-2}$	$6,4 \cdot 10^{-3}$

*Примечание:* Время сорбции 30 мин.

Главной причиной ионообменной способности каолинитовых минералов являются нарушенные связи по краям обломанных граней глинистых частиц. Кроме того, поглощение радионуклидов происходит за счет частичного замещения протона в гидроксильных группах. На рис. 108 показано изменение во времени содержания имплантированных в структуру каолинита ионов стронция и цезия из растворов.

Так, по данным термогравиметрического анализа количество ОН-групп в каолинитах Трошковского месторождения в 5 раз больше, чем в монтмориллонитах этого же месторождения (табл. 47). Однако, у монтмориллонита при взаимодействии сухого материала с водой, наряду с возрастанием количества физически сорбированной и межслоевой воды, происходит двукратное увеличение количества ОН<sup>-</sup> групп, что приводит к увеличению поглощающих свойств.

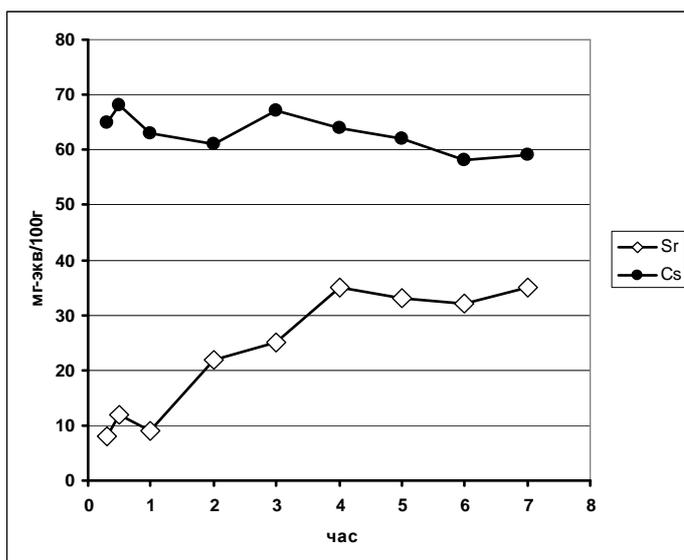


Рис.108. Изменение содержания Cs и Sr в каолините в процессе ионного обмена в течение первых 8-ми часов эксперимента.

Для усиления обменных свойств глинистых минералов проводилась предварительная обработка неорганическими кислотами: HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub> и H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. Эксперимент проводился следующим образом: 10 г глины смешивались со 100 мл кислоты (0,5 М) и в течение 2-х часов перемешивались без нагрева на магнитных мешалках. Раствор отделялся от твердого остатка на центрифуге (15000 об/мин.). Затем у приготовленных таким образом образцов определялись показатели извлечения радионуклида из раствора (табл. 48).

Таблица 47. Влияние содержания различных форм воды (%) в глинах Трошковского месторождения на их сорбционную емкость по уранил-катиону

Структурный тип глинистого минерала	Физически сорбированная вода	Межслоевая вода	ОН группы	Сорбционная емкость, мг-экв/100г
Монтмориллонит сухой	7,1	1,1	1,8	210
Монтмориллонит гидратированный	12,8	2,8	3,8	280
Каолинит сухой	3,8	0	9,9	69
Каолинит гидратированный	5,5	0	10,5	106

Как видно из таблицы, эффективность воздействия кислот следующая:  $H_2SO_4 < HNO_3 \sim HCl < H_3PO_4$ . Наиболее значимый эффект наблюдается при обработке ортофосфорной кислотой практически для всех типов глин и за короткое время. Это объясняется тем, что фосфатсодержащие поверхности имеют тенденцию к образованию прочных комплексных соединений с радионуклидами. Устойчивость таких комплексов настолько высока, что они не разрушаются даже при 800 °С.

Таблица 48. Поглощение ионов стронция и уранила из 0,01М водных растворов глинистыми минералами, обработанными неорганическими кислотами

Структурный тип глины	Обработка 0,5М кислотами	% сорбции $Sr^{+2}$		% сорбции $UO_2^{+2}$	
		Время сорбции		Время сорбции	
		5 мин	20 мин	5 мин	20 мин
Монтмориллонит	Необработанный	18,2	36,2	46,1	59,4
	HCl	39,6	53,4	59,4	70,6
	HNO <sub>3</sub>	44,7	61,0	72,3	76,2
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	32,4	41,1	30,7	34,8
	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	56,9	72,9	90,9	92,5
Каолинит	Необработанный	22,1	33,8	34,0	39,2
	HCl	45,8	66,9	60,2	71,9
	HNO <sub>3</sub>	54,3	78,8	67,1	68,2
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	25,7	39,8	44,9	47,0
	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	45,9	74,4	87,5	91,2
Иллит	Необработанный	14,9	21,8	14,2	19,9
	HCl	30,7	44,9	52,0	54,8
	HNO <sub>3</sub>	34,3	52,2	57,3	53,3
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	7,9	8,9	9,3	3,9
	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	68,3	71,2	78,9	81,1

Для монтмориллонитов обменно-сорбционная емкость на 80% связана с внутренними замещениями в кристаллической структуре с образованием нескомпенсированных зарядов на базальной спайной плоскости. Чаще всего компенсация происходит за счет адсорбирующихся из раствора ионов стронция или урана. Анализ проведенных экспериментов позволяет заключить, что причиной сорбции радионуклидов на поверхностях глинистых минералов являются: а) катионообменные реакции; б) нарушения (разрыв) химических связей на поверхностях частиц.

*Сорбция на цеолитах.* Целесообразность использования цеолитов для поглощения радионуклидов связана с их большим адсорбционным объемом (до 0,54 см<sup>3</sup>/г) и молекулярно-ситовыми свойствами [Челищев, 1987, Брек, 1976, Химия ..., 1980]. Существует еще одна особенность цеолитов, обусловленная кристаллической структурой. Хотя внешняя поверхность гранулы клиноптилолита невелика и составляет доли квадратного сантиметра, площадь, занимаемая адсорбированными молекулами, составляет

сотни квадратных метров на 1 г., что связано с большой внутренней поверхностью адсорбента, гранула которого пронизана каналами и полостями.

Наличие ОН-групп обуславливает достаточно сильное взаимодействие адсорбируемых молекул с адсорбентом. Очевидно также, что на поверхности цеолита в присутствии воды концевые атомы замыкаются гидроксильными (ОН) группами. Свойства таких ОН-групп определяются природой атомов, с которыми они соединены. На поверхностных группах гидроксидов и атомов кислорода цеолитов протекают процессы образования комплексных соединений вследствие молекулярных взаимодействий с ионами растворимых радионуклидов. Вследствие того, что  $^{90}\text{Sr}$  характеризуется большой подвижностью и сравнительно слабо задерживается почвенными сорбирующими комплексами, он может мигрировать на большие расстояния. Формы существования  $^{90}\text{Sr}$  в водной среде зависят от условий его образования. На загрязненных участках земли районов ПЯВ образуются легкорастворимые формы  $^{90}\text{Sr}$ , и он может присутствовать в поверхностных водах в виде устойчивого двухвалентного иона. В недрах в полости ПЯВ  $^{90}\text{Sr}$  может находиться в форме нерастворимых соединений (например, силикатов), что может существенно ограничивать его миграцию [Кузнецов и др., 1974].

Основными геохимическими процессами, контролирующими миграцию и фиксацию радионуклидов в объектах окружающей среды, являются комплексообразование в водных растворах, сорбция минералами и органическим веществом, соосаждение с макрокомпонентами системы. В исследуемом районе проведения ПЯВ фиксация стронция из подземных вод наблюдалась на цеолитах. Для оценки способности данного природного материала поглощать и удерживать стронций из жидкой фазы проводилось определение его сорбционной емкости. Своеобразие сорбции на цеолитах определяется ионным обменом. Сорбция радионуклида из водного раствора на минералах-сорбентах может быть выражена ионообменной реакцией следующего вида:



где  $A^{n+}$  - ионообменный катион минерала-сорбента,  $n$ -заряд этого катиона,  $X$ -анионная составляющая минерала.

Сорбционная способность цеолитов изучалась в статических условиях при 20 °С методом ограниченного объема в интервале значений рН 2–8,5. В качестве количественных характеристик взаимодействия цеолита с радионуклидом использованы коэффициенты распределения ( $K_d$ , см<sup>3</sup>/г). Как видно из табл. 49, исследуемые цеолиты обладают достаточно высокой сорбционной способностью в отношении стронция и цезия.

Таблица 49.

Влияние pH на коэффициенты распределения на цеолите радионуклидов Sr и Cs

pH	2	5	7	8,5
$K_d \text{ см}^3/\text{г Sr}$	14,9	137	385	970
$K_d \text{ см}^3/\text{г Cs}$	17,8	164	210	685

Полученные результаты показывают существенное влияние pH раствора на сорбцию радионуклидов. Рост сорбции радионуклида с увеличением pH свидетельствует о том, что в растворе они находятся в ионном состоянии. Такое влияние pH на сорбционную способность цеолитов обусловлено тем, что эти сорбенты, как и другие алюмосиликаты, являются полифункциональными слабокислотными ионитами. Поэтому в кислой среде в обмене на сорбенте различных катионов участвуют и конкурирующие с ними ионы водорода. Взаимодействие ионов водорода с кислородным радикалом каркаса цеолита приводит к образованию гидроксильных групп и понижению заряда матрицы, что сопровождается уменьшением сорбционной способности цеолитов в отношении  $^{90}\text{Sr}$ . Таким образом, сильная зависимость поглощающей способности от кислотности при pH 3–5 обусловлена ионным обменом  $\text{H}^+/\text{Sr}^{2+}$ . Далее зависимость от pH несколько снижается, что связано с замещением протона на ион поверхности. Вблизи нейтральной области начинается химическая сорбция на оксидо-подобной части поверхности. Химическую сорбцию в данном случае легко отличить по слабой зависимости от ионной силы, сильной зависимости от pH, и химической специфике. При более высоких показателях pH (7–8,5) преимущественно работает механизм поверхностного комплексообразования.

Для определения максимальной поглощающей способности цеолита были проведены эксперименты в статическом режиме с использованием магнитных мешалок. Этот метод обеспечивает максимальный контакт поверхности порошкообразного образца с раствором, содержащим стронций, за счет постоянного перемешивания. Для вычисления емкости катионного обмена (ЕКО) по уравнению Ленгмюра процесс сорбции проводился в течение 20, 40, 60 и 120 минут. На рис. 109 представлены результаты по изменению степени сорбции стронция образцом исходного цеолита в различные временные интервалы.

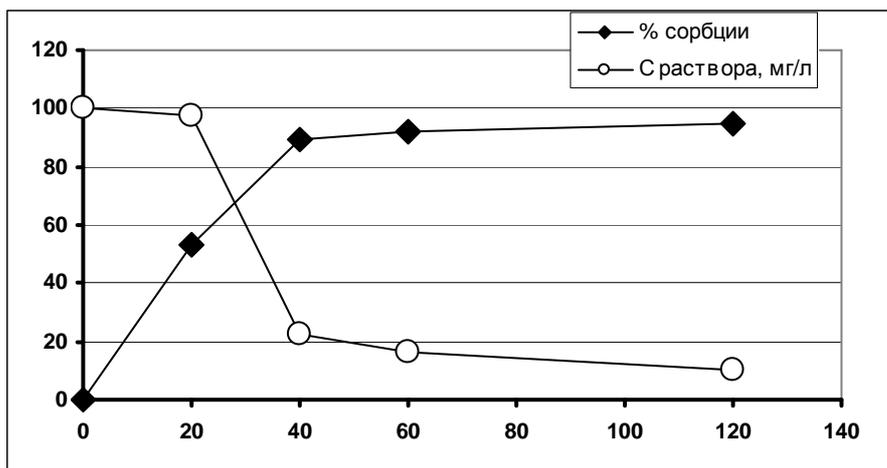


Рис.109. Изменение степени сорбции стронция образцом исходного цеолита в различные временные интервалы в течение первых двух часов эксперимента. *Примечание:* % сорбции – количество сорбированного стронция в цеолите в масс.%, С раствора – концентрация стронция в растворе.

Методом ИК-спектроскопии наряду с валентными и деформационными колебаниями, присущими самому цеолиту ( $3630, 3440, 1650-1620 \text{ см}^{-1}$ ), в результате контакта с ионами стронция из раствора наблюдаются новые полосы, свидетельствующие об образовании промежуточных соединений:  $3600, 3050, 2720, 2610 \text{ см}^{-1}$ . Полоса  $3600 \text{ см}^{-1}$  соответствует энергии образования водородной связи  $\text{O}\cdots\text{H}$ . Полоса  $3050 \text{ см}^{-1}$  также может быть отнесена к водородной связи, но более слабой, поэтому сорбционные комплексы такого типа легко разрушаются при воздействии слабосоленых природных вод. При сорбционном взаимодействии образуются также устойчивые комплексы, о чем свидетельствует исчезновение в ИК-спектрах полос в районе  $3600$  и  $1040 \text{ см}^{-1}$  и возникновение вместо них дополнительных координационных связей между стронцием и  $\text{OH}$ -группами.

В ИК-спектрах цеолитов после облучения наблюдается появление и рост максимума групп  $\text{SiOH}$  ( $3760-3730 \text{ см}^{-1}$ ), наряду со снижением интенсивности максимума преобладавших в исходном цеолите  $\text{AlOH}$  групп. В исследуемых ИК-спектрах цеолитов из канавы произошло также изменение поглощения в области колебания  $\text{Si-O}$  связей тетраэдров, что отражает изменение координации кремния, связанное с возможным образованием оборванных связей и атомов с ненасыщенной валентностью. Подтверждением этому является анализ ИК-спектров в области колебаний  $\text{OH}$ -групп. В спектре  $\text{OH}$ -групп облученного цеолита количество и интенсивность полос поглощения значительно больше, чем у исходного, что наглядно свидетельствует о наличии процесса радиолитического разложения.

*Сорбция на торфе.* Использование в качестве геохимических барьеров торфов разного генезиса связана с тем, что они во много раз превосходят по сорбционной емкости любые минеральные сорбенты, в том числе цеолиты и смектиновые глины [Орлов, 1985, 1993]. Главными компонентами торфа, участвующими в сорбции, являются гуминовые и

фульвовые кислоты. Они представлены конденсированным полиароматическим скелетом, с которым связаны группы  $-COOH$ ,  $-OH$  и другие, придающие материалу кислотный характер. В присутствии молекул воды ионы водорода в этих группах замещаются на катионы радионуклидов. Коэффициент геохимической очистки при этом достигает 10000 единиц. Процесс идет динамично – обмен занимает несколько минут. Содержащиеся в торфах гумусовые вещества (ГВ) образуют прочные соединения с радионуклидами и могут быть использованы как мощный геохимический барьер. Кроме того, ГВ демонстрируют высокую устойчивость к химической и термической деструкции.

Исследуемые нами образцы торфов представлены разными типами: низинным, верховым, переходным, Их фазовый состав изучен рентгеноструктурным методом. На рис. 110 представлены соответствующие дифрактограммы.

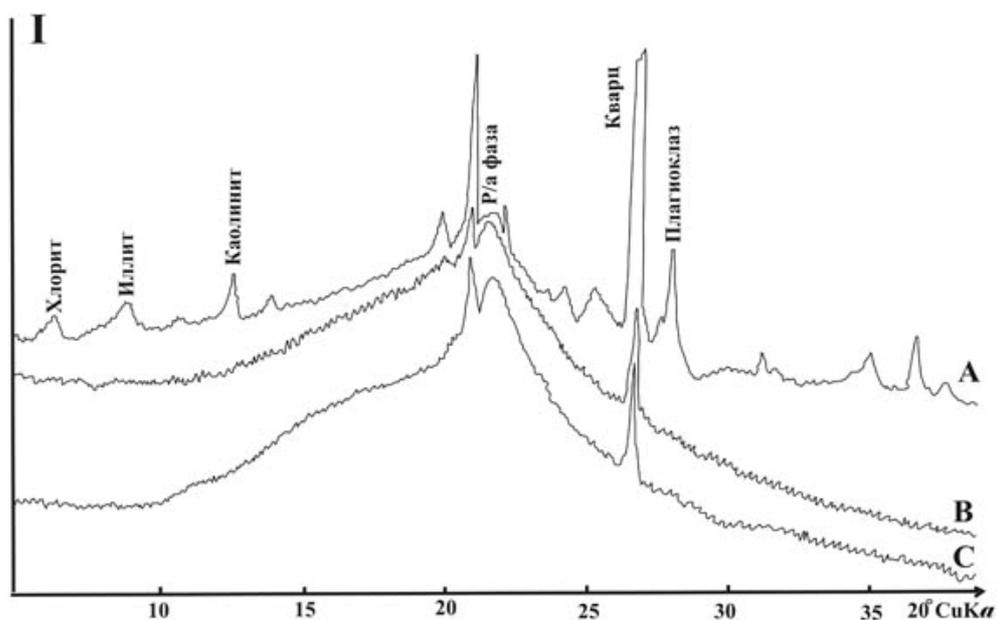


Рис.110. Рентгеновские дифракционные профили разных типов торфов.  
Примечание: А – низинный торф; В – переходный торф; С – верховой.

Образцы верхового и переходного торфов практически не содержат минеральных фаз, за исключением небольшой примеси кварца. Низинный торф, кроме рентгеноаморфной фазы, представляющей наличие дисперсного органического вещества, содержит различные минеральные компоненты (хлорит, иллит, каолинит, плагиоклаз), которые тоже участвуют в сорбционных процессах на геохимических барьерах и частично поглощают уран. Однако многочисленные экспериментальные данные свидетельствуют об определяющем влиянии состава органического вещества, главными компонентами которого являются гумусовые кислоты. Эти высокомолекулярные, склонные к ассоциации полидисперсные и полифункциональные лиганды содержат в своей структуре химические группы (карбоксильные, фенольные, хиноидные и т.д.), которые контактируют с катионами

радионуклидов. В табл. 50 представлены результаты поглощения стронция с исходной концентрацией  $1 \cdot 10^{-3}$  г/л образцами торфа разного генезиса: верховым, переходным и низинным.

Таблица 50. **Изменение концентрации стронция в растворе (г/л) в процессе сорбции разными типами торфов.** Исходная концентрация стронция  $1,0 \cdot 10^{-3}$  г/л.

Образец	Время сорбции, мин				
	5	10	20	30	50
Торф верховой	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$7,4 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$8,2 \cdot 10^{-6}$
Торф переходный	$0,9 \cdot 10^{-4}$	$0,8 \cdot 10^{-5}$	$6,8 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$2,3 \cdot 10^{-6}$
Торф низинный	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$9,8 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$

Наилучшими сорбционными показателями отличается переходный торф (снижение концентрации в растворе с  $1 \cdot 10^{-3}$  до  $3,6 \cdot 10^{-6}$  г/л за первые 30 мин опыта). Несколько ниже поглощающая способность у верхового и низинного торфов (снижение количества радионуклида в растворе до  $1,3 \cdot 10^{-5}$  и  $1,6 \cdot 10^{-5}$  г/л), при соотношении твердой и жидкой фазы 1:100. При изменении соотношения торф:раствор до 2:100 и 3:100, эффективность поглощения за 30 мин. несколько снижалась – для переходного, верхового и низинного – до значений  $7,4 \cdot 10^{-5}$  –  $3,8 \cdot 10^{-5}$  г/л;  $5,4 \cdot 10^{-5}$  –  $8,9 \cdot 10^{-5}$  г/л;  $7,8 \cdot 10^{-5}$  –  $1,1 \cdot 10^{-4}$  г/л, соответственно. Но далее с увеличением времени контакта раствора с торфом показатели поглощения увеличивались, что указывает на диффузионный характер процесса. Значения ЕКО для торфов разного генезиса в отношении стронция и урана представлены в табл. 51.

Таблица 51. **Максимальная емкость катионного обмена (ЕКО) в отношении жидких радионуклидов стронция и уранила для торфов разного генезиса**

Сорбент	ЕКО, мг-экв/100г	
	$UO_2^{+2}$	$Sr^{+2}$
Торф верховой	2432	540
Торф низинный	1542	630

Вывод. В результате статических и динамических экспериментов показана перспективность комплексного использования природных материалов: глин, цеолитов и торфов в качестве геохимического органо-минерального барьера для данного объекта. Для количественных характеристик сорбционных свойств исследуемых глин, торфов и цеолитов определяли их максимальные обменные емкости по ионам уранила и стронция из азотнокислых растворов. На рис. 110 представлены показатели поглощающей способности этих природных сорбентов.

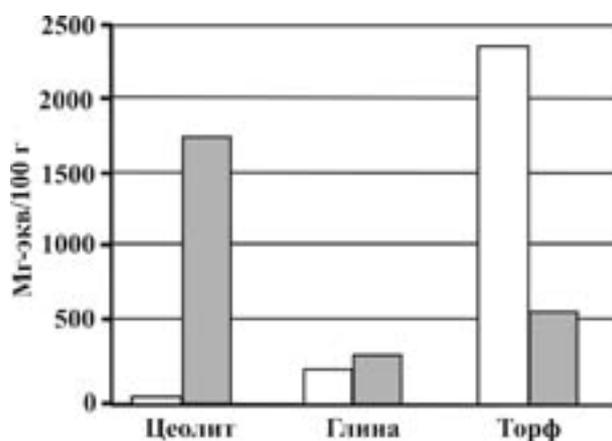


Рис.111. Поглощающая способность природных сорбентов в отношении уранила (белый цвет) и стронция (серый цвет).

Различия в значениях емкостей катионного обмена связаны как со структурными особенностями природных поглощающих матриц, так и с различием в механизмах их сорбционных взаимодействий.

Каждый тип материалов-сорбентов имеет свои преимущества и недостатки, обусловленные особенностями состава и структуры. И именно комплексное использование этих природных материалов поможет предотвратить дальнейшую миграцию опасных техногенных радионуклидов по речной сети района. Для этого рекомендуется сооружение в сезонно-талом слое органо-минеральных геохимических барьеров, при этом создание канав и их заполнение сорбентами нужно произвести в зимний период для сохранения термо-влажностного баланса мерзлых грунтов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлено, что полости ПЯВ вне зависимости от режима их проведения: штатного или аварийного, и геологических условий являются открытыми системами. Особенности геологической среды обуславливают различные сценарии развития системы «полость взрыва МПЯВ – вмещающая геологическая среда - поверхностные системы» на долговременную перспективу. Тектонические разломы, трещиноватые зоны, сквозные талики, пористые гранулярные горные породы это флюидопроницаемыми геоструктурами, которые могут стать проводником подземной активности из полостей взрывов в поверхностные системы.

1. Верхний слой, соответствующий ранним временам ( $t < 2$  мс) регистрации при зондировании методом переходных процессов с измеренными кажущимися удельными электрическими сопротивлениями от 30 до 1200 Ом·м интерпретирован как слой многолетнемерзлых пород. При этом породы с  $\rho_1 \gg 100$  Ом·м отнесены к сохранным

мерзлым породам, а с  $\rho_1 < 100$  Ом·м – к деградировавшим «отепленным влажным», среди которых участки пород с  $\rho_1 \leq 50$  Ом·м условно отнесены к талым.

2. Механическое разрушение горных пород при ПЯВ: появление зоны дробления, зоны трещинообразования вокруг полости взрыва, столба обрушения над полостью взрыва, у поверхности земли – откольной зоны с «талыми окнами» в многолетнемерзлом слое сформировали вертикально- ориентированную флюидопроницаемую ослабленную зону вокруг боевых скважин радиусом примерно 200 м, через которую идет выход радионуклидов и сопутствующих элементов на поверхность земли.

3. В пределах ослабленных зон вокруг боевых скважин, расположенных на низких склонах речных долин, наблюдается деградация многолетней мерзлоты, которая проявляется снижением удельного электрического сопротивления ( $< 100$  Ом·м), уменьшением его мощности и развитием термокарстового полигонально-холмистого «байджарахового» рельефа.

4. Естественные флюидопроницаемые геоструктуры: разломы, подземные водоносные горизонты, трещиноватые контактные зоны кимберлитов и траппов являются проводниками для переноса радионуклидов по системе «полость взрыва – вмещающая геологическая среда --- поверхность земли».

5. С помощью зондирования методом переходных процессов выявлены локальные поднятия напорных подземных рассолов по ослабленным зонам вокруг боевой скважины – на 260–300 м и по зоне разлома – на 100–300 м.

6. В местах выхода радиоактивных подземных флюидов на поверхность земли в донных отложениях и поверхностных водах повышаются: а) активности техногенных радионуклидов:  $^3\text{H}$  – в 2-34 раза (до 170 Бк/л),  $^{90}\text{Sr}$  – в 2-16 (до 2 Бк/л в воде),  $^{239+240}\text{Pu}$  – в 10-25 (до 0.26 Бк/л) выше регионального фонового уровня; б) концентрации лантаноидов, Y, Co, Be и других редких металлов в несколько раз по сравнению с местным фоновым уровнем; кроме того снижается изотопное отношение  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  до 126.80 (вместо естественного 138). В подземных рассолах, загрязненных радионуклидами, активность трития достигает 146 Бк/л,  $^{90}\text{Sr}$  – 5.1 Бк/л,  $^{239+240}\text{Pu}$  – 0.2 Бк/л,  $^{238}\text{Pu}$  – 0.2 Бк/л.

Вместе с тем, как правило, активности техногенных радионуклидов в целом низкие и уровни вмешательства, установленные нормами радиационной безопасности, не достигаются.

7. На площадках ПЯВ в пределах ослабленной зоны вокруг боевых скважин выявлены соленые хлоридные поверхностные воды (с минерализацией, как правило, выше 1 г/л) в отличие от пресных гидрокарбонатных, гидрокарбонатно-сульфатных поверхностных вод, характерных для этих районов.

8. В условиях элизионной водонапорной системы района ПЯВ «Кристалл» и «Кратон-3» радиоактивные флюиды двигаются к поверхности земли.

9. На Среднеботуобинском нефтегазоконденсатном месторождении в верхней части разреза характерна элизионная водонапорная система, а в нижней части (на глубине 1800-2100 м) она сменяется в аномально – депрессионную с дефицитом пластового давления от 2.5 до 5 МПа. В этих условиях радионуклиды переносятся как к поверхности земли, так и в нижезалегающие горизонты (в зависимости от взаиморасположения флюидопроницаемых геоструктур), что подтверждается геохимическими данными, в т.ч. выявлением техногенных радионуклидов в рассолах горизонта на 250 м ниже по разрезу в 6 км от объектов ПЯВ.

10. В условиях инфильтрационной водонапорной системы района ПЯВ «Кратон-4» преобладает латеральное движение подземных флюидов и слабый выход радионуклидов из зоны взрыва на поверхность земли.

11. Многослойные мощные пласты каменной соли, отличающиеся пластичностью, свойством залечивать старые и вновь возникающих трещины и разломы, в районе Средне-Ботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения не обеспечивает в полной мере изоляцию подземной активности объектов ПЯВ в геологической среде, поскольку наблюдается выход техногенных радионуклидов на поверхность земли.

12. Наблюдается взаимодействие геотехногенных систем ПЯВ с горнодобывающими геотехногенными системами при создании искусственных депрессионных воронок, к которым устремляются радиоактивные подземные флюиды из зон взрывов по системе «полость взрыва – вмещающая геологическая среда – карьер, буровая скважина – и далее возможно: поверхность земли».

13. Разработанные концептуальные геоэкологические модели ПЯВ «полость взрыва – вмещающая геологическая среда ---поверхность земли» количественно охарактеризованы физическими эмпирическими формулами, геофизическими параметрами удельного электрического сопротивления пород, геохимическими параметрами – количественным содержанием хлоридов  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , техногенных радионуклидов и сопутствующих элементов в поверхностных водах, донных отложениях и подземных рассолах.

На основе разработанной геоэкологической модели и ее верификации на целом ряде объектов, сделаны практические рекомендации по мониторингу объектов ПЯВ, периодичности замеров и густоты сети наблюдений. Дальнейшее совершенствование модели будет происходить при выявлении с ее помощью других аномалий различной природы.

### Список литературы

1. Абукова Л.А., Яковлев Ю.И. О захоронении радиоактивных и химических отходов в депрессионные водонапорные системы // Разведка и охрана недр. 2008. № 8. С. 82–84.
2. Абукова Л.А., Яковлев Ю.И., Абрамова О.П. Гидрогеологические приоритеты экологически безопасного освоения нефтегазового потенциала Восточной Сибири // Бюл.моск. о-ва испытателей природы. Отд. Геол. 2011. Т. 86. Вып. 3. С. 54–62.
3. Адамский В.Б., Клишин В., Смирнов Ю.Н. Советская программа подземных ядерных взрывов в мирных целях: надежды и результаты// Истрия советского атомного проекта: документы, воспоминания, исследования /Под ред. д.ф.-м.н. В.П. Визгина. С-Пб.: РХГИ, 2002. Вып. 2. С.185-225.
4. Адушкин В.В., Спивак А.А. Подземные взрывы. М.: Наука. 2007. 579 С.
5. Адушкин В.В., Спивак А.А. Изменение свойств горных пород и массивов при подземных ядерных взрывах // Физика горения и взрыва, 2004, т. 40, №6, с. 15-24.
6. Амакинская экспедиция: живая легенда // под. Ред.Звягинцева А.М., Серова В.П., Балакшина Г.Д.. М.: Изд-во «Стерх», 2008. 328 с.
7. Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Борисов В.Н., Шоуакар-Сташ О., Фрейп Ш., Шабо Ф., Кононов А.М. Изотопный состав (Н, О, Сl, Sr) подземных рассолов Сибирской платформы// Геология и геофизика. 2007. Т.48. №3. 291- 304 с.
8. Алексеев С.В. Криогидрогеологические системы Якутской алмазоносной провинции. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2009. 319 с.
9. Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Вахромеев А.Г., Владимиров А.Г., Волкова Н.И. Литиевые подземные воды Иркутской области и Западной Якутии// Химия в интереса устойчивого развития. 2012.Т.20. С.21-27.
10. Алексеева О.И., Балобаев В.Т., Григорьев М.Н., Макаров В.Н., Чжан Р.В., Шац М.М., Шепелев В.В. Природные и техногенные проблемы г. Якутска // Наука и образование. 2006. №4. С.94 – 98.
11. Андриюшин И.А., Илькаев Р.И., Михайлов В.Н., Чернышев А.К. Ядерные испытания СССР, т.4. Саров, 2000.
12. Анциферов А.С., Артеменко А.С., Зехова О.В., Кузмичев В.А., Мандельбаум С.М., Матусевич М.Г., Обухов В.Ф., Павленко В.В., Садовникова И.И., Скалон Н.Н., Шутов Г.Я. Нефтегазовая гидрогеология юга Сибирской платформы. М.: Недра, 1984. 192 с.
13. Анциферов А.С. Гидрогеология древнейших нефтегазоносных толщ Сибирской платформы. М.: Недра, 1989. 176 с.
14. Анциферов А.С. Ресурсы уникальных хлоридных кальциевых рассолов Сибирской платформы и проблемы их промышленного освоения // Разведка и охрана недр. 2004. № 8– 9. С. 30–32.
15. Арбузов С.И., Рихванов Л.П. Геохимия радиоактивных элементов. Томск: Изд-во ТПУ, 2011. 304 с.
16. Аргунова Т.В., Терентьев А.С., Тихонов И.О., Артамонова С.Ю. Геохимические особенности поверхностных вод среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения // Разведка и охрана недр. 2012. № 7. С. 26-29.
17. Аргунова Т.В., Артамонова С.Ю. Геоэкология: геотехногенные системы мирных подземных ядерных взрывов в юго-западной Якутии // Инженерная экология. 2014. № 4 (118). С.27-47.
18. Артамонова С.Ю., Колмогоров Ю.П. Использование результатов РФА-СИ метода при оценке экологического состояния Алданского золотодобывающего района (Якутия)// Поверхность. – 2005. - №9. – С.16-20.
19. Артамонова С.Ю., Бондарева Л.Г., Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О. Геоэкологическая модель района мирного подземного ядерного взрыва Кристалл (Якутия) // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. - 2012. - № 2. - С. 143-158

20. Артамонова С.Ю. Радиоэкологическая обстановка в районе проведения мирного подземного взрыва "Кратон-3" в 1978 г. (Северо-Западная Якутия) // Химия в интересах устойчивого развития. - 2012. - Т. 20. - № 2. - С. 143-155
21. Артамонова С.Ю. Техногенные радионуклиды в природных водах районов мирных подземных ядерных взрывов «Кратон-3» и «Кратон-4» // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2013. № 5. С. 417-428.
22. Артамонова С.Ю., Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Мерзлотно-гидрогеологическое строение района мирного подземного ядерного взрыва «Кратон-3» (Якутия) по результатам электромагнитных зондирований // Геология и геофизика. 2013. Т.54. №5. С.722-736
23. Артамонова С.Ю., Разворотнева Л.И. Пути решения радиоэкологических проблем в районе мирных подземных ядерных взрывов на территории Якутии // Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. № 3. С. 162-171.
24. Афанасьев В.П. Миграционные свойства индикаторных минералов кимберлитов в связи с прогнозированием месторождений алмазов // Отечественная геология. 2014. - № 4. - С. 11-16.
25. Гайдук В.В. Вилюйская среднепалеозойская рифтовая система. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1988. - 26 с.
26. Балобаев В.Т., Девяткин В.Н. Мерзлотно-геотермические условия Западной Якутии в связи с ее нефтегазоносностью // Гидрогеология нефтегазоносных областей Сибирской платформы. Новосибирск: СНИИГГИМС, 1982. С.18-28.
27. Балобаев В.Т. Павлов А.В., Перльштейн З.Т. и др. Теплофизические исследования криолитозоны Сибири. Новосибирск: Наука, 1983. 216 с.
28. Балобаев В.Т. Термодинамическая неравновесность состояния криолитозоны и процессы формирования подземных бассейнов пресных вод // отчет НИР по гранту РФФИ 96-05-65035. 1998.
29. Бодунов Е.И., Белецкий В.Л., Фрадкин Г.С. Геология, гидрогеология и геохимия нефти и газа южного склона Анабарской антеклизы. Якутск: изд-во ЯФ СО АН СССР, 1986. - 176 с.
30. Бондарева Л.Г., Болсуновский А.Я., Трапезников А.В., Дегерменджи А.Г. Использование новой методики концентрирования трансурановых элементов в пробах воды р.Енисей. ДАН. 2008. Т.423. № 4. С.479-482.
31. Бондарева Л.Г., Помозова Н.В. Изучение влияния различных типов тушения на эффективность измерений трития в объектах окружающей среды// Журнал СФУ. Химия, 2009. Т. 2, № 1. С. 56–60.
32. Бондарева Л., Жижаев А., Болсуновский А. Использование масс-спектрометра «Agilent» в радиационно-химических исследованиях воды реки Енисей. 3-я Всероссийская конференция «Масс-спектрометрия и ее прикладные проблемы». Москва, 18–21 мая 2009 г. С. 106.
33. Бондарева Л.Г. Патент РФ № 2011149436 (РФ) от 07.12.2011 г. «Универсальное устройство для предварительной подготовки проб воды различного генезиса».
34. Брек Д. Цеолитовые молекулярные сита. М.: Мир, 1976, 781 с.
35. Бурцев И.С., Колодезникова Е.Н. Радиационная обстановка в алмазоносных районах Якутии. Якутск: ЯНИЦ СО РАН, 1997. 52 с.
36. Ванчугов В.А., Кожевников Н.О. Методика и результаты применения импульсной индуктивной электроразведки при изучении геоэлектрического строения Накынского кимберлитового поля (Западная Якутия) // Геология, поиски и разведка месторождений рудных полезных ископаемых. Сб. научн. трудов. Вып. 22. Иркутск: ИрГТУ, 1998, С. 164 –176.
37. Вахромеев А.Г., Данилов В.А., Карпов Ю.А., и др. Опыт формирования системы экологической безопасности при разведке и освоении высоконапорных рассолоносных

- горизонтов. (На примере Знаменского месторождения) // Разведка и охрана недр.- 2001.-№ 5.- с. 43-48.
38. Вахромеев А.Г. Поисковые гидрогеологические критерии локализации месторождений редкометалльных промышленных рассолов Сибирской платформы. Известия Сибирского отделения секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. Вып.7(33).- Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2008.- с 30-41.
  39. Вахромеев А.Г. Геодинамическая модель формирования аномально-высоких давлений флюидов в разрезе осадочного чехла Сибирской платформы. //Известия Отд. наук о Земле и природных ресурсов АН РБ. Геология.-2008.- № 12. -с. 39-51.
  40. Вахромеев Г.С., Кожевников Н.О. Методика нестационарных электромагнитных зондирований в рудной электроразведке. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1988. – 224с.
  41. Василенко В.Б., Зинчук Н.Н., Кузнецова Л.Г., Минин В.А., Холодова Л.Д. Средние составы кимберлитовых тел Вилуйской субпровинции Якутии как основа для формационной идентификации кимберлитов// Вестник ВГУ, серия: геология. -2006. - №2. - С.126-140.
  42. Вдовыкин Г.П. Итого применения подземных ядерных взрывов при разработке нефтяных месторождений // Техника и технология. 2010. № 2. С. 63 – 66.
  43. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах// – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – 237 с.
  44. Вожов В.И. Гидрогеологические условия месторождений нефти и газа Сибирской платформы. М.: Недра, 1987. 204 с.
  45. Гаджиев И.М., Курачев В.М., Рагим-Заде Ф.К.и др. Экология и рекультивация техногенных ландшафтов. Новосибирск: Наука, 1992. 305 с.
  46. Гайдук В.В. Вилуйская среднепалеозойская рифтовая система. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1988. 128 с.
  47. Геворкян С.Г., Голубов Б.Н. О деформациях полостей подземных ядерных взрывов в районе Астраханского газоконденсатного месторождения (АГКМ) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 1998. № 2. С. 17–37.
  48. Геденов А.Д., Кулешова И.Н., Бакушкина Л.П. и др. Радиационное загрязнение территории Республики Саха (Якутия): проблемы радиационной безопасности. Якутск, 1993. С. 214-232.
  49. Геденов А.Д. Оценка уровней радиоактивного загрязнения объектов окружающей среды на объектах «Кристалл» и «Кратон-3» в Республике Саха (Якутия): отчет НИР по заказу Минприроды РС(Я). Санкт-Петербург, 2003, 40 с.
  50. Геденов А.Д., Булатенков Ю.В., Шкроев В.Ю. Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия): Мат-лы 2-й республиканской научно-практической конференции. Якутск: ЯФ ГУ «Изд-во СО РАН», 2004, с.168-180.
  51. Геология нефти и газа Сибирской платформы/ коллект.моногр. Анциферов А.С., Бакин В.Е., Варламов И.П. и др. Под ред. А.Э. Конторовича, В.С. Суркова, А.А. Трофимука. М.: Недра, 1981. 552 с.
  52. Геология, гидрогеология и геохимия нефти и газа южного склона Анабарской антеклизы // под ред. Ковальского В.В., Биланенко В.А. Якутск: изд-во ЯФ СО АН СССР, 1986. 176 с.
  53. Голубов Б.Н. Последствия техногенной дестабилизации недр Астраханского газоконденсатного месторождения в зоне подземных ядерных взрывов // Геоэкология. 1994. № 4. С. 25–42.
  54. Голубов Б.Н., Сапожников Ю.А., Горальчук А.В. Миграция радионуклидов из полости подземного термоядерного взрыва «Кристалл» в алмазодобывающий карьер «Удачный»// Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия): Материалы II Республиканской научно-практической конференции. Якутск: ЯФ ГУ «Изд-во СО РАН», 2004. С. 182-192.

55. Голубов Б.Н. Размышление над удивительной информацией «о геологических, экологических и политических аспектах хранения и захоронения ядерных материалов»// *Пространство и время*. 2012 №2(8). 224-229 с.
56. Голубов Б.Н. Активация соляного карста и угорза обводнения подземного хранилища радиоактивных отходов Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) , спроволцированные подземных ядерных взрывом в штате Нью-Мексико, США// *Альманах Пространство и Время*. 2013. Т.4. Вып.1. 18с. <http://cyberleninka.ru/article/n/aktivizatsiya-solyanogo-karsta-i-ugroza-obvodneniya-podzemnogo-hranilisha-radioaktivnyh-othodov-waste-isolation-pilot-plant-wipp>
57. Гольчикова Н.Н. Основные геоэкологические проблемы зоны воздействия Астраханского газового комплекса // *Вестник АГТУ*. 2004. № 4 (23). С.128–132.
58. Горбунова Э.М., Спивак А.А. Изменение режима подземных вод при подземных ядерных взрывах // *Геоэкология*, 1997, №6, С. 29 – 37.
59. Горбунова Э.М. Влияние структурно-тектонических условий на распределение афтершоков после крупномасштабного техногенного воздействия // *Геоэкология*. 2007. № 5. С. 421–428.
60. Григорьев М.Н., Куницкий В.В., Чжан Р.В., Шепелев В.В. Об изменении геоэкологических, ландшафтных и гидрологических условий в арктической зоне Восточной Сибири в связи с потеплением климата // *География и природные ресурсы*. 2009. № 2. С.5- 11.
61. Данилов В.А. Радиометрическая съемка на объектах подземных ядерных взрывов «Нева-2», «Нева-3» и «Скважина №101» в Мирнинском районе РС(Я) // *Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия): Матер. II Республ. научн.-практ. конф.* Якутск: ЯФ ГУ Изд-во СО РАН, 2004. С. 262–268.
62. Девяткин В.Н., Шамшурин В.Ю. Геотермические условия кимберлитовой трубки Юбилейная // *Мерзлотные исследования в осваиваемых районах СССР*. Новосибирск: Наука, 1984. 156 с.
63. Добрынин В.М., Вендельштейн Б.Ю., Кожевников Д.А. Петрофизика: Учеб. для вузов. – М.: Недра, 1991. – 368с. ISBN 5-247-01043-4.
64. Дроздов А.В. Структурно-тектонические критерии оценки приемистости массивов для захоронения сточных вод алмазодобывающих предприятий в криолитозоне Западной Якутии // *Криосфера Земли*, 2006, т. X, № 2, с. 27–45.
65. Дроздов А.В., Иост Н.А., Лобанов В.В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. Иркутск: Изд-во ИТУ, 2008. 508 с.
66. Дубасов Ю.В., Трифонов В.А., Смирнова Е.А., Аршанский С.М. Современное радиационное состояние территории проведения мирных ядерных взрывов в Оренбургской области // *Радиохимия*. 2005. Т. 47. № 6. С.556–563.
67. Дубасов Ю.В. 1997. Комплексные лабораторные исследования объектов подземных ядерных взрывов «Кратон-3» и «Кристалл». Научный отчет, 08.09.1997. Институт радия им. В.Г. Хлопина, Санкт-Петербург, 1997, 34 с.
68. Еловская Еловская Л.Г., Петрова Е.И., Тетерина Л.В. Почвы Северной Якутии. Новосибирск: Наука, 1979. 304 с.
69. Емлин Э.Ф. Техногенез - новейший этап геологической истории рудных месторождений Урала // *Известия Вузов, Горный журнал*. 1993. №5. С.43-126.
70. Жарков М.А. Условия формирования соленосных отложений Сибири и перспективы их калиенности // *Состояние и задачи литологии*. Т.III. М.: Наука, 1970. С. 111-123.
71. Журавская А.Н., Артамонова С.Ю. Повышенный естественный радиационный фон и растение. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2014. 153 с.
72. Зелинская Е.В., Воронина Е.Ю. Теоретические аспекты использования гидроминерального сырья. Изд-во «Академия естествознания», 2009 г. ISBN 978-5-91327-047-4

73. Иванов А. А., Воронова М. Л. Галогенные формации (минеральный состав, типы и условия образования; методы поисков и разведки месторождений минеральных солей). «Недра», 1972 г. 328 с.
74. Из поколения победителей. Виктор Борисович Адамский. Избранные труды, воспоминания. Саров, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2008. 636 с.
75. Израэль Ю.А., Вакуловский С. М., Ветров В. А., Ровинский Ф. Я. Чернобыль: Радиоактивное загрязнение природных сред. — Л.: Гидрометеоздат, 1990. — 298 с. — 1500 экз. — ISBN 5-289-00799-6
76. Имаев В.С. , Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сейсмодислокации в сейсмических поясах Якутии // Геотектоника.1995. №1. С.79-92.
77. Ильков А.Т., Иост Н.А., Веселов И.В. и др. Отчет о результатах проведенных работ по поиску и оценке структур для закачки дренажных вод рудника «Удачный» в 2011 - 2012 гг. Мирный, 2012. 258 с.
78. Карбонаты. Минералогия и химия. Подл ред.Р.Дж.Ридера. М.:Мир, 1987.494 с.
79. Карцев А.А., Матусевич В.М., Яковлев Ю.И. Связь аномально низких пластовых давлений с рифтогенными зонами Сибири // Геотектоника. 1989. № 2. С. 86–88.
80. Касаткин В.В., Ильичев В.А., Мясников К.В., Клишин В.И., Мамонов Б.П. Состояние радиационной безопасности объектов мирных ядерных взрывов на территории РС(Я) // Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия): Материалы II республиканской научно-практической конференции. – Якутск: ЯФГУ «Изд-во СО РАН», 2004 – С. 82 – 100.
81. Касаткин В.В., Ильичев В.А., Латышев В.Е., Мамонов В.П. Объекты ядерных взрывов в Якутии: реабилитация и современное состояние // Безопасность окружающей среды. 2009. № 3. С. 100–103.
82. Качурин С.П. Термокарст на территории СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1961.291 с.
83. Кауфман А.А., Морозова Г.М. Теоретические основы метода зондирования становлением поля в ближней зоне. – Новосибирск: Наука, 1970. 123 с.
84. Кимберлиты и карбонатиты. Сб. статей // под ред. Василенко В.Б. Новосибирск: Параллель.2013.745 с.
85. Киселев А.Е. Минеральные ассоциации мезозойских и третичных отложений Приверхоянского прогиба и Вилюйской синеклизы //Петрография и минералогия осадочных формаций Якутии . – Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1972. 146-163 с.
86. Киселев В.В., Хохолов Ю.А., Каймонов М.В. Прогноз температурного режима поверхностного курганного могильника твердых радиоактивных отходов в условиях глобального потепления климата. Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия): Материалы II республиканской научно-практической конференции. – Якутск: ЯФГУ «Изд-во СО РАН», 2004. С.107 -114.
87. Киселев В.В., Хохолов Ю.А., Каймонов М.В. Возведение защитных саркофагов полууглубленных могильников твердых радиоактивных отходов в криолитозоне // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2010. № 3. С. 255-260.
88. Климовский И.В., Устинова З.Г. Об особенностях температурного режима многолетнемерзлых пород района кимберлитовой трубки Удачная // Многолетнемерзлые породы и сопутствующие им явления по территории Якутской АССР. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. С.96-106.
89. Климовский И.В., Готовцев С.П. Криолитозона Якутской алмазоносной провинции. – Новосибирск: ВО Наука, 1994. – 168с.
90. Климовский И.В., Готовцев С.П., Шепелев В.В. Гидрогеокриологические условия полигона подземного захоронения дренажных вод трубки «Удачная» // Криосфера Земли, 2002, т. VI, №3, с. 45 – 50.
91. Кобранова В.Н. Петрофизика. Учебник для вузов. – М.: Недра, 1986. – 392 с.

92. Кобылкина В.М. Отчет о результатах работ по теме «Оценка возможной миграции радионуклидов с подземными водами из зоны промышленного ядерного взрыва на объекте «Кристалл» Мирнинского района. пос. Айхал, 2005. 46 с.
93. Ковалев В.К. Оконтуривание участка загрязнения искусственными радионуклидами по значениям МЭД гамма-излучения с использованием спутникового навигатора для привязки наблюдений и дальнейшего мониторинга загрязнения на объекте «Кратон-3»: отчет Министерства охраны природы Республики Саха (Якутия) / Отв. исполнитель В.К. Ковалев. Якутск, 2002. 27 с.
94. Ковалев В.К., Ложников Б.Н. Опытные-методические работы по измерению плотности потока радона близ ПЯВ на Среднеботуобинском НГКМ) // Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия): Матер. II Республ. научн.-практ. конф. Якутск: ЯФ ГУ Изд-во СО РАН, 2004. С. 274–283.
95. Ковалев В.К., Ложников Б.Н. Опытные-методические работы по измерению плотности потока радона близ ПЯВ на Среднеботуобинском НГКМ // Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия): Мат. II Республ. научн.-практич. конф. Якутск: ЯФ ГУ Изд-во СО РАН, 2004. С.274-283
96. Ковалев В.П., Мельгунов С.В., Пузанков Ю.М., Раевский В.П. Предотвращение неуправляемого распространения радионуклидов в окружающую среду. Геохимические барьеры на смектитовой основе. Новосибирск, Изд-во ОИГГМ СО РАН. Вып. 833, 1996, 164 с.
97. Ковальский В.В. Геохимическая экология. М.: Наука, 1974. - 420 с.
98. Кожевников Н.О., Плотников А.Е. Оценка возможностей метода переходных процессов при изучении верхней части геологического разреза // Геофизика, 2004, № 6, С. 33–38.
99. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю., Артамонова С.Ю., Плотников А.Е. Геоэлектрический разрез в районе подземного ядерного взрыва "Кристалл" (Западная Якутия) по данным метода переходных процессов // Геол. и геофиз. - 2012. - Т. 53. - № 2. - С. 237-249
100. Колесникова А.А., Таскаева А.А., Криволицкий Д.А., Таскаев А.И. Состояние почвенной фауны вблизи эпицентра подземного ядерного взрыва на Северном Урале // Экология. 2005. №3. С.171-179.
101. Кондратенко Е.В., Казаков В.М., Ермолаев А.И. О ликвидации и консервации скважин // Нефть, газ и бизнес. 2011. № 5 (132). С. 17–21.
102. Конищев В.Н., Рогов В.В. Влияние криогенеза на сток растворенного вещества реками в криолитозоне //Криосфера земли. -2006. Т.10. №4. С.3-8.
103. Конищев В.Н., Рогов В.В. Влияние криогенеза на глинистые минералы //Криосфера земли. -2008. Т.12. №1. С.51-58.
- 104.
105. Конторович А.Э., Каширцев В.А., Москвин В.И., Бурштейн Л.М., Земская Т.И., Калмычков Г.В., Костырева Е.А., Хлыстов О.М. Нефтегазоносность отложений озера Байкал // Геология и геофизика. 2007. Т. 48 (12). С. 1346—1356.
106. Костарев С.М., Яковлев Ю.А. Геоэкологическое обоснование границ специальных горных отводов для участков подземных ядерных взрывов в районах нефтедобычи // Нефтяное хозяйство. 2009. № 4. С. 43–46.
107. Кривоухатский А.С. Радиохимия ядерных взрывов // Радиохимия. 1982. № 3. С. 277–286.
108. Крышев И.И., Сазыкина Т.Г. Радиоэкологическая обстановка в биосфере и реальность ее оптимизации// [http://biosphere21century.ru/media/articles/pdf\\_178.pdf](http://biosphere21century.ru/media/articles/pdf_178.pdf) , 2009. С. 203–212.
109. Кузнецов Ю.В., Щебетовский В.Н., Трусов А.Г. Основы очистки воды от радиоактивных загрязнений. М.: Атомиздат, 1974, с.58-82.

110. Лаверов Н.П., Омельяненко Б.И., Величкин В.И. Геологические аспекты захоронения радиоактивных отходов // *Геоэкология*. 1994. № 6. С. 3–20.
111. Лаверов Н.П., Величкин В.И., Омельяненко Б.И., Юдинцев С.В. Поведение актинидов в условиях долгосрочного хранения и захоронения отработанного ядерного топлива // *Геология рудных месторождений*. 2003. Т. 45. № 1. С.3–23.
112. Левашов К.К. Среднепалеозойская рифтовая система востока Сибирской платформы // *Советская геология*. 1975. № 10. С. 49—58.
113. Летникова Е.Ф. Геохимическая специфика карбонатных отложений различных геодинамических обстановок северо-восточного сегмента Палеоазиатского океана // *Литосфера*. 2005. С.70-81.
114. Лопатин В.В., Смирнов В.В., Клишин В.И. и др., ТЭО по реабилитации загрязненной территории объекта «Кристалл» Республики Саха (Якутия). Т.1. ВНИПиПТ. М., 2000. 52 с. (Фонды Министерства охраны природы РС(Я)).
115. Лопатин В.В., Смирнов В.В., Клишин В.И. и др., Рабочий проект. Реабилитация загрязненной территории объекта «Кристалл» Республики Саха (Якутия). Т.1. ВНИПиПТ. М., 2001. 129 с. (Фонды Министерства охраны природы РС(Я)).
116. Матвеев Б.К. Интерпретация электромагнитных зондирований. – М.: Недра, 1974. – 232 с.
117. Матущенко А., Гильманов Д. Семипалатинский полигон: мирные ядерные взрывы (1965—1971 гг.) // *Бюлл. ПАО*. 2002. № 6. С. 60-64.
118. Медведев В.И., Коршунов Л.Г., Коваленко В.В., Маторова Н.И., Карчевский А.Н., Осипова Л.П., Богданов В.А. Радиационное воздействие подземного ядерного взрыва шифр «Рифт-3» на территорию и население Осинского района Иркутской области // *Сибирский экологический журнал*. 2005. № 6. С. 1073 -1078.
119. Мельгунов М.С., Гавшин В.М., Сухоруков Ф.В., Калюгин И.А., Бобров В.А., Klerkx J. Аномалии радиоактивности на южном побережье озера Иссык-Куль (Кыргыстан)// *Химия в интересах устойчивого развития*. 2003. Т.11. №6. С.869-880.
120. Мельников В.П., Оберман Н.Г., Велижанина И.А., Давиденко Н.М. Воздействие подземных ядерных взрывов на природную среду Севера // *Геология и геофизика*. 2000. Т. 41. № 2. С. 280–291.
121. Мерзлотные ландшафты Якутии (Пояснительная записка к «Мерзлотно-ландшафтной карте Якутской АССР масштаба 1:2500000)/ Федоров.А.Н., Ботулу Т.А., Варламов С.П. и др. Новосибирск: ГУГК, 1989. 170 с.
122. Методика выполнения измерений массовых концентраций алюминия, бария, бора, железа, кобальта, марганца, меди, никеля, стронция, титана, хрома и цинка в пробах питьевых, природных и сточных вод методом ИСП спектрометрии. ПНД Ф 14.1:2:4.143-98. Москва: Государственный комитет РФ по охране окружающей среды, 1998а. (Издание 2004 г.) 25 с.
123. Методика выполнения измерений массовых концентраций металлов методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой в питьевой, природной и сточной водах и атмосферных осадках. ПНД Ф 14.1:2:4.135-98. Москва: Государственный комитет РФ по охране окружающей среды, 1998б. (Издание 2005 г.) 17 с.
124. Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами. Под ред. Н.Г. Зырина, С. Г.Малахова. М.: Гидрометеиздат, 1981, 109 с.
125. Микуленко К.И., Буйдылло И.В. Оценка возможного влияния подземных ядерных взрывов мирного назначения на радиоактивность подземных пород по данным гамма-каротажа на Среднеботуобинском месторождении // *Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия): Матер. II Республ. научн.-практ. конф.* Якутск: ЯФ ГУ Изд-во СО РАН, 2004. С. 268–274.

126. Микуленко К.И., Чомчоев А.И., Готовцев С.П. Геолого-географические условия проведения и последствия подземных ядерных взрывов на территории Республика Саха (Якутия). Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2006. 196 с.
127. Мирные ядерные взрывы: обеспечение общей и радиационной безопасности при их проведении / Рук. Логачев В.А. М.: ИздАТ, 2001. 512 с.
128. Мироненко М.В., Маликов Д.А., Куляко Ю.М., Мясоедов Б.Ф. Радиохимия, 2006, т.48, №1, с.63-67.
129. Миронова С.И. Техногенные сукцессионные системы растительности Якутии (на примере Западной и Южной Якутии), Новосибирск, Наука, 2000. – 151 с.
130. Мясников К.В., Родионов В.Н., Сизов И.А. и др. Анализ причин сокращения объемов подземных емкостей, созданных ядерными взрывами в массиве каменной соли на Астраханской газоконденсатной месторождении// Геоэкология. 1998. № 5. С. 16–29.
131. Некрасов И.А. Криолитозона Севера- Востока и юга Сибири и закономерности ее распространения. Якутск: Якутское книжное издательство. 1976. 248 с.
132. Нечаева Е.Г., Давыдова Н.Д., Щетников А.И. и др. Тренды ландшафтно-геохимических процессов в геосистемах юга Сибири / отв. ред. В. Снытко. – Новосибирск: Наука, 2004. 184 с.
133. Николаева И.В., Палесский С.В., Козьменко О.А., Аношин Г.Н. Определение редкоземельных и высокозарядных элементов в стандартных геологических образцах методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС)// Геохимия. 2008. №10. С.1085-1091.
134. Николаева И.В., Палесский С.В. Определение редких и рассеянных элементов в природных и техногенных объектах методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой // Литий России: Минерально-сырьевые ресурсы, инновационные технологии, экологическая безопасность: Материалы Всероссийского науч.-практ. совещ. с международным участием (г. Новосибирск, 24-26 мая 2011 г.). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. С. 164-167
135. Новгородов П.Г., Александров А.Р., Никашина В.С., Кац Э.М., Серова И.Б. Разработка технологии строительства защитного геохимического барьера на основе цеолита месторождения «Хонгуруу» на объекте ПЯВ «Кратон-3»: отчет Института проблем нефти и газа СО РАН по госзаказу №10 Министерства охраны природы Республики Саха (Якутия) / Отв. исполнитель П.Г. Новгородов. Якутск, 2008. 146 с.
136. Одум Ю. Основы экологии. – М.: Мир, 1975. – 740 с.
137. Орлов Д.С. Химия почв. М.: Изд-во МГУ, 1985, 376 с.
138. Орлов Д.С. Гуминовые вещества в биосфере. М., 1993, с. 6-27.
139. Осипов В. И. Геоэкология – междисциплинарная наука об экологических проблемах геосфер // Геоэкология. 1993. № 1. С. 4–17.
140. Основные черты геохимии урана// под ред. Акад.А.П. Виноградова. Томск: STT? 2013/ 374 с/
141. Пантелеев В.Г., Соболев С.В., Огарков А.А. Интенсификация промораживания грунтовых гидросооружений естественным холодом// Гидротехническое строительство. - 1991. -№11. С.18-20.
142. Перельман А.И. Геохимия эпигенетических процессов. М.: Недра, 1965. – 272 с.
143. Перельман А.И. Биокосные системы земли. М.: Наука, 1977. – 160 с.
144. Пермяков П.П., Аммосов А.П. Математическое моделирование техногенного загрязнения в криолитозоне. Новосибирск: Наука. 2003. 224 с.
145. Пиннекер Е.В. Проблемы региональной гидрогеологии (Закономерности распространения и формирования подземных вод). М.:Наука, 1977. – 196 с.
146. Пиннекер Е.В., Шварцев С.Л. Изотопы стронция в рассолах Сибирской платформы // ДАН. 1996. Т.351. №1. С.109-111.

147. Пиннекер Е.В., Шенькман Б.М. Техногенное изменение гидрогеохимической обстановки в Ангаро-Ленском артезианском бассейне // Геоэкология. 1995. № 1. С. 110–122.
148. Постановление Правительства РФ от 25.07.2012 г. «О проведении первичной регистрации радиоактивных отходов» (вместе с Правилами проведения первичной регистрации радиоактивных отходов»). 5 с.
149. Постановление Правительства РФ №1069 от 19.10.2012 г. «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов». 8 с.
150. Птицын А.Б. Геохимические основы геотехнологии металлов в условиях мерзлоты. Новосибирск: Наука, СО, 1992. - 120 с.
151. Радиационная обстановка и обеспечение радиационной безопасности участников работ и населения при проведении эксперимента «Кратон-3». Материалы Министерства охраны природы РС(Я). Якутск, 2008 .89 с.
152. Радионуклидное загрязнение окружающей среды и здоровье населения / Под. ред. И.Я. Василенко, Л.А. Булдакова. М.: ОАО «Издательство «Медицина» , 2004. – 400 с.
153. Радченко А.В., Матусевич В.М., Курчиков А.Р. Динамически напряженные зоны литосферы в решении проблем геологии нефти и газа. Тюмень: Изд-во ТюмГНГУ, 2011. 255 с.
154. Разворотнева Л. И., Л.И., Гилянская Л. Г., Маркович Т. И. Влияние процессов замораживания–оттаивания на устойчивость природных геохимических барьеров при сорбции на них радионуклидов// Вестник ОНЗ РАН. Т. 3. № NZ6081, doi:10.2205/2011NZ000211,2011.http://onznews.wdcb.ru/publications/v03/asempg11ru/2011NZ000211R.pdf
155. Рамзаев В.П., Репин В.С., Храмцов Е.В. Мирные ядерные взрывы: проблемы и пути обеспечения радиационной безопасности населения // Радиационная гигиена. Т.2. №2. 2009. С. 27 – 33.
156. Репина Л.Н., Жаркова Т.М. Об условиях обитания трилобитов в раннекембрийском бассейне Сибири // Среда и жизнь в геологическом прошлом (палеоэкологические проблемы). Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1974. С.100-108.
157. Рихванов Л.П. Радиоактивные элементы в окружающей среде и проблемы радиоэкологии: учебное пособие. Томск: STT, 2009. 430 с.
158. Рихванов Л.П. Радиоактивность и радиоактивные элементы в биосфере и возможные экологические последствия//Мат. IV Международ. Конференции «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. – Томск, 2013 . – 444 – 447 с.
159. Романовский Н.Н. Подземные воды криолитозоны. М.: Изд-во МГУ, 1983. 232 с.
160. Руденко В.В., Шабуров М.В., Чехунов Е.В. Учебно-исследовательский программный комплекс MASTER по физике сплошных сред // Труды Региональной конференции по научному программному обеспечению. Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического университета, 2006. С.121-124.
161. Румынин В.Г., Синдаловский Л.Н., Захарова Е.В., Каймин Е.П., Зубков А.А. Экспериментальные и модельные исследования коллоидного транспорта радионуклидов в водоносных горизонтах (применительно к условиям глубинного захоронения жидких РАО на полигоне Сибирского химического комбината): 2. модельный анализ миграционного процесса// Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2007. №4. С.310-323.
162. Рябцев А.Д., Вахромеев А.Г., Коцупало Н.П. Высокоминерализованные рассолы–перспективное сырье для получения брома и бромпродуктов. Физико-технические

- проблемы разработки полезных ископаемых, 2003.- №5 - С.1-16. (Journal of Mining Science, USA, перевод полного текста статьи)
163. СанПиН 2.6.1.2523–09. Нормы радиационной безопасности (НРБ 99/ 2009). М., 2009. 116 с.
  164. СП 11-105-97. «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть VI. «Правила производства геофизических исследований» / Госстрой России. М.: Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИИС) Госстроя России, 2004.
  165. Сауков А.А. Геохимические очерки. – М.: Наука, 1976. – 555 с.
  166. Семенов В.П., Железняк М.Н. Геотермические условия Вилкойской синеклизы // Криосфера земли. 2013. Т.17. № 4. С.3-10.
  167. Сергеев Е.М. Инженерная геология, 2-е изд. М.: изд-во МГУ, 1982. 248 с.
  168. Силаев В.И., Киселева Д.В., Филиппов В.Н. Таллий в мантийных производных: новый геохимический индикатор алмазоносных кимберлитов? // Вестник. 2006. М.8. С.2-8.
  169. Смирнов В.И., Федоров Б.Н., Манукьян В.А., Шафаренко Е.М. Горно-геологические процессы в подземных полостях на Астраханском газоконденсатном месторождении // Геоэкология. 2000. №3. С. 207–215.
  170. Собакин П.И. Миграция <sup>137</sup>Cs в мерзлотных почвах Якутии // Радиационная биология. Радиоэкология. 2010.Т.50. №5. С. 590-598.
  171. Старосельцев В.С. Проблема выделения рифтогенных прогибов – перспективных тектонических элементов активного нефтегазообразования // Геология и геофизика. - 2009. Т.50. №4. С.475-483.
  172. Степанов В.Е., Ушницкий В.Е., Яковлева В.Д. О современных уровнях содержания искусственных радионуклидов в окрестностях подземного ядерного взрыва «Кристалл»// Сб. науч. тр. Научная сессия МИФИ-2003. Т.5. Медицинская физика, биофизика. Геофизика. Экология. Теоретическая физика. М.: МИФИ, 2003. 122-124.
  173. Степанов В.Е., Десяткин Р.В., Яковлева В.Д. и др. Содержание искусственных радионуклидов в почвенно-растительном покрове в Центральной Якутии и окрестностях ПЯВ «Кристалл» и «Кратон» // Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия): Материалы II Республиканской научно-практической конференции. Якутск: ЯФ ГУ «Изд-во СО РАН», 2004. С. 215-223.
  174. Степанов В.Е., Дьячковский Е.Е., Осипов В.Ю., Щукина Е.А., Наумова К.А., Филатов –Рожин В.М. Исследование возможности дальней миграции искусственных радионуклидов из полости подземного ядерного взрыва «Кристалл» в карьерв алмазной трубки «Удачная» в Мирнинском районе Якутии// Сб. тр. Международ. Науч. конф. МФТИ-2013. М.: МФТИ, 2013.10с. <http://mipt.ru/dmcp/upload/c08/Stepanov-arphobjcuiz.pdf>
  175. Стогний В.В., Васильев С.П., Невольских С.Г. Изменения геофизических полей при подземных ядерных взрывах в Западной Якутии // Геофизические исследования в Якутии. -Якутск: ЯГУ, 1998. С.153-165.
  176. Стогний В.В. Импульсная индуктивная электроразведка таликов криолитозоны Центральной Якутии. Якутск, 2003. - 124 с.
  177. Стогний В.В. Локальный геофизический мониторинг мест проведения подземных ядерных взрывов в Якутии // Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия): Материалы II республиканской научно-практической конференции. – Якутск: ЯФГУ «Изд-во СО РАН», 2004 – С. 252 – 260.
  178. Страховенко В.Д., Щербов Б.Л., Маликова И.Н. Распределение радиоцезия и редкоземельных элементов в донных отложениях озер разных природно-ландшафтных зон Сибири // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. - 2008. - № 4 (8). - С. 152-158.

179. Сухоруков Ф.В., Дегерменджи А.Г., Белолипецкий В.М. и др. Закономерности распределения и миграции радионуклидов в долине реки Енисей. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2004. 286 с.
180. Сухоруков Ф.В., Щербов Б.Л., Страховенко В.Д., Смоляков Б.С., Кириллина В.И., Прокопьева Ю.Н. Экологическая обстановка (радионуклиды и тяжелые металлы) территории Нюрбинского и Усть-Алдансокогулулов. Якутск, 2001. 155 с.
181. Тапхаева А.Э. Радиационное воздействие на здоровье населения Осинского района Иркутской области // Вестник Бурятского государственного университета. 2009. №4. С.57-60.
182. Тапхаева А.Э., Тайсаев Т.Г., Рихванов Л.П., Языков Е.Г., Барановская Н.В. Геохимический анализ подземных вод и биосред в долинах рек Обусы, Осы и Иды // Вестник Бурятского государственного университета. 2011. №4. С.11-20.
183. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. 571 с.
184. Титаева Н.А. Ядерная геохимия: учебник. М.: Изд-во МГУ, 2000. 336 с.
185. Устинова З.Г. К гидрохимии кимберлитов трубок Якутии // Вопросы геохимии подземных вод. М.: Недра, 1964. С. 237- 252.
186. Ушницкий В.Е. Радиоэкологическое (мониторинговое) обследование состояния промплощадок МПЯВ «Кратон-3», «Кристалл» (с оформлением радиоэкологических паспортов): отчет Министерства охраны природы Республики Саха (Якутия) / Отв. исполнитель В.Е. Ушницкий. Якутск, 2004. 94 с.
187. Фанерозой Сибири. Т.1. Венд, палеозой/ ред. акад. А.Л. Яншин. Новосибирск: Наука, 1984. 192 с.
188. Федоров А.Н., Константинов П.Я. Реакция мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии на современные изменения климата и антропогенные воздействия // География и природные ресурсы. 2009. – №2. – С. 56-62. С.
189. Федоров А.Н., Мачимура Т., Герасимов Е.Ю., Петров М.И., Константинов П.Я., Ивахана Г., Кушида К., Такакай Ф., Десяткин А., Сайто Х., Хаясака Х., Фукуда М. Влияние пожаров на мерзлотные ландшафты в Центральной Якутии // Наука и образование . 2008. - №4. С.64-67.
190. Федосеева В.И. Физико-химические закономерности миграции химических элементов в мерзлых грунтах снега. Якутск, 2003. - 140 с.
191. ФЗ РФ №190 от 11.07.2011 г. ОБ ОБРАЩЕНИИ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ И О ВНЕСЕНИИ ИЗМЕНЕНИЙ В ОТДЕЛЬНЫЕ ЗАКОНОДАТЕЛЬНЫЕ АКТЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ. 25 с.
192. Химия и катализ на цеолитах /Под ред. Дж. Рабо. М.: Мир, 1980, т. 1, 506 с.; т. 2, 422 с.
193. Цхадая Н.Д., Голубев Ю.Д., Голубева И.А. Экологические последствия подземных ядерных взрывов (на объектах нефтегазового комплекса)// Нефть, газ и бизнес. 2008. № 5 -6 (99). С.62-69
194. Чевычелов А.П., Собакин П.И. Почвенно-геохимические основы радиационной безопасности в районах проведения аварийных подземных ядерных взрывов «Кристалл» и «Кратон-3»// Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия): Мат. II Республ. научн.-практич. конф. Якутск: ЯФ ГУ Изд-во СО РАН, 2004. С. 204-215.
195. Чевычелов А.П., Собакин П.И., Молчанова И.В. Радиоактивное загрязнение мерзлотных почв <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr – продуктами аварийного подземного ядерного взрыва // Почвоведение. 2006. №12. С.1512-1519.
196. Челищев Н.Ф. Цеолиты - новый тип минерального сырья. М.: Недра, 1987, 176 с.
197. Чуйков Ю.С., Досмухамедова Г.Г. Объект «Вега» и последствия ядерных взрывов в мирных целях// Астраханский вестник экологического образования. 2006. №1-2 (8-9). 46-71 с.

198. Шатский Н.С. (отв. Ред.) Закономерности размещения полезных ископаемых. М.:Изд-во АН СССР, 1958. 532 с.
199. Шахиджанов Ю.С., Кирихина Н.Н. Геоэкологические последствия подземных ядерных взрывов при разработке газовых месторождений в России и США // Разведка и охрана недр. 2005. № 7. С. 35–40.
200. Шварцев С.Л. Источники кальция, стронция и бария крепких и сверхкрепких рассолов хлоридно-кальциевого типа (в связи с формированием последних)// Геология и геофизика. 1973. №6. С.23-30.
201. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М.: Недра, 1998. - 366 с.
202. Шварцев С.Л. Новые горизонты гидрогеологии // Разведка и охрана недр. 2010. № 11. С. 70-72.
203. Шепелев В.В., Шац М.М. Геоэкологические проблемы обводнения и подтопления территории г. Якутска // Наука и образование. – 2000. -№3. - С.68-71.
204. Шепелев В.В., Бойцов А.В., Оберман Н.Г., Петченко М.Ф., Анисимова Н.П., Какунов Н.Б., Максимова Е.Н., Завадский Ф.Р., Санникова А.В. Мониторинг подземных вод. Якутск: изд-во ИМЗ СО РАН. 2002. – 172 с.
205. Яблоков А.В. Миф о безопасности и эффективности мирных подземных ядерных взрывов. М.: ЦЭПР, 2003. 176 с.
206. Яблоков А.В. «Чудище обло, озорно, огромно, стозевно и лайя...»: Рассказ эколога об атомной индустрии. – Иркутск: «Байкальская экологическая волна», 2009. – 132 с. ISBN 978-5-91344-43-0.
207. Ягнышев Б.С., Ягнышева Т.А., Зинчук М.Н., Легостаева Я.Б. Экология Западной Якутии (геохимия геосистем: состояние и проблемы). Якутск, Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2005. 432 с.
208. Яковлев Ю.И., Семашев Р.Г. Гидродинамическое обоснование выделения водонапорных систем депрессионного типа // Геология нефти и газа. 1982. № 9. С. 23–27.
209. Яковлева В.Д., Степанов В.Е., Петрова Е.В. Радиозоологическое исследование окрестностей подземного ядерного взрыва «Кристалл» // АНРИ, 2002, №3. С.30-34.
210. Япаскурт О.В. Литогенез и полезные ископаемые миогеосинклиналей. М.: Недра, 1992. 224 с.
211. S. Yu Artamonova, Yu. P. Kolmogorov. Synchrotron X-Ray fluorescent analysis application in biogeochemical investigations in Yakutia // (NIMA 49372) Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A: - 2009. - #603. - Issues 1-2. - 128-130 p.
212. Artamonova S., Antonov E., Kojevnikov N. Geocological model of "Crystal" peaceful underground nuclear explosion (Siberian plate) // SGEM 2011: 11th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (20-25 June, 2011 Bulgaria): Conference proceedings. - Albena, 2011. - № III. - P. 381-388
213. [Artamonova S.Yu.](#), [Ushnitskiy V.E.](#), [Antonov E.Yu.](#), [Kojevnikov N.O.](#) Geotechnogenic system of Crystall peaceful underground nuclear explosion // Вестник НЯЦ РК: научн.-техн. журнал Национального ядерного центра Республики Казахстан. 2012. № 2(50). P. 115-120.
214. Baryshev V., Kulipanov G., Skrinsky A. X-ray fluorescent elemental analysis// Handbook on Synchrotron Radiation, Vol.3, edited by G. Brown and D.E. Moncton . – Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1991. – P. 641 – 688.
215. Bolsunovsky A.Ya., Bondareva L.G. Tritium in surface waters of the Yenisei River // J. Environ.Radioactivity, 2003. V. 66. Issue 3. P.285-294.
216. Bondareva L., Zhizhaev A. Radiation –Chemical Situation of the waters of the Middle Reach of the River Yanisei (Russian Federation)// Journal of Environmental Science and Engineering. 2010. V.4. No.9. P.1-11.

217. Catalog of Worldwide Nuclear Testing I.A.Andrushin, V.N.Mikhailov, A.K. Chernyshev et al N.Y. 1999.
218. Child D.P., Hotchkis M.A.C. Plutonium and uranium contamination in soils from former nuclear weapon test sites in Australia // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2013. B 294. P.642-646.
219. Cooper C., Ming Ye, Chapman J. Tritium Transport at the Rulison Site, a Nuclear-Stimulated Low-Permeability Natural Gas Reservoir// U.S. Department Energy. 2007. № 45224. 114 p. <http://www.dri.edu/Publications/45224.pdf>
220. Danesi P.R., Moreno J., Makarewicz M., Louvat D. Residual radionuclide concentrations and estimated doses at the former French nuclear weapons test sites in Algeria
221. Gedeonov, A.D., Petrov, E.R., Alexeev, V.G., Kuleshova, I.N., Savopulo, M.L, Burtsev, I.S., Shkroev, V.Yu., Arkhipov, V.I., Residual radioactive contamination at the peaceful underground nuclear explosion sites "Craton-3" and "Crystal" in the Republic of Sakha (Yakutia). J. Environ. Radioact. 2002. №60. p.221-234.
222. Gwendy E.M. Hall, Judy E.Vaive, Peter Button. Detection of past underground nuclear events by geochemical signatures in soils // Journal of geochemical exploration.1997. V.59. P.145-162.
223. Hawkins, W.L., Thompson, J.L., Finnegan, D.L.. Hydrogeological investigations and radionuclide migration in groundwater at the Nevada Test Site. NUCLEAR PHYSICAL METHODS IN RADIOECOLOGICAL INVESTIGATIONS OF NUCLEAR TEST SITES Book Series: NATO ADVANCED SCIENCE INSTITUTE SERIES, SUB-SERIES 1: DISARMAMENT TECHNOLOGIES. 2000. V. 31. 61-74 p.
224. Hu Q.H., Rose T.P., Zavarin M., Smith D.K., Moran J. E., Zhao P.H. Accessing field-scale migration of radionuclides at the Nevada Test Site // Journal of Environmental Radioactivity. 2008.V.99. P.1617-1630.
225. Kersting A.B., Efurud D.W., Finnegan D.L., Rokop D.J., Smith D.K., Thompson J.L. Migration of plutonium in ground water at the Nevada test site // Nature. 1999. V. 397. P. 56–59.
226. Kojevnikov N.O., Antonov E.Yu., Artamonova S.Yu., Plotnikov A.E. The geoelectric structure at the site of „Crystal” underground nuclear explosion (Western Yakutia) from TEM data // Russian geology and geophysics. 2012. V.53. P. 185-193.
227. Lu N., Mason C.F.V Applied Geochemistry, 2001, №16, p. 1653-1662.
228. McNeill, J.D., 1980, Applications of transient electromagnetic techniques: Technical Note N7, Geonics Limited, 17 pp.
229. Peter I Mitchell, Luis León Vintro, Aigul Omarova, Mukhambetkali Burkitbayev, Humberto Jiménez Nápoles and Nicholas D Priest (2010) Tritium in well waters, streams and atomic lakes in the East Kazakhstan Oblast of the Semipalatinsk Nuclear Test Site// Journal of Radiological Protection. 2005. V.25. #2. 25 p. <http://iopscience.iop.org/0952-4746/25/2/002;jsessionid=D927AC7DA7E9BF065A038F6A72FBE96B.c3>
230. Lyakhova, O.N., Lukashenko, S.N., Larionova, N.V., Tur, Y.S., Contamination mechanisms of air basin with tritium in venues of underground nuclear explosions at the former Semipalatinsk test site.// Journal of Environmental Radioactivity. 2012. V.113. 98-107 p.
231. Lyakhova, O.N., Lukashenko, S.N., Mulgin, S.I., Zhdanov, S.V., Tritium as an indicator of venues for nuclear tests. //Journal of Environmental Radioactivity/ 2013.V. 124. 13-21 p.
232. Melgunov M.S., Pokhilenko N.P., Strakhovenko V.D., Sukhorukov F.V., Chuguevskii A.V. Fallout traces of the Fukushima NPP accident in southern West Siberia (Novosibirsk, Russia) // Environmental Science and Pollution Research. - 2011. - Vol. 18. - P. Online First T. 23 November 2011
233. Nikolaeva I., Chirko O., Palesskiy S., Melgunov M. Application of inductively coupled plasma mass-spectrometry for determination of uranium and plutonium content and isotopic ratios in environmental samples // SGEM 2010. 10th International

- Multidisciplinary Scientific GeoConference (20-26 June, Bulgaria): Conference Proceedings. Sofia, 2010. Vol. II. P. 413-418
234. Ramzaev, V., Mishine, A., Golikov, V., Strand, P., Brown, J., Surface ground contamination and soil vertical distribution of  $^{137}\text{Cs}$  around two underground nuclear explosion sites in the Asian Arctic, Russia. *J. Environ. Radioact.* 2007a. 92, 123-143.
  235. Ramzaev V., Mishine A., Basalaeva L, Brown J. radiostrontium hot spot in the Russian arctic: ground surface contamination by  $^{90}\text{Sr}$  at the “Kraton-3” underground nuclear explosion site// *J. Environ. Radioact*, 2007b, № 95, p. 107-125.
  236. Ramzaev V., Mishine A., Golikov V., Argunova T., Ushnitski V., Zhuravskaya A., Sobakin P., Brown J., Strand P. Radioecological studies at the Kraton-3 underground nuclear explosion site in 1978-2007: a review // *J. Environ. Radioact*, 2009. № 100. P. 1092-1099.
  237. Smith D.K., Finnegan D.L., Bowen S.M. An inventory of long-lived radionuclides residual from underground nuclear testing at the Nevada test site, 1951-1992 // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2003. V.67. P.35-51.
  238. Tims Stephen G., Fifield L.Keith, Hancock Gary J., Rajeev R.Lal, Hoo Wee T. Plutonium isotope measurements from across Australia // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2013. B 294. P.636-641
  239. *Treatise on Geochemistry*/ editors K.K. Turekian, H.D. Holland. Publisher: Elsevier Science, 2003. 7800 p. ISBN-10: 0080437516
  240. Strom R.N. , Kaback D.S. Tritium migration in A/M –area ground water (U). Alken, USA, 1992. 31p.
  241. Takenaka N., Ueda A., Maeda Y. Acceleration of the rate of nitrite oxidation by freezing in aqueous solution//Nature. -1992. -Vol. 358. -P. 736-738.
  242. Thompson, J.L., 1991. RADIONUCLIDE MIGRATION STUDIES AT THE NEVADA TEST SITE. *Radiochimica Acta* 54, 149-154.
  243. Thompson, J.L., Gilmore, J.S., 1991. MIGRATION OF FISSION-PRODUCTS AT THE NEVADA TEST SITE - DETECTION WITH AN ISOTOPIC TRACER. *Radiochimica Acta* 52-3, 229-231.
  244. Hisham Zerriffi. Tritium: The environmental, health, budgetary, and strategic effects of the Department of Energy's decision to produce tritium. Takoma Park, Maryland, USA. 1996. <http://www.ieer.org/reports/tritium.html>
  245. сайт <http://www.alrosa-msk.ru/>
  246. сайт <http://www.udachny.ru/objects/19/index.html>
  247. сайт [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Deuterium-tritium\\_fusion.svg?uselang=ru](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Deuterium-tritium_fusion.svg?uselang=ru)
  248. <http://www.sbras.info/articles/science/dalnii-rodstvennik-bermudskogo-treugolnika>



ул. Дзержинского, 3/1, г. Якутск, 677000, тел. (4112) 34-49-15, факс 42-13-72,  
E-mail: minopr@sakha.gov.ru, http://www.sakha.gov.ru/minopr

25.11. 2013 г. №10-02/6-3856

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

в диссертационный совет

### СПРАВКА

Артамонова Светлана Юрьевна - с.н.с. ФГБУН «Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева» Сибирского отделения РАН по результатам открытого конкурса становилась победителем и ответственным исполнителем ряда проектов государственной программы «Охрана окружающей среды Республики Саха (Якутия)» и государственной программы научно-исследовательских работ, разработчиком и государственным заказчиком которых являлось Министерство охраны природы Республики Саха (Якутия):

- № 43 (76-08) «Разработка проекта специального горного отвода на объектах мирных подземных ядерных взрывов «Кристалл» и «Кратон-3» (2008-2009 гг.);
- № 22-88/10 «Обследование радиэкологической обстановки в местах проведения ПЯВ на Средне-Ботуобинском месторождении (Мирнинский район)»(2010 г.);
- № 21-87/10 «Разработка системы мониторинга радиационной и гидрологической обстановок в зоне ПЯВ» (2010-2011 гг.);
- № 23 «Оценка загрязнения искусственными радионуклидами подземных вод в зоне ПЯВ «Кристалл» (Мирнинский район)» (2012 г.),
- № 33-05 «Оценка техногенного радиоактивного загрязнения на территории Алданского улуса (Эльконский горст)» (2005 г.);
- № 46-06 «Радиэкологическое обследование площадок разведочных буровых скважин на Томторском месторождении с составлением радиационно-экологического паспорта» (2006 г.);
- № 44(69-09) «Обследование радиэкологической обстановки в местах промышленного освоения природных руд на Эльконском месторождении», (2009 г.)

В результате реализации вышеназванных проектов Артамоновой С.Ю. созданы и переданы в Министерство охраны природы Республики Саха (Якутия):

1. Оцифрованные ГИС-проекты новых оригинальных радиэкогеохимических баз данных районов подземных ядерных взрывов (ПЯВ) и отвалов золотоурановых месторождений Эльконского горста, радиэкогеохимических баз данных территории редкоземельного Томторского месторождения. ГИС-проекты подготовлены на основе космоснимков Landcat

(система координат UTM, геоид WGS-84) с возможностью постоянного обновления и обогащения.

2. Система мониторинга радиационной и гидрологической обстановок объектов подземных ядерных взрывов с выделением ключевых участков, обоснованием точек сети наблюдений.

3. Проект специального горного отвода (охранной зоны) объекта ПЯВ «Кратон-3», в пределах которого без разрешения надзорных органов запрещено ведение любой хозяйственной деятельности.

4. Топографическая карта района аварийного ПЯВ «Кратон-3» в масштабе 1:2000 (2009 г.), необходимая при проведении рекультивационных и других природоохранных мероприятий.

Полученные новые радиоэкологохимические данные внесены в радиационно-экологические паспорта объектов ПЯВ.

Разработанная Артамоновой С.Ю. система мониторинга радиационной и гидрологической обстановок на объектах подземных ядерных взрывов с выделением ключевых участков, обоснованием сети наблюдений, наряду с оцифрованными ГИС-проектами баз данных является основой радиационного мониторинга на этих объектах и используются Министерством охраны природы РС(Я) при разработке программ по организации и проведению радиационного мониторинга и обеспечению радиационной безопасности на объектах ПЯВ и Эльконского месторождения.

Проект специального горного отвода (охранной зоны) объекта ПЯВ «Кратон-3» находится в стадии государственной экспертизы.

Заместитель министра



Я.И. Заровняев

**Приложение 2. Активность трития в поверхностных водах района МПЯВ «Кратон-3» (результаты жидкостно-сцинтилляционной спектроскопии)**

№ пробы	Место отбора	Географическая привязка			Содержание трития, Бк/л		Общая активность, Бк/л	
		Высота, Абс.м.	Сев. широта, град	Вост. долгота, град.	Первый заход, измерение в течение 3 часов	Повторный заход, измерение в течение 6 часов	Бета-активность, связанная в основном с <sup>90</sup> Sr	Альфа-активность (связанная в основном с изотопами Pu, Am)
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
УВ	НРБ -99 , 2009				7700	7700	1	0.2
2	Бочажина, прав.борт р. Марха	423	65.92418333	112.37895	5±2			
3	Бочажина, прав.борт р. Марха	364	65.92348333	112.3557667	11±2			
4	Бочажина, прав.борт р. Марха	349	65.92316667	112.3513833	56±2.8			
5	Бочажина, прав.борт р. Марха	313	65.92168333	112.3380167	44.1±2.6			
6	ручей	296	65.92251667	112.3330667	15±1			
7	ручей	294	65.94698333	112.3162833	17±1	16±6	1.85±0.17	0.01±0.008
8	р. Марха	290	65.94696667	112.3166333	55.3±1.7	46±2 (24 часа)		
9	ручей	295	65.9459	112.3161833	12±2			
10	р. Марха	294	65.94511667	112.31645	15±1		0.09±0.035	0.034±0.010
11	ручей	296	65.94495	112.3160833	6±2			
12	ручей	303	65.9443	112.3160167	7±2			
13	ручей	293	65.94255	112.3161167	5±2			
14	р. Марха	293	65.94248333	112.3163333	6±3			
15	бочажина	294	65.94176667	112.3159833	17±2	16±6	0.11±0.037	0.066±0.021
16	ручей	293	65.93983333	112.3164167	5±3			
17	р. Марха	288	65.93981667	112.3166833	48±2.4			
17а	«ванна» у реки	288	65.93981667	112.3166833	5±2			

Продолжение 1 приложения 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
18	ручей	292	65.93806667	112.3171833	52±3			
19	р. Марха	288	65.93536667	112.3196167	51±3			
20	ручей	292	65.93475	112.3193	7±2			
21	ручей	295	65.93216667	112.3210333	13±1			
22	ванна у р. Марха	292	65.92963333	112.3222167	7±1			
23	р. Марха	283	65.92956667	112.32245	12±1			
24	ручей	289	65.92855	112.3224333	6±3			
25	р. Марха	290	65.92733333	112.3233833	6±2			
26	р. Марха	290	65.926	112.3259667	5±2			
27	р. Марха	285	65.92428333	112.3287	9±1			
28	ручей	291	65.92658333	112.3228833	7.5±0.5	6.7±1.3		
29	ручей	288	65.9209	112.3318333	7.5±2	6±2		
30	р. Марха	294	65.92303333	112.3305833	15±1			
31	бочажина	285	65.94868333	112.3189167	52±3	47±4		
32	р. Марха	283	65.94863333	112.3185333	50±3	45±6		
33	бочажина	288	65.94688333	112.31855	5±3	6.2±2.5		
34	р. Марха	281	65.94636667	112.31815	55±4			
35	бочажина	285	65.94481667	112.3183	11±0.9			
36	р. Марха	283	65.94401667	112.31785	8±1			
37	бочажина	287	65.94318333	112.31825	6±0.4		0.099±0.036	0.033±0.015
38	р. Марха	286	65.94248333	112.31765	57±3			
39	р. Марха	290	65.9406	112.3177833	74±2			
40	бочажина	282	65.93921667	112.31885	6±2			
41	р. Марха	287	65.93791667	112.3190667	13±1			
42	бочажина	290	65.93741667	112.3201667	16±2		0.076±0.041	0.041±0.028
43	р. Марха	287	65.93558333	112.3207667	6±2			
44	р. Марха	288	65.93366667	112.3223	5±3			
45	р. Марха	279	65.9313	112.3232333	11±3			
46	р. Марха	283	65.92885	112.3238833	10±1			
47	р. Марха	286	65.92718333	112.3256167	6±2	8±2		
48	р. Марха	288	65.92643333	112.32695	52.1±2.6			

## Окончание Приложения 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
49	р. Марха	288	65.92555	112.3283667	14±1.5			
50	р. Марха	293	65.92476667	112.32955	13±2			
51	склон под МПЯВ	298	65.92541667	112.3286167	67.2±1.9			
52	руч безымянный	297	65.9241	112.3309	56.8±2.8			
53	р. Марха	292	65.95166667	112.3178833	16±1			
54	р. Марха	286	65.95608333	112.3201167	9±2		0.06±0.03	0.03±0.02
56	р. Чукука	288	65.95828333	112.2950333	16±3			
57	р. Чукука	294	65.95258333	112.25265	14±4			
58	ручей	303	65.94636667	112.2183167	17±1			
59	р. Чукука	316	65.95855	112.15505	9±1		0.116±0.035	0.029±0.019
470	р. Марха	286	65.92718333	112.3256167	44.3±2.2	38.7±2.5	0.026±0.013	0.011±0.010
480	р. Марха	288	65.92643333	112.32695	45.2±2.1			
490	р. Марха	288	65.92555	112.3283667	47.7±2.4			
1_08	склон ниже МПЯВ		65.92538889	112.3280833	22		2.35	0.15
2_08	р.Марха		65.92538889	112.3286389	22		2.82	0.42
3_08	р Безымянный		65.9242	112.331	30		0.27	0.023
4_08	скв 7 у МПЯВ		65.92480556	112.3316389	19		2.39	0.16
5_08	цеолит канава 9		65.92455556	112.33175	18		0.398	0.29
6_08	цеолит.канава 2		65.92611111	112.3335	68		2.11	0.54
Сф_08	склон воды р.Марха, выше устья р. Безымянный						0.03	
к3_08	канава 3						2.25	

## Дополнение

проба	место	Высота, Абс.м.	Сев. широта, град	Вост. долгота, град.	<sup>90</sup> Sr, Бк/л	<sup>239, 240</sup> Pu, Бк/л	<sup>238</sup> Pu, Бк/л
	УВ				5	0,56	0,6
	р. Енисей, фон				0,01-0,001	степень -6-5	степень -6-5
49	Р. Марха под МПЯВ	288	65.92555	112.3283667	0,078	0,0006	0,0186
51	Склон. сток под МПЯВ	298	65.92541667	112.3286167	1,99	0,0004	0,0078
52	Устье р. Безымянный	297	65.9241	112.3309	0,12	0,0004	0,0039



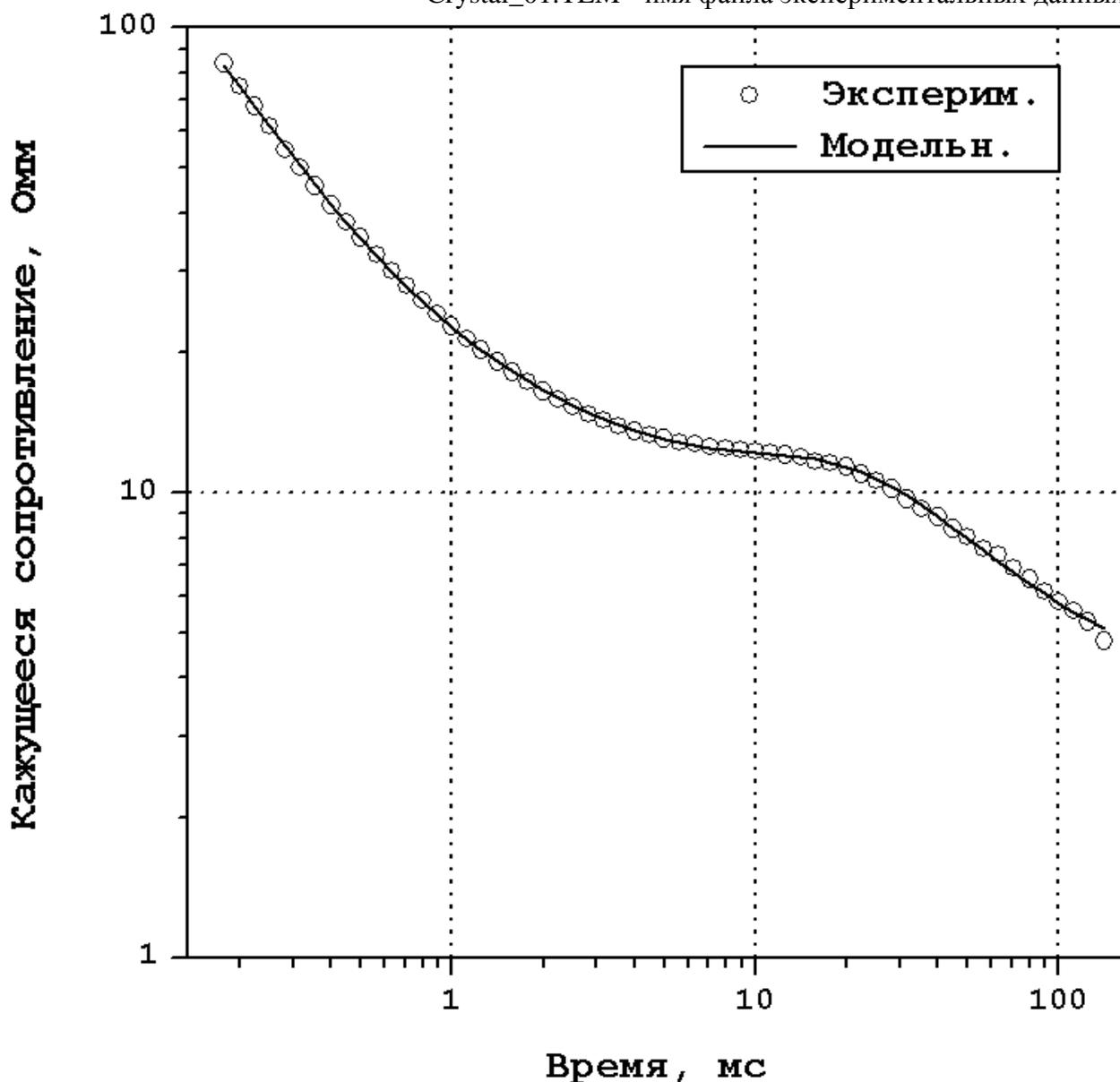
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.

Результаты интерпретации данных электромагнитных зондирований.  
 Результирующие кривые кажущегося сопротивления и геоэлектрические модели.

МПЯВ «Кристалл», 1974 г.

Субмеридианальный профиль.

Crystal\_01.TEM - имя файла экспериментальных данных.

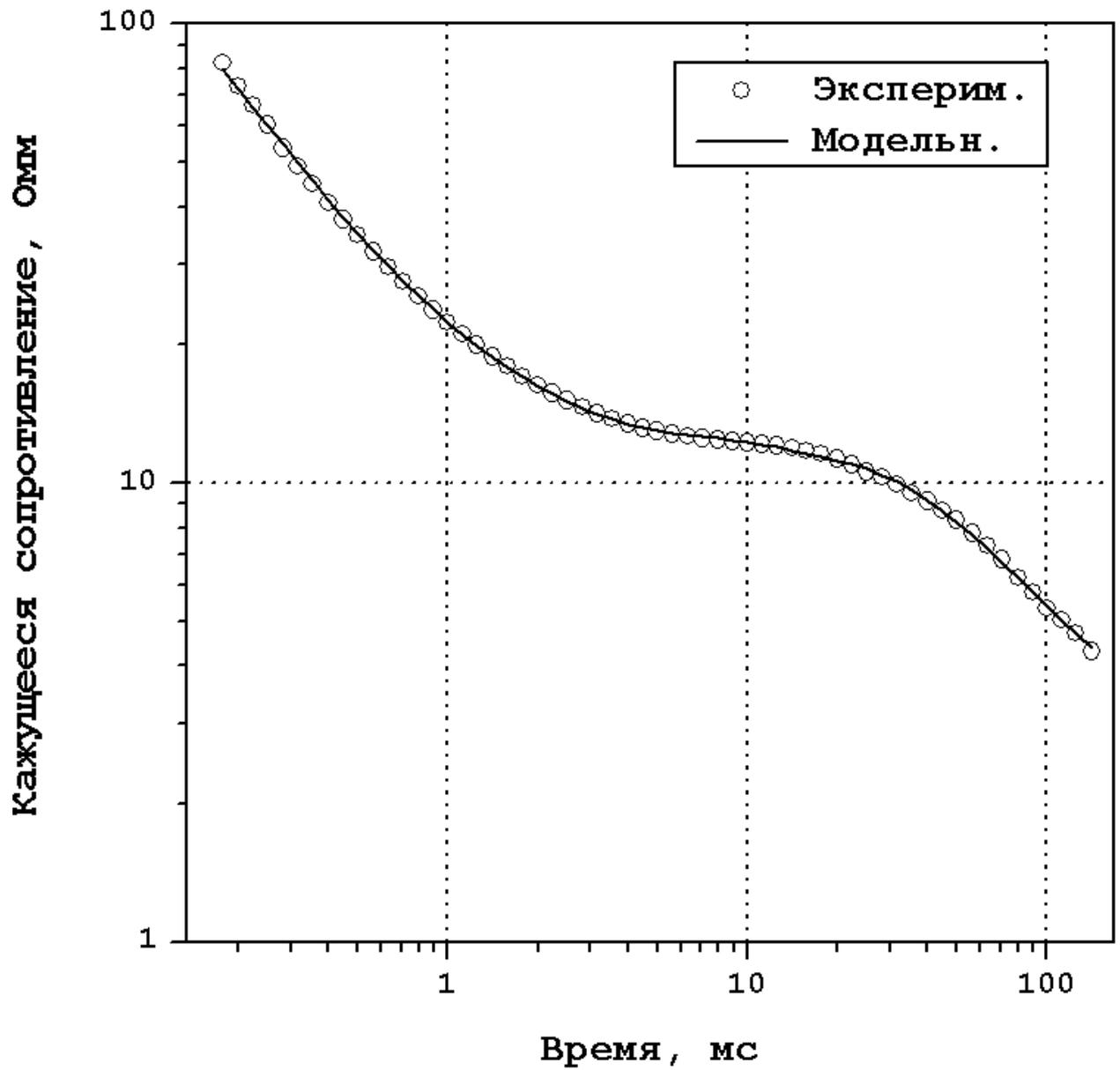


Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление , Ом	Мощность слоя, м
1	111.	80.4
2	5.3	39.1
3	8.5	242.7
4	4.3	91.1
5	1.2	

Среднеквадратичная ошибка - 1.8e-2

Crystal\_02.TEM - имя файла экспериментальных данных.

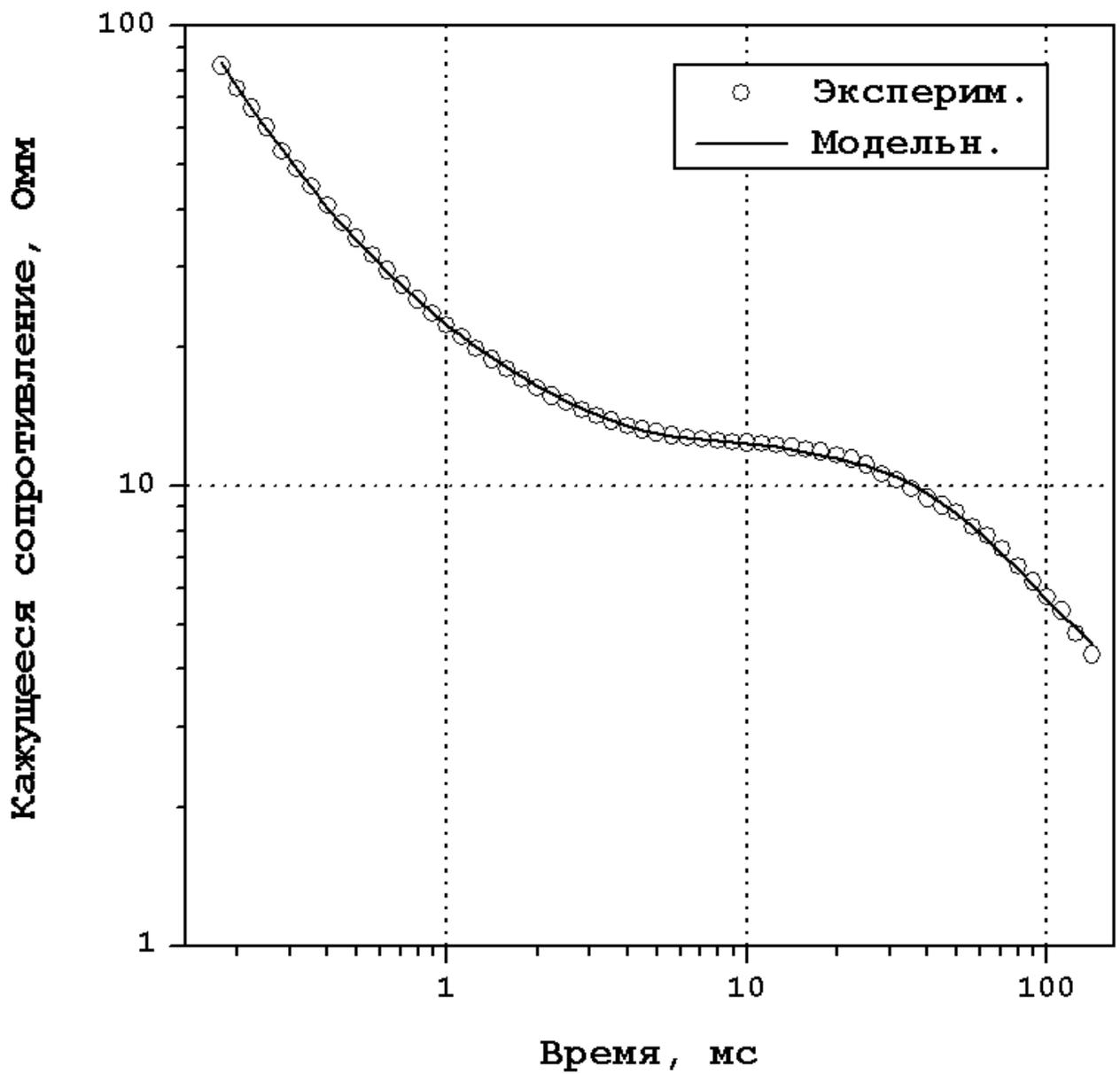


Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	122.	77.
2	5.8	58.6
3	8.3	211.
4	1.45	126.
5	0.25	

Среднеквадратичная ошибка -  $1.4 \cdot 10^{-2}$

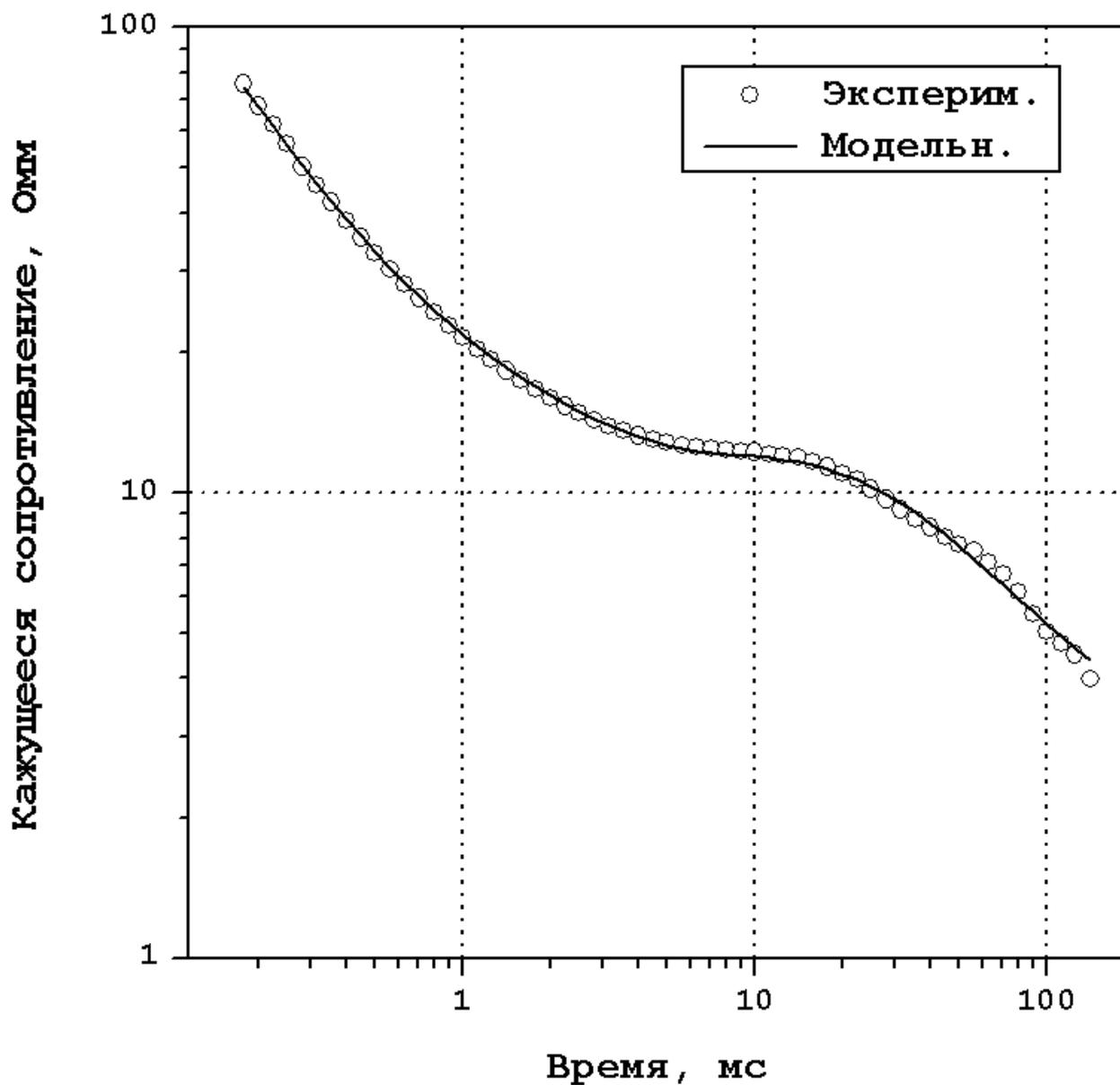
Crystal\_03.ТЕМ - имя файла экспериментальных данных.



Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	514.	81.3
2	1.54	4.95
3	7.57	278.
4	1.	111.
5	0.16	

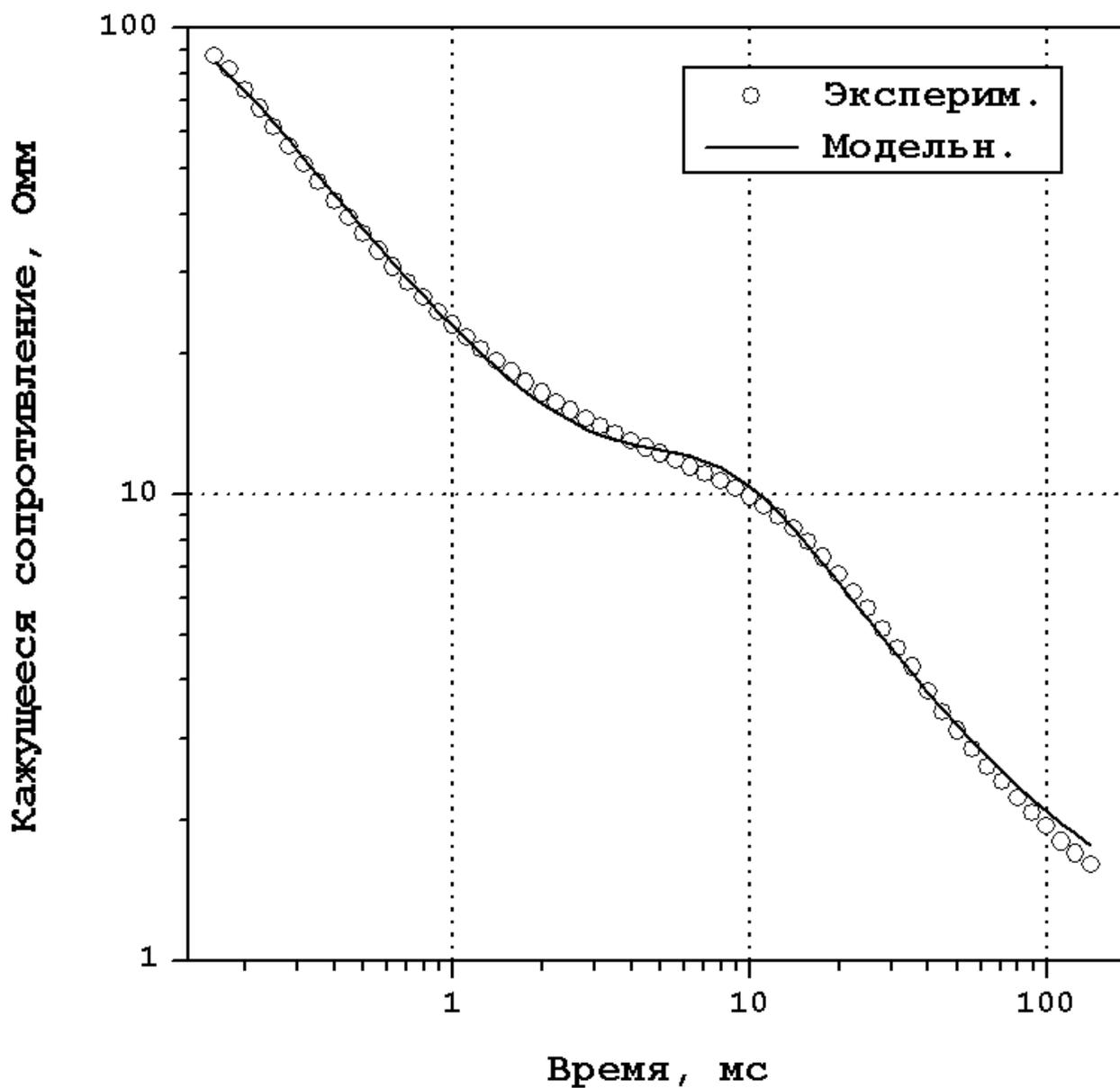
Среднеквадратичная ошибка - 2.0e-2



Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	81.6	82.3
2	3.53	13.9
3	7.53	285.
4	1.1	111.
5	0.42	

Среднеквадратичная ошибка -  $3.5 \cdot 10^{-2}$

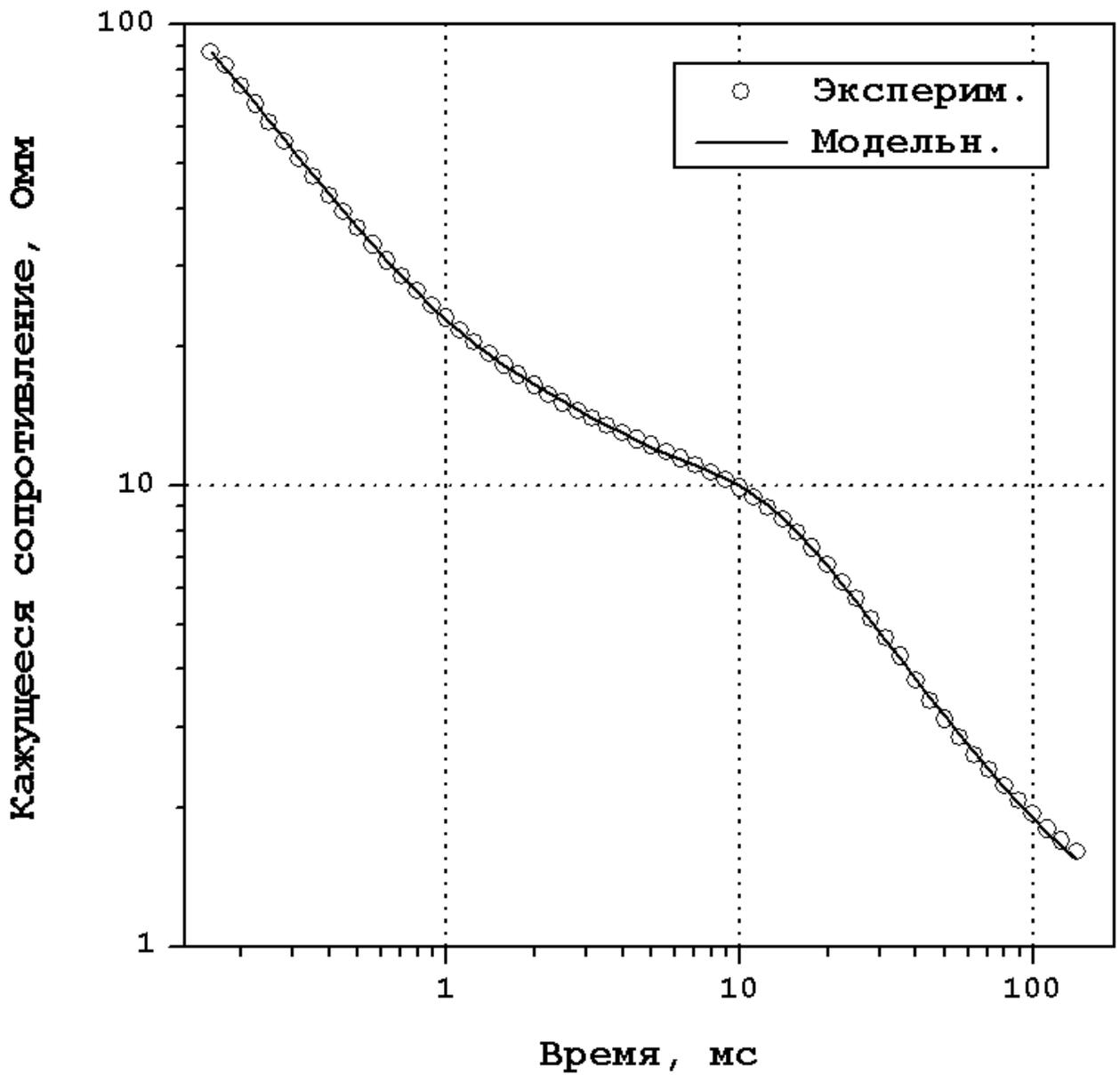


Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	74.1	84.9
2	4.95	11.3
3	4.5	155.
4	0.3	

Среднеквадратичная ошибка -  $6.1 \cdot 10^{-2}$

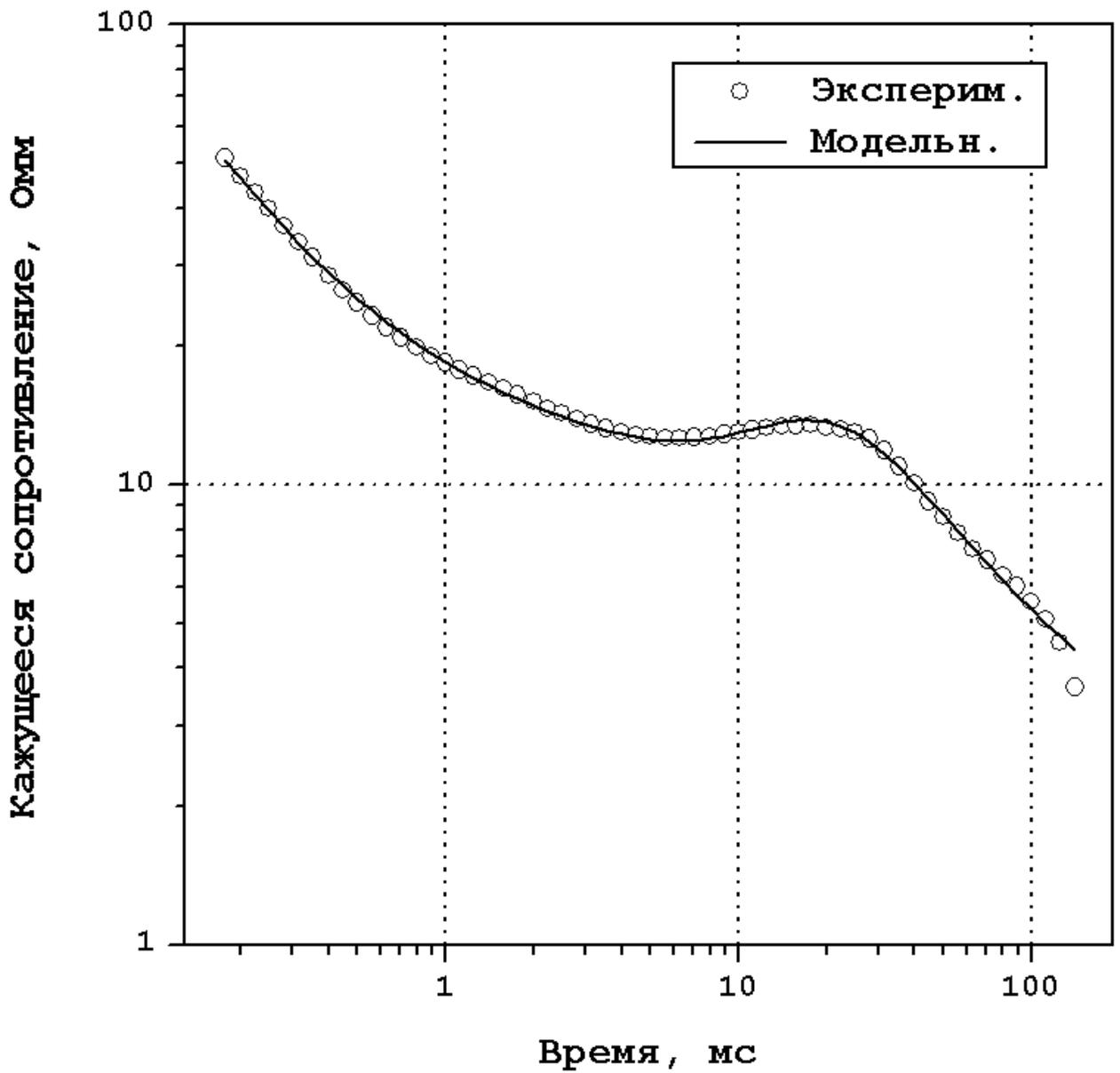
Crystal\_05ns.TEM - имя файла экспериментальных данных.



Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	83.1	82.9
2	4.7	98.5
3	206.	8.6
4	1.2	67.6
5	0.14	336.
6	3.96	

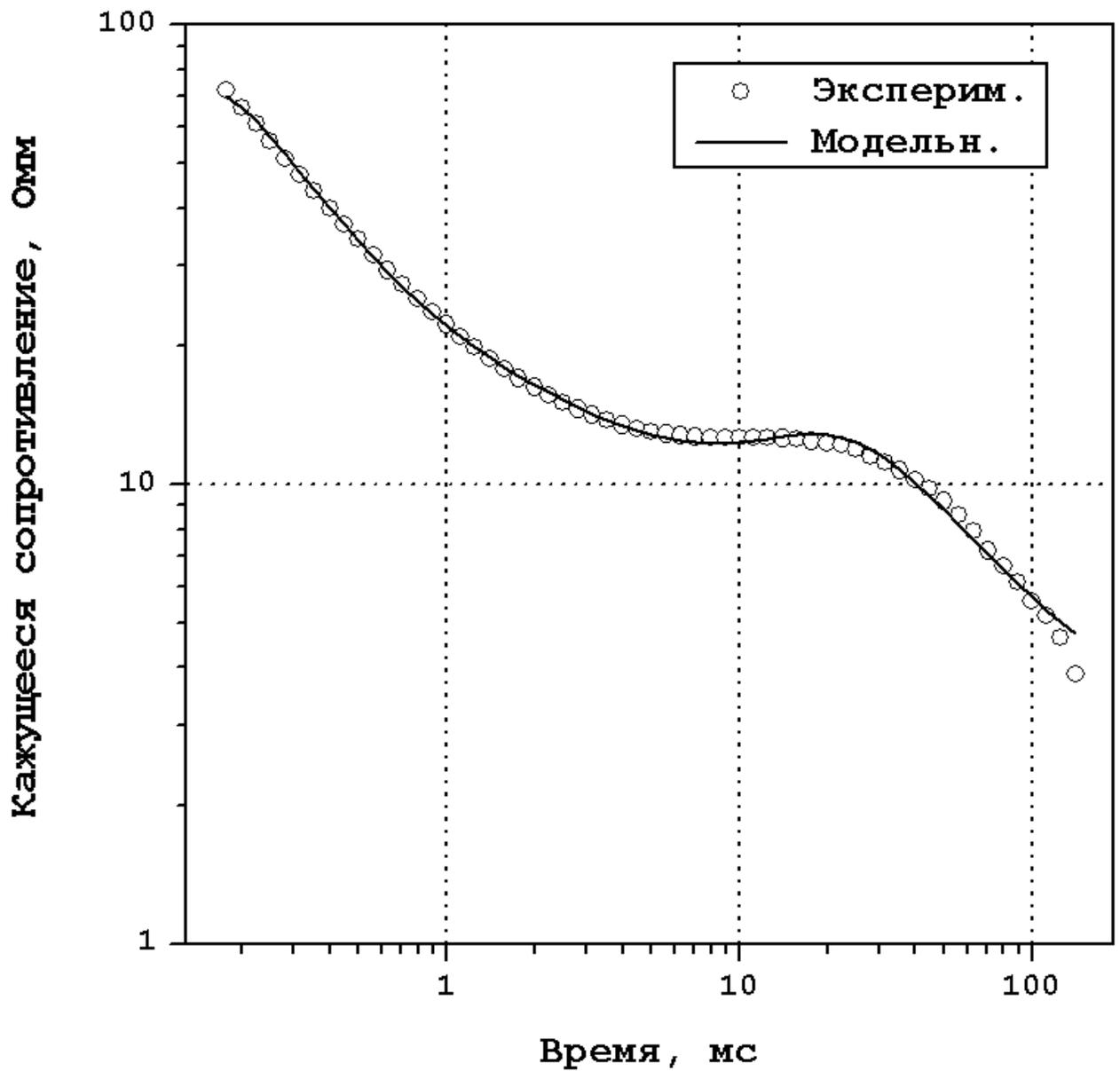
Среднеквадратичная ошибка - 1.5e-2



Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	56.4	68.8
2	3.3	10.4
3	9.1	317.
4	28.8	43.4
5	0.4	

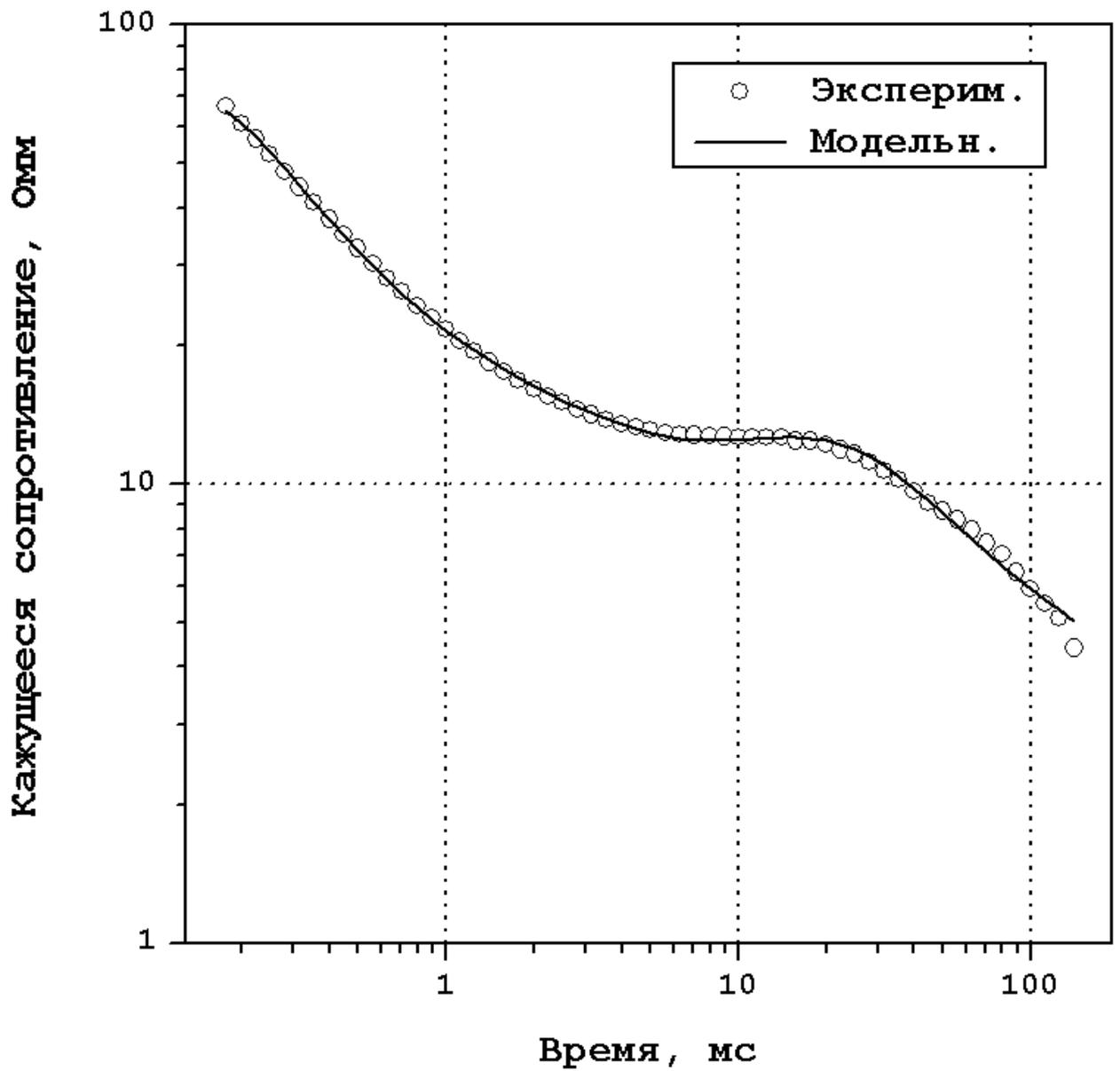
Среднеквадратичная ошибка - 4.1e-2



Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	57.1	94.3
2	1.6	6.6
3	8.3	351.
4	1.3	12.4
5	0.51	

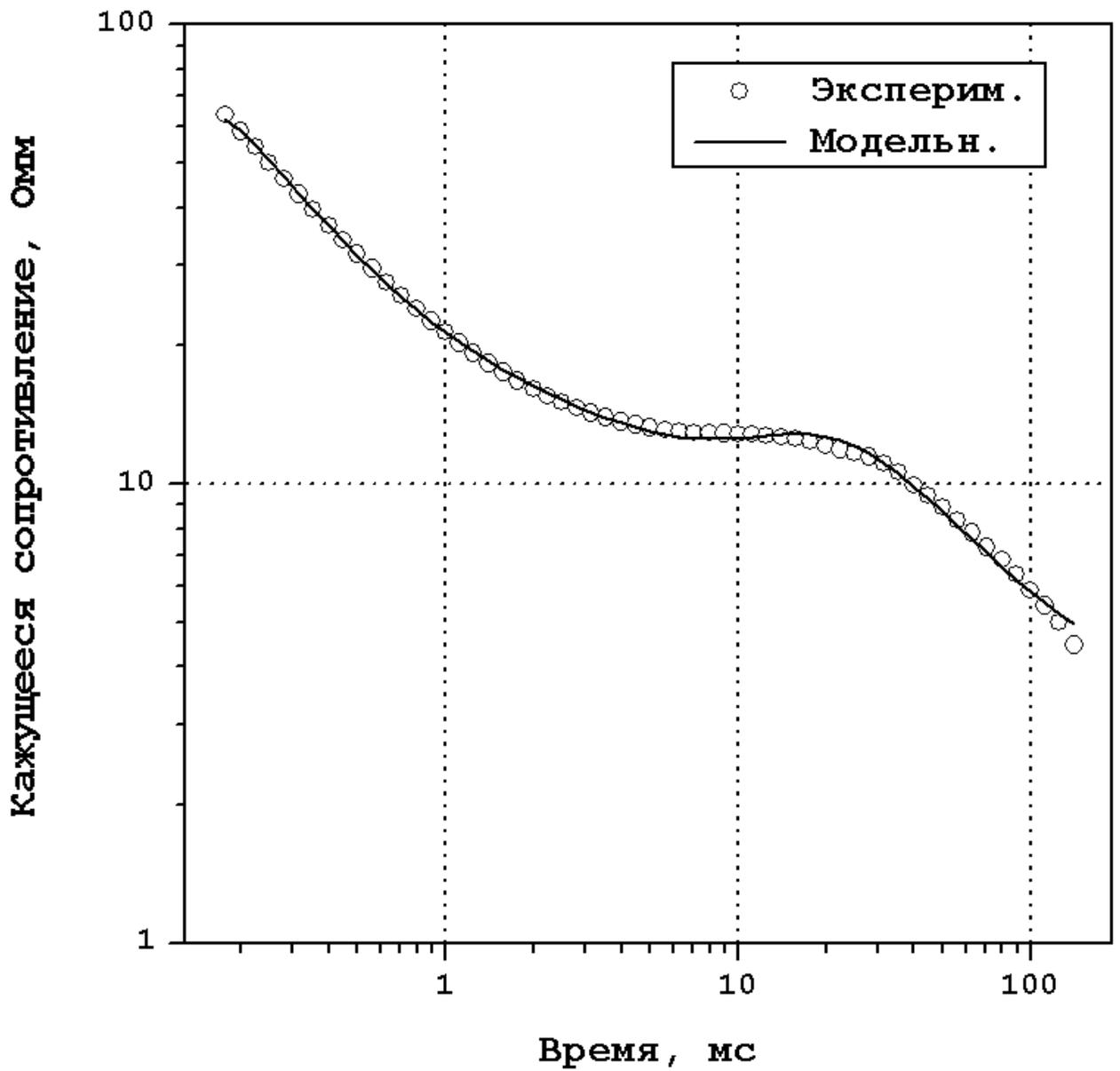
Среднеквадратичная ошибка - 4.9e-2



Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	53.9	90.
2	2.3	9.36
3	8.6	362.
4	0.8	

Среднеквадратичная ошибка -  $3.9 \times 10^{-2}$

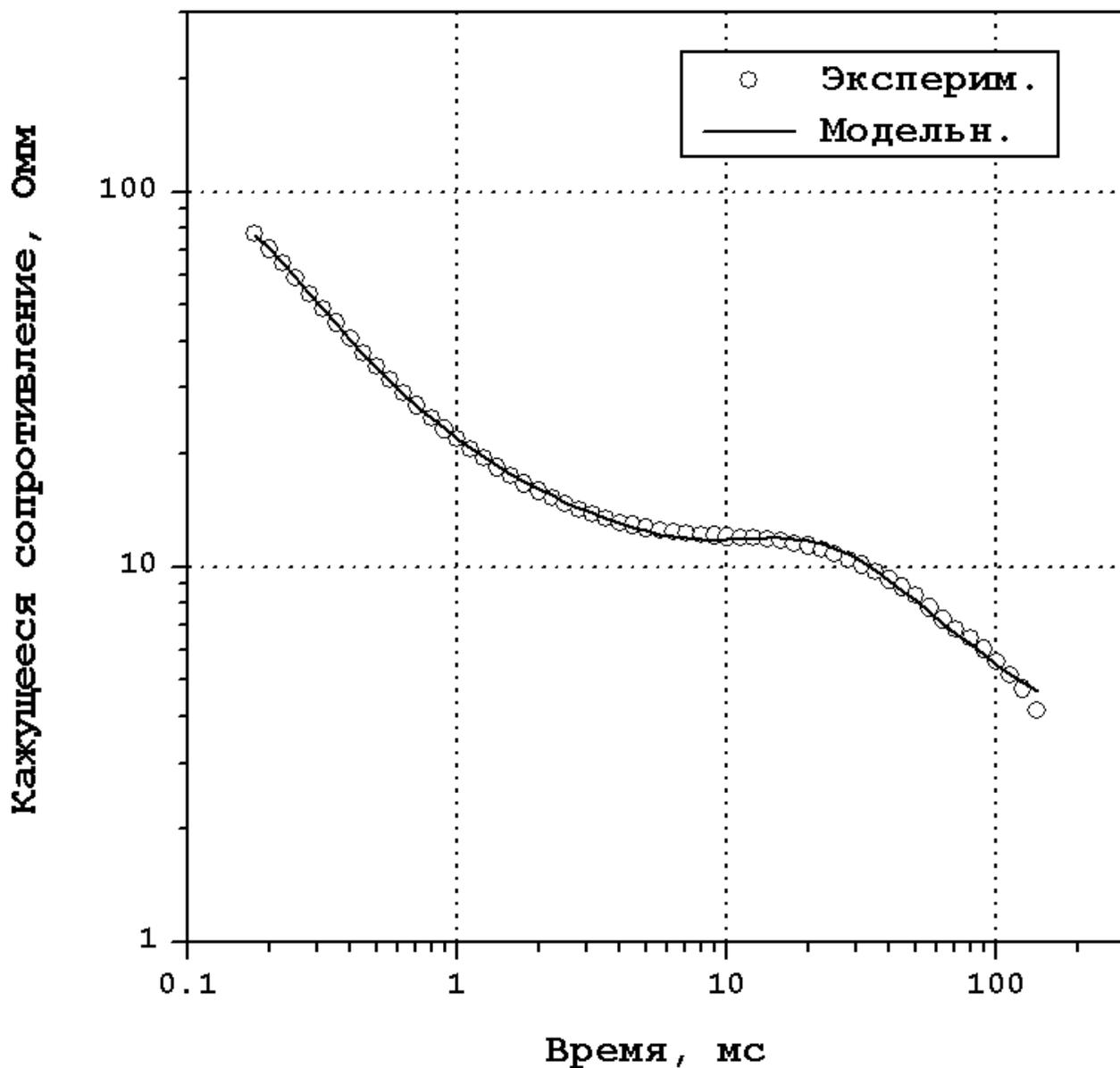


Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	53.1	87.3
2	2.44	8.9
3	8.6	364.
4	0.7	

Среднеквадратичная ошибка -  $3.5e-2$

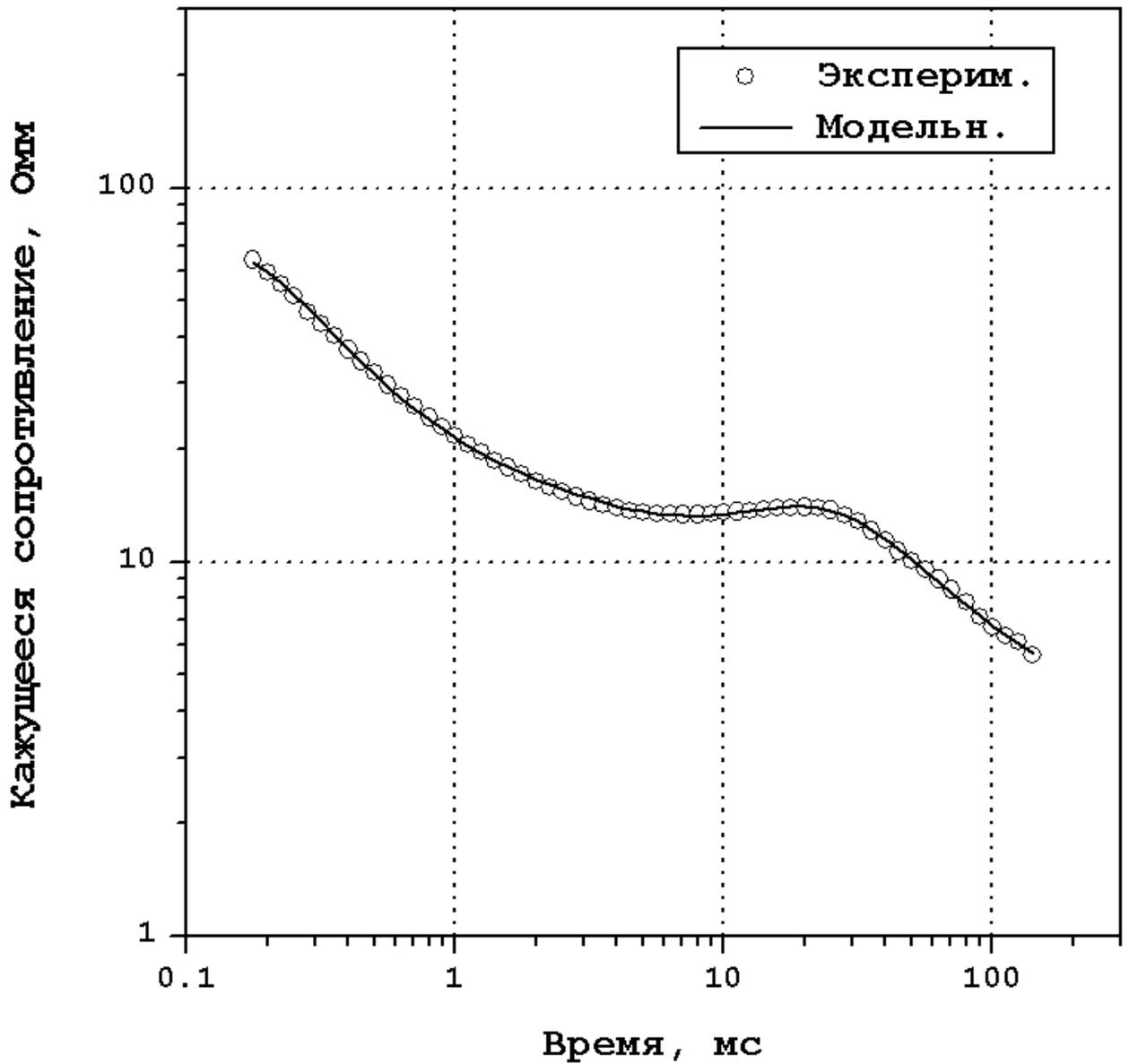
Субширотный профиль.



Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	65.7	93.1
2	1.2	5.0
3	7.8	340.
4	1.7	14.1
5	0.7	

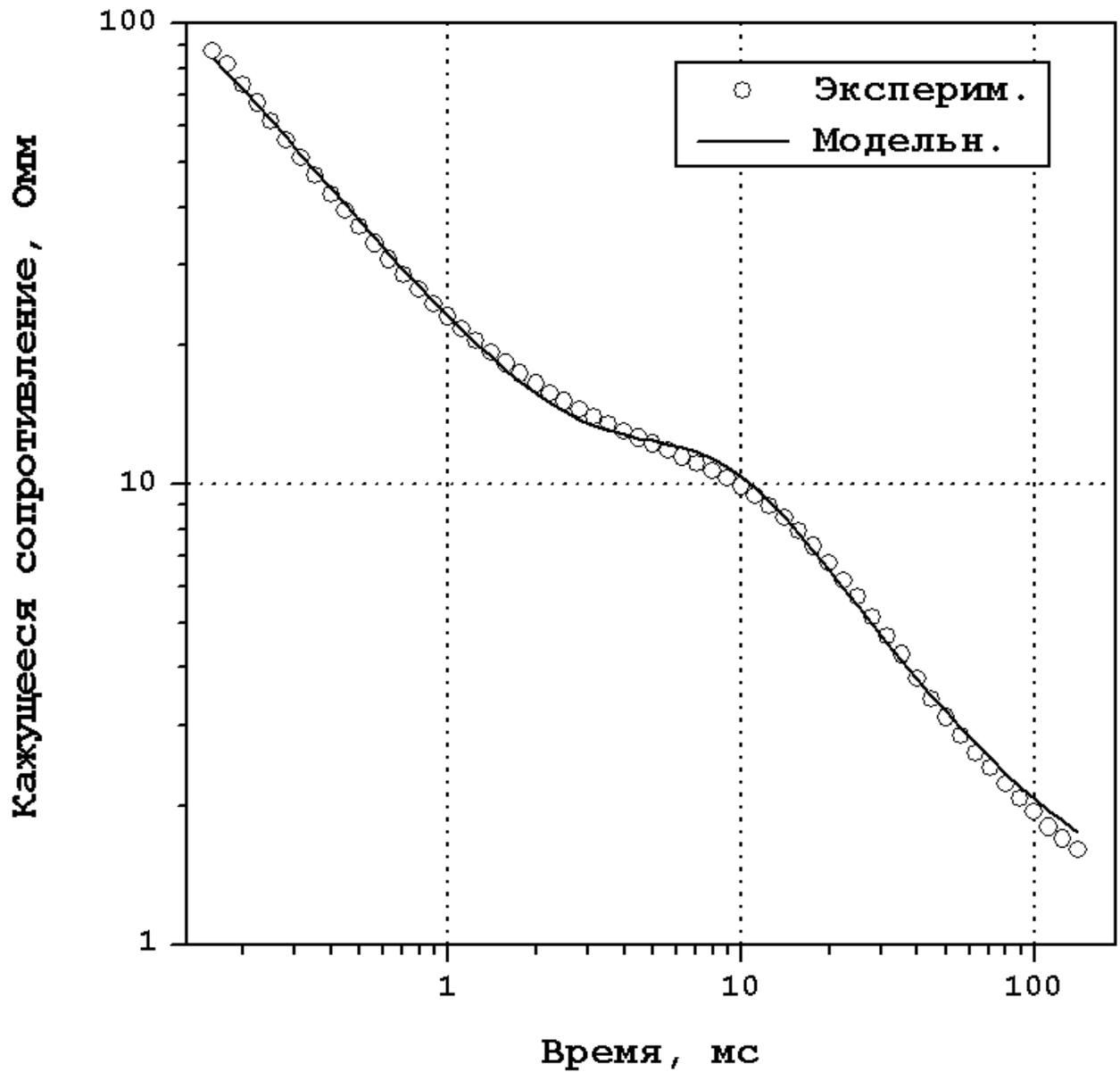
Среднеквадратичная ошибка - 3.6e-2



Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	51.5	92.
2	1.6	6.4
3	10.	399.
4	2.4	5.3
5	0.7	

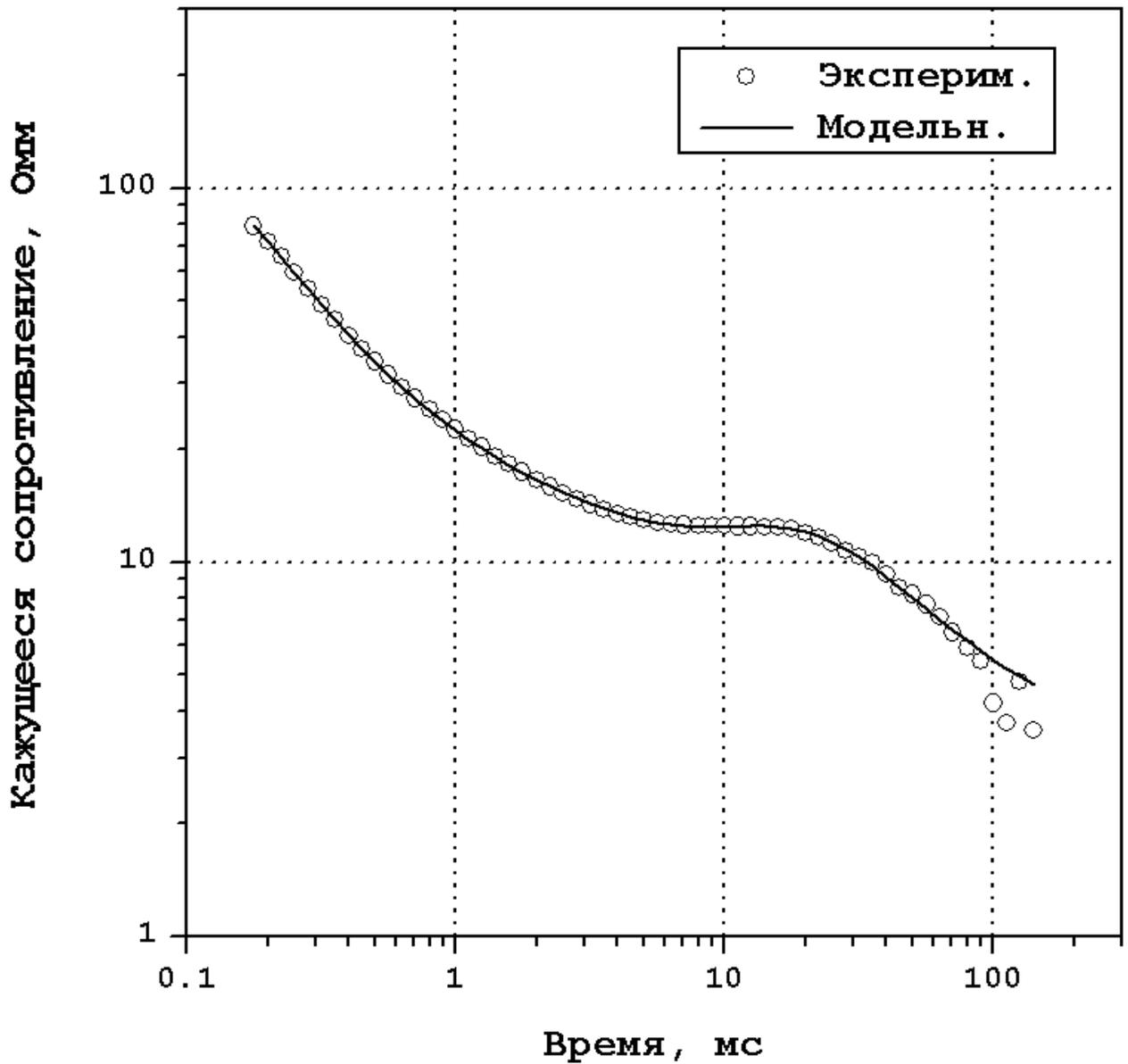
Среднеквадратичная ошибка -  $1.7e-2$



Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	98.1	74.2
2	8.2	25.9
3	4.3	152.
4	0.3	

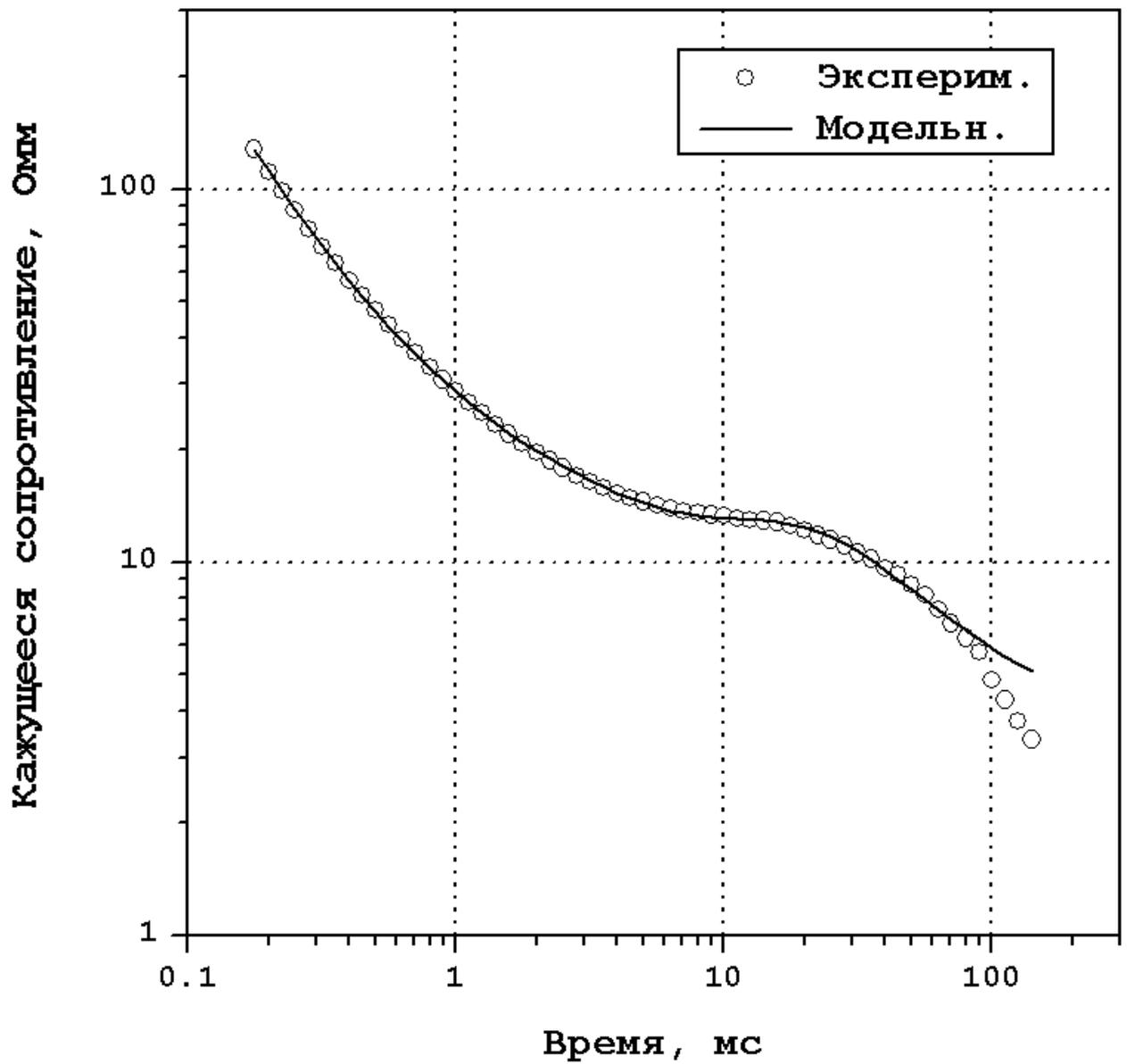
Среднеквадратичная ошибка -  $5.8e-2$



Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	82.1	85.7
2	3.6	17.7
3	8.2	336.
4	0.8	

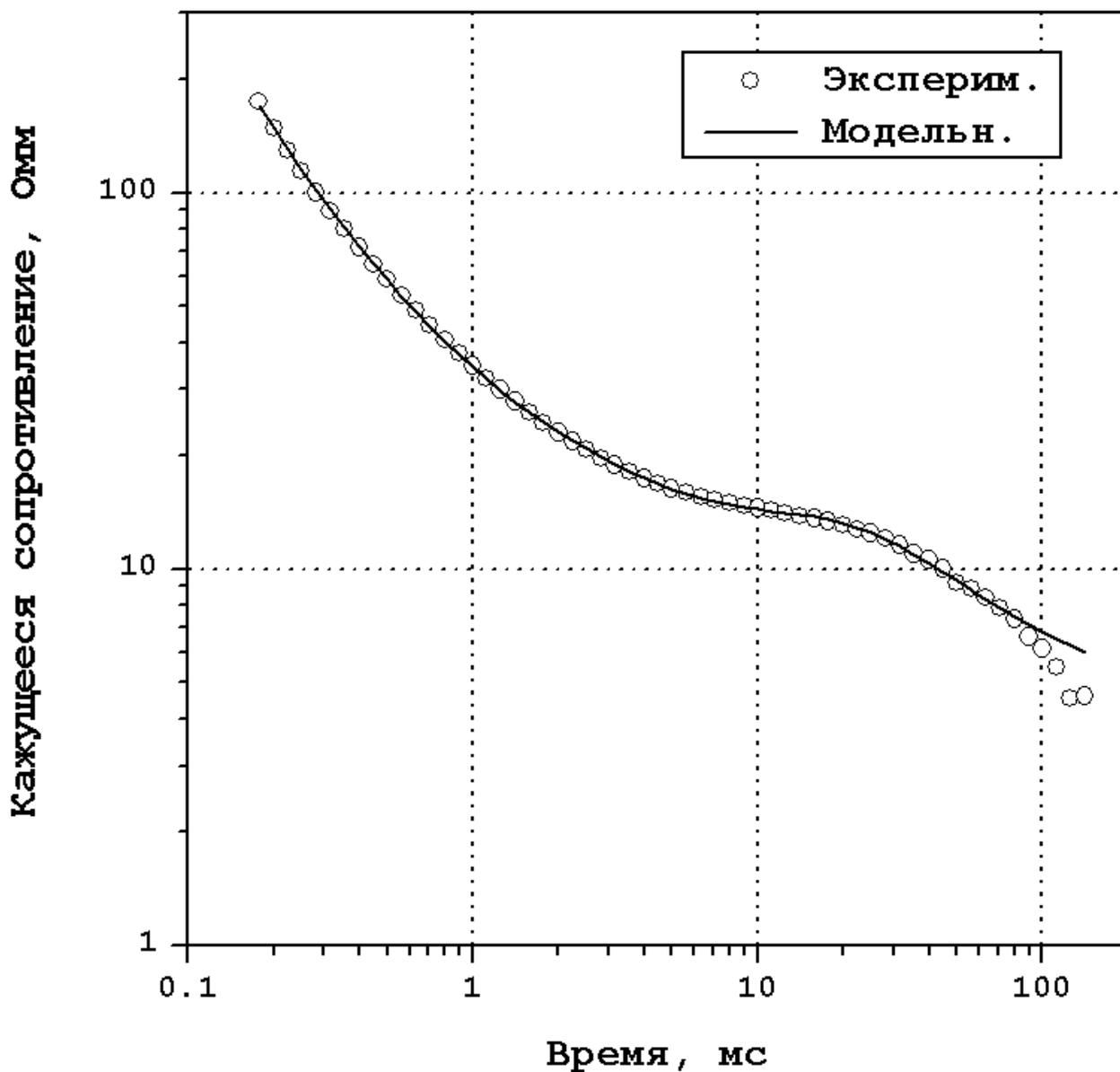
Среднеквадратичная ошибка - 2.7e-1



Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	184.	106.
2	1.2	4.6
3	7.8	345.
4	0.9	

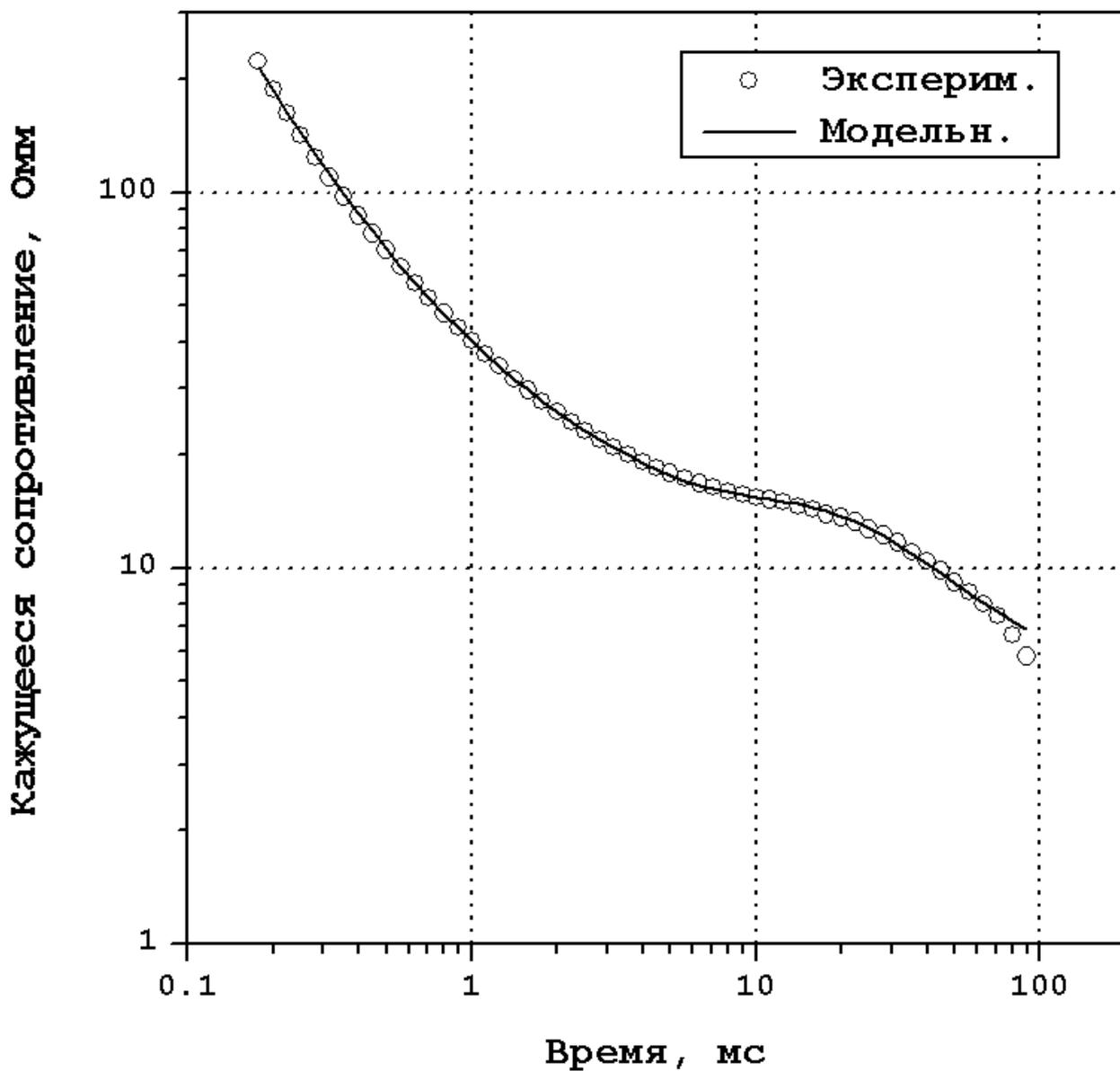
Среднеквадратичная ошибка - 1.0e-1



Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	336.	119.
2	1.4	6.
3	8.4	356.
4	1.4	

Среднеквадратичная ошибка -  $7.8e-2$

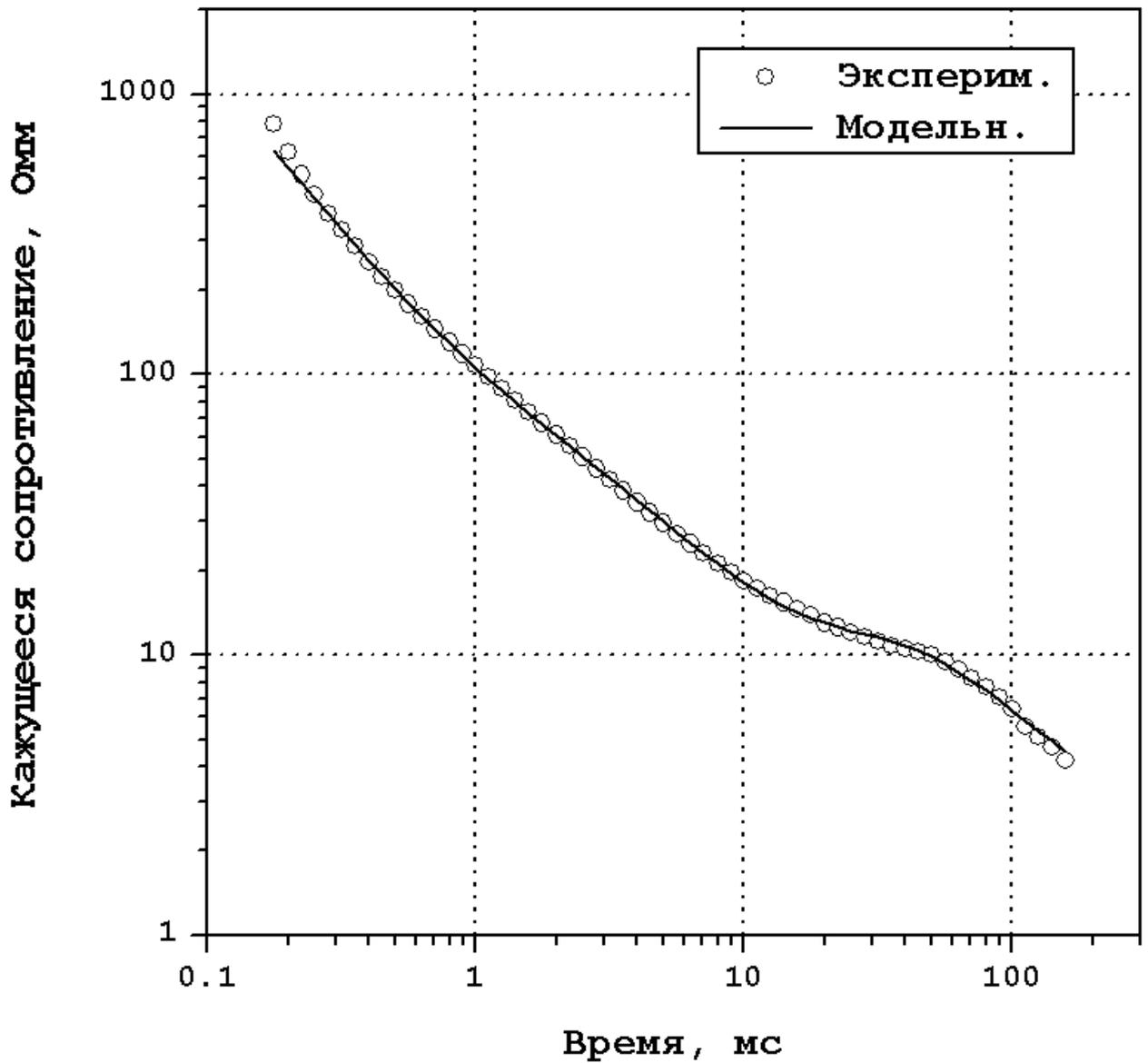


Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	686.	131.
2	1.5	6.5
3	8.2	332.
4	1.2	

Среднеквадратичная ошибка - 1.5e-1

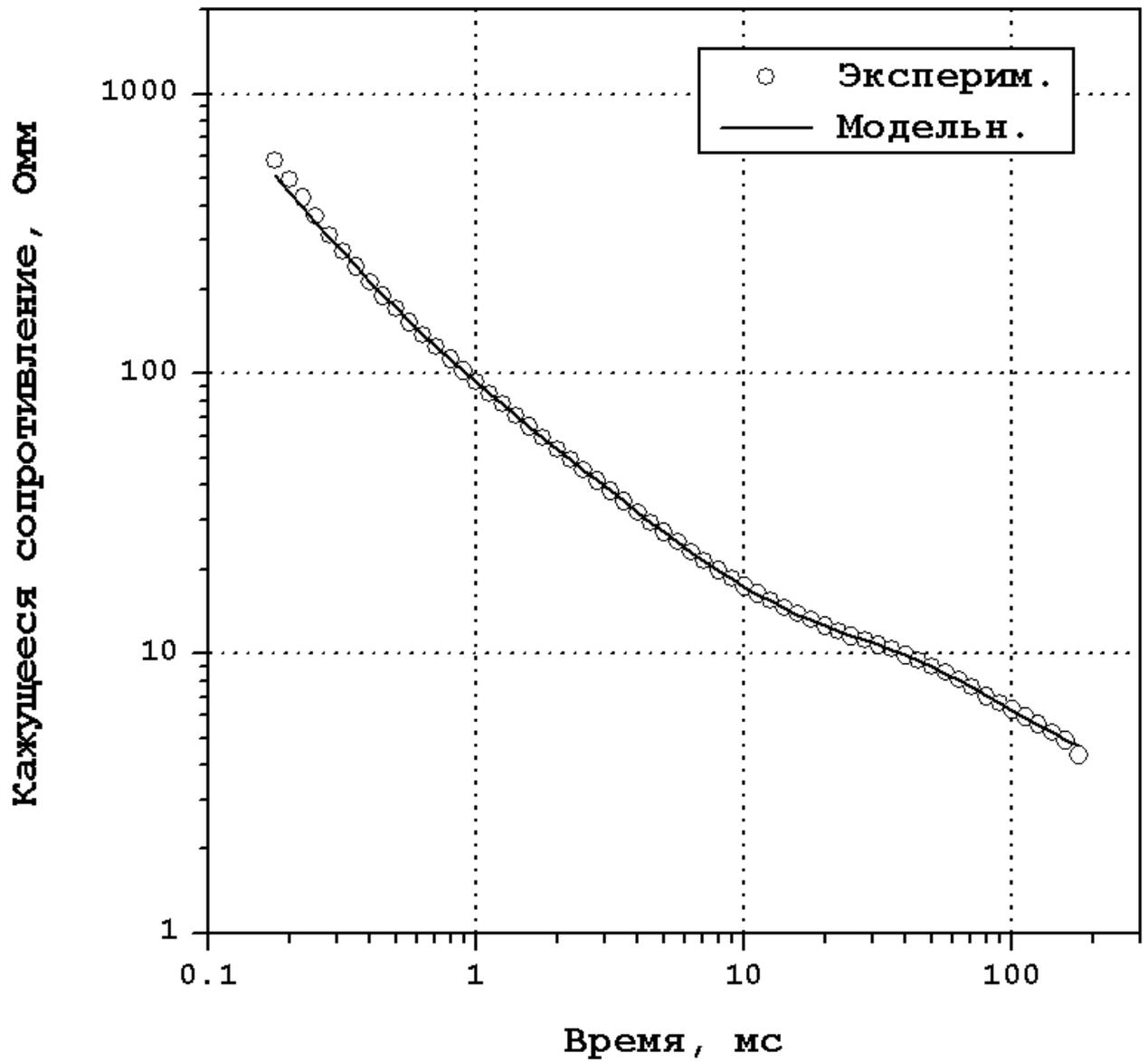
МПЯВ «Кратон-3», 1978 г.



Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	1634.	197.
2	5.8	95.4
3	2.4	235.
4	0.17	

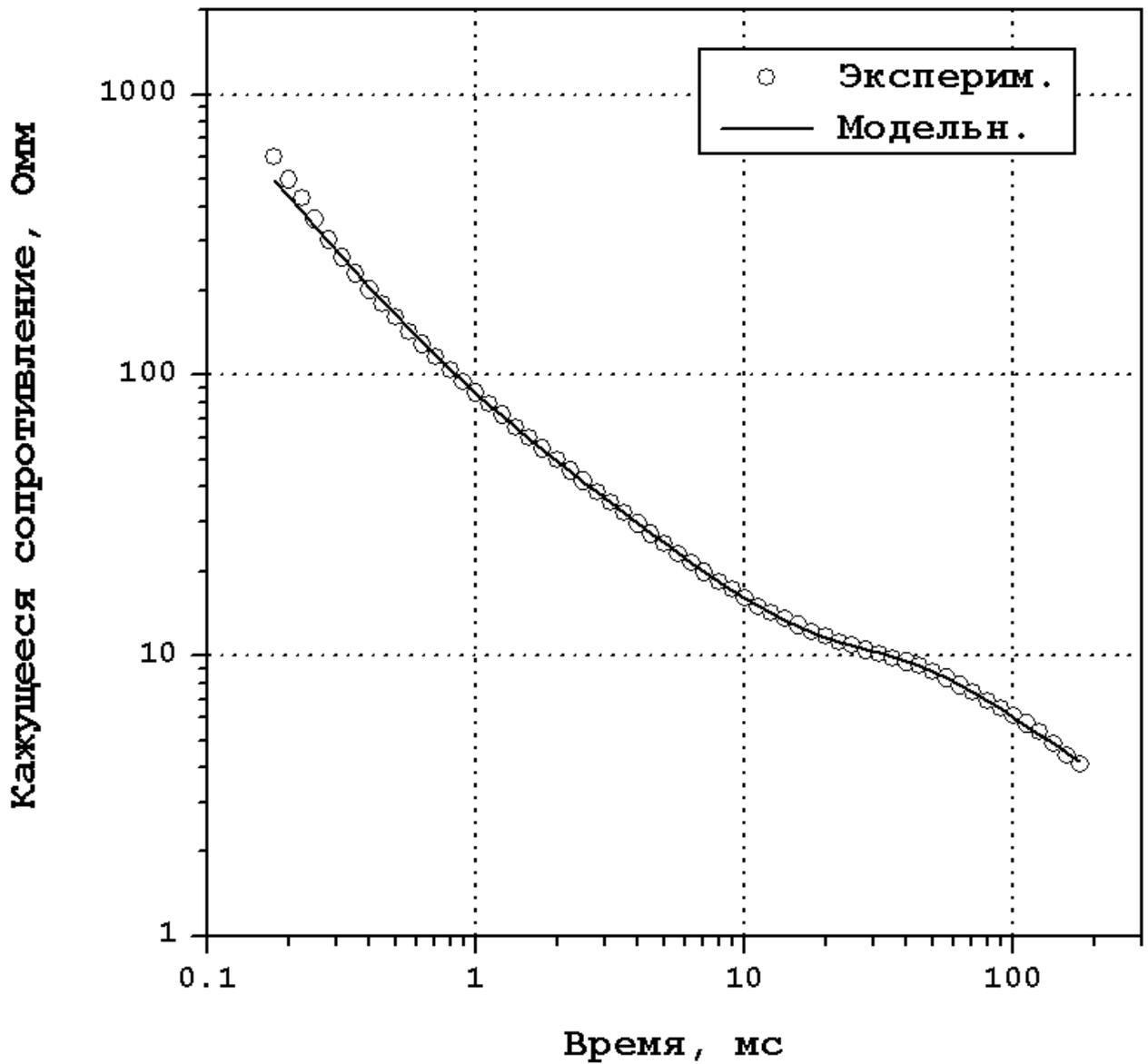
Среднеквадратичная ошибка - 6.6e-2



Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	1714.	180.
2	6.9	89.5
3	3.5	297.
4	0.74	

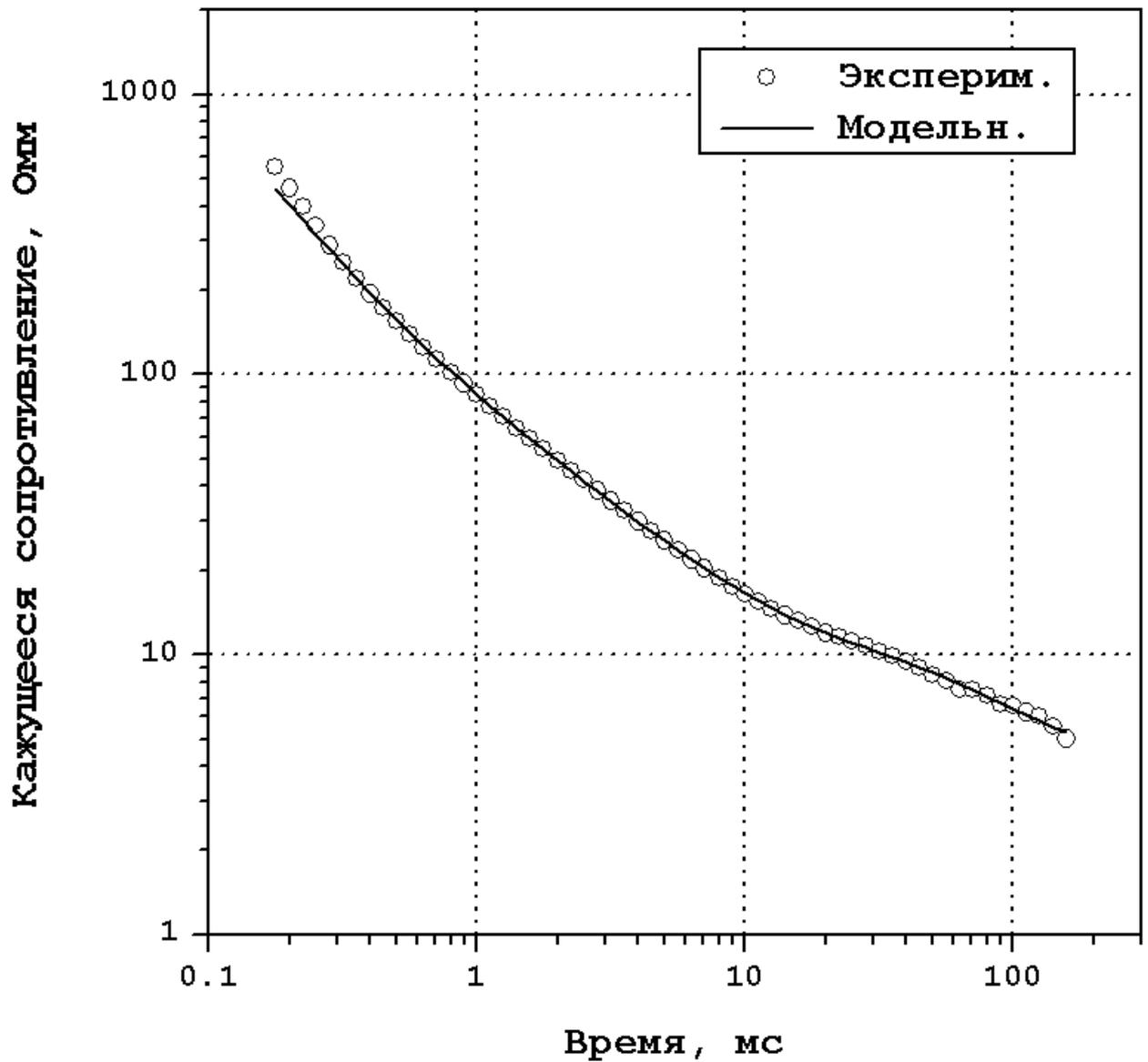
Среднеквадратичная ошибка - 4.1e-2



Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	914.	177.
2	5.6	96.9
3	2.9	272.5
4	0.35	

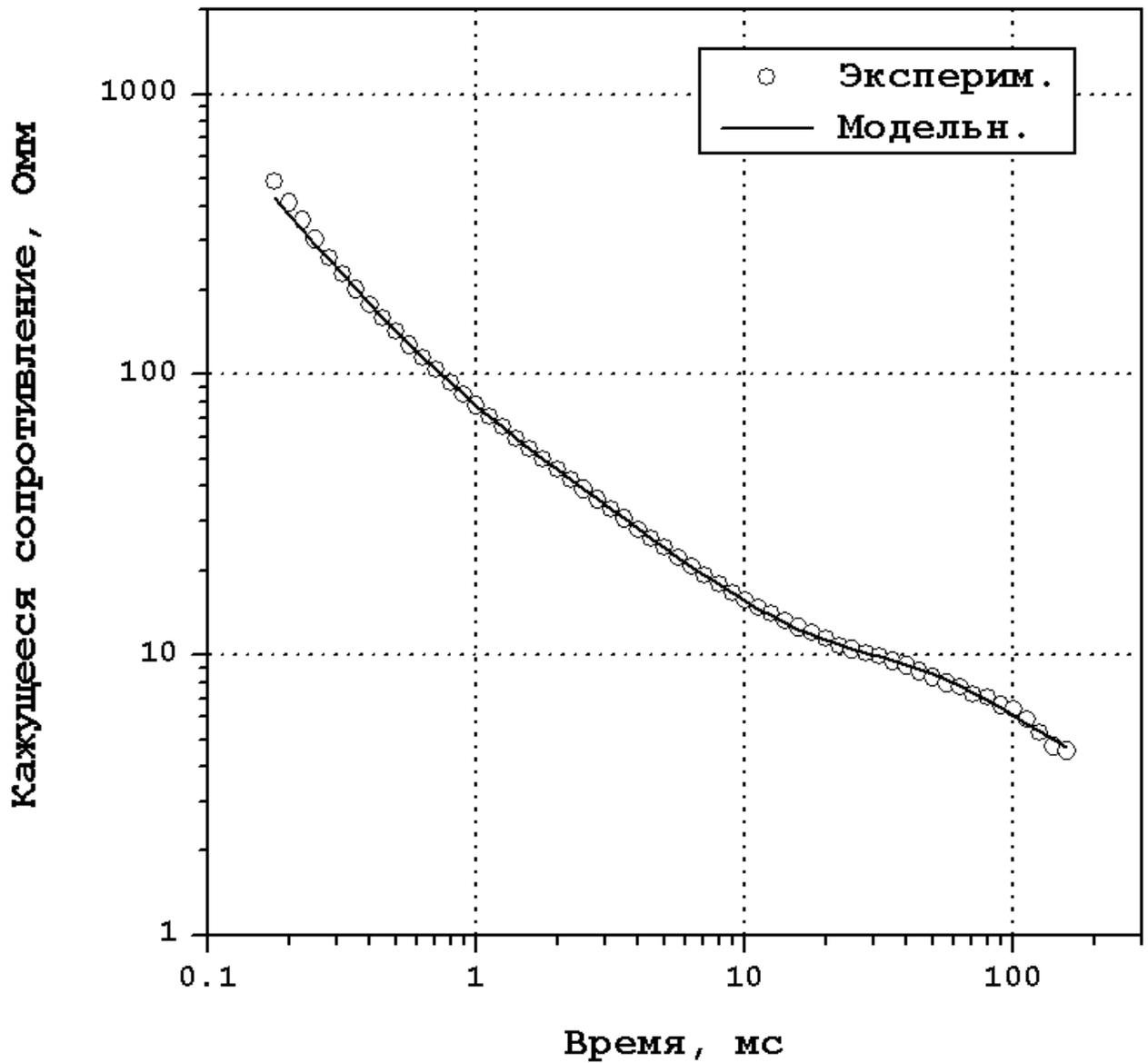
Среднеквадратичная ошибка - 6.0e-2



Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	702.	174.
2	6.5	92.1
3	3.7	318.8
4	1.1	

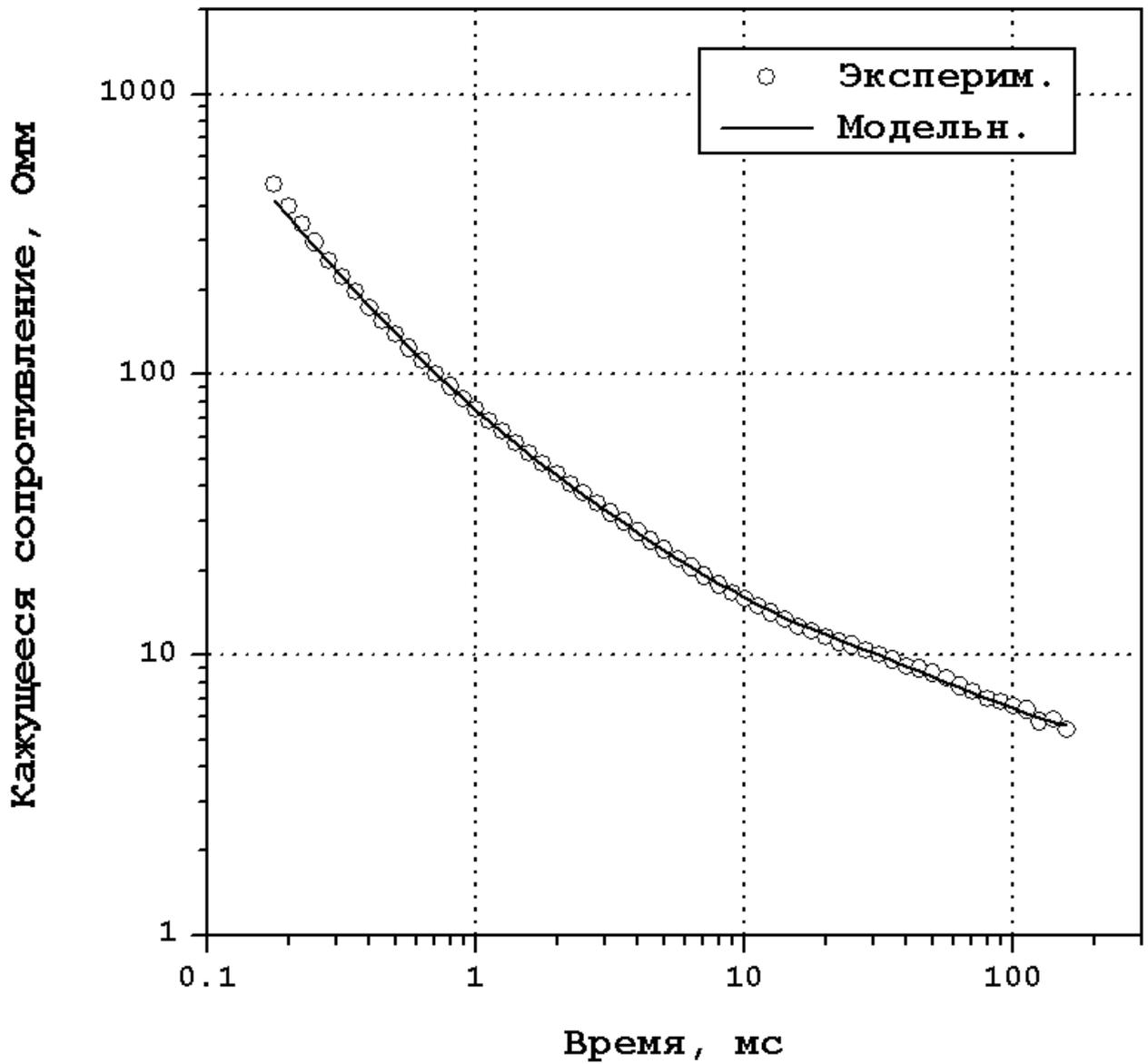
Среднеквадратичная ошибка - 6.2e-2



Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	1512.	163.
2	6.4	101.
3	3.1	300.
4	0.5	

Среднеквадратичная ошибка - 4.7e-2

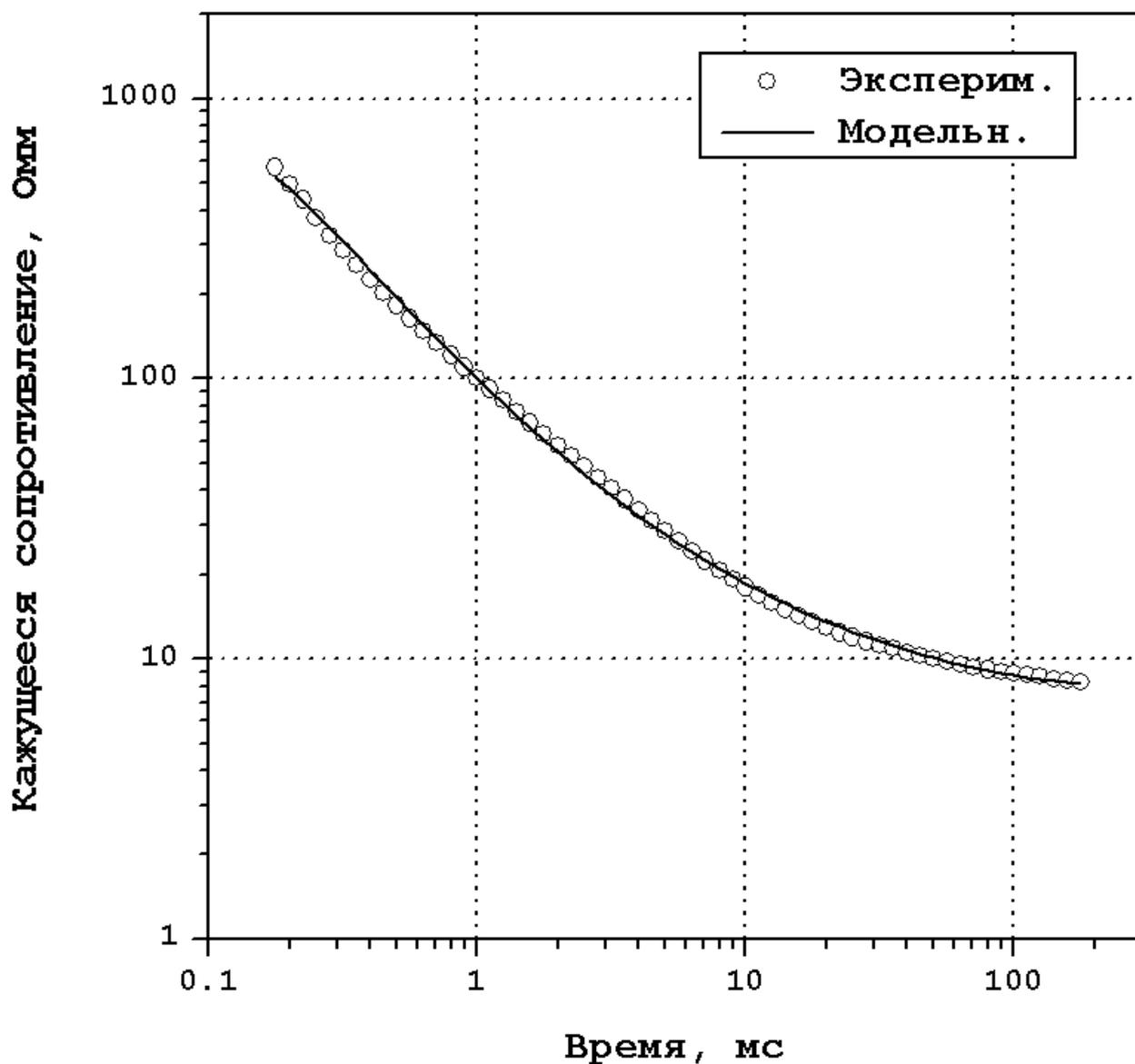


Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	1445.	162.
2	6.4	107.
3	4.1	279.
4	2.	

Среднеквадратичная ошибка - 4.3e-2

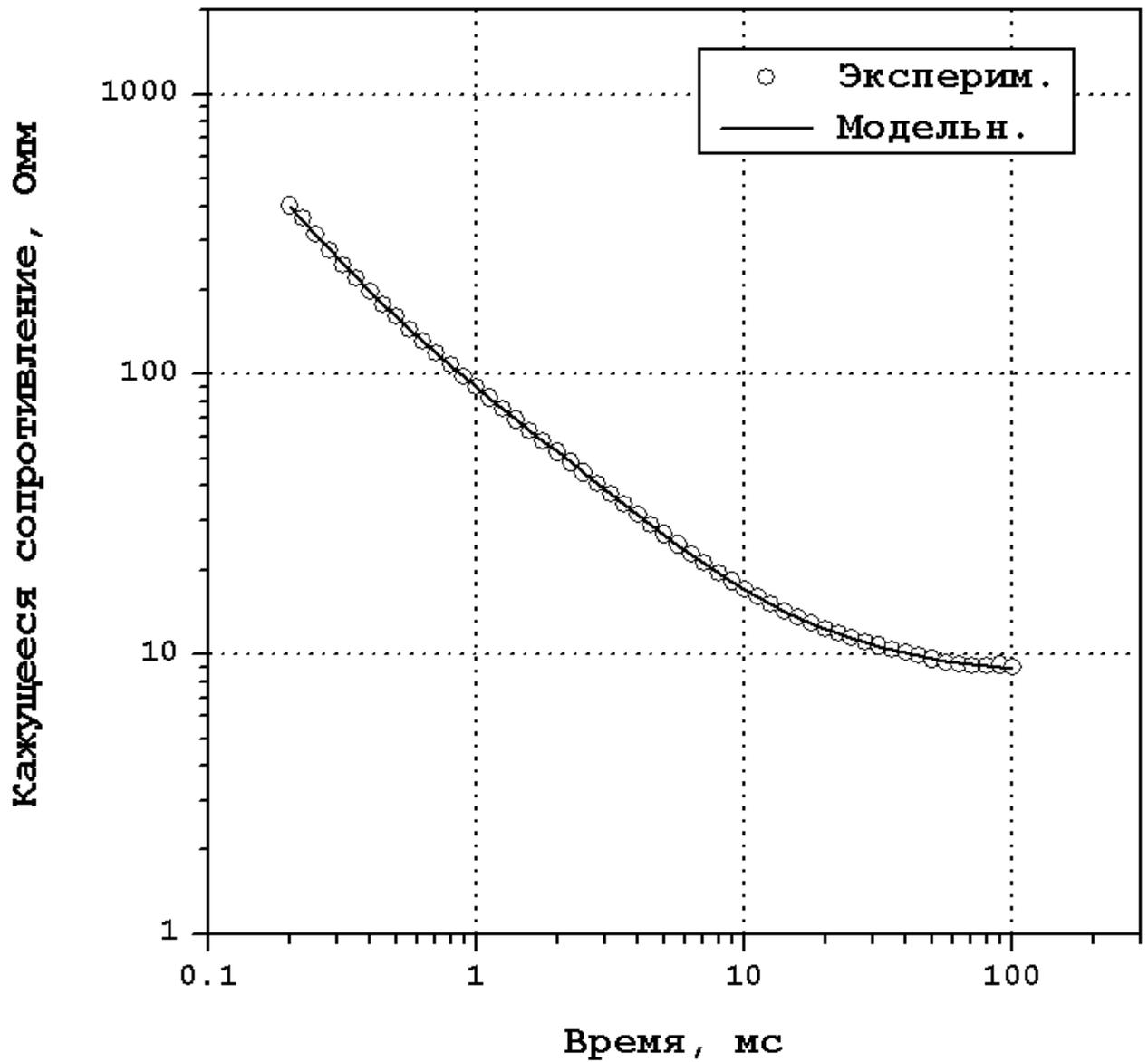
Kraton3\_01a-.TEM - имя файла экспериментальных данных



Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	620.	102.6
2	494.	87.6
3	47.6	21.3
4	5.7	

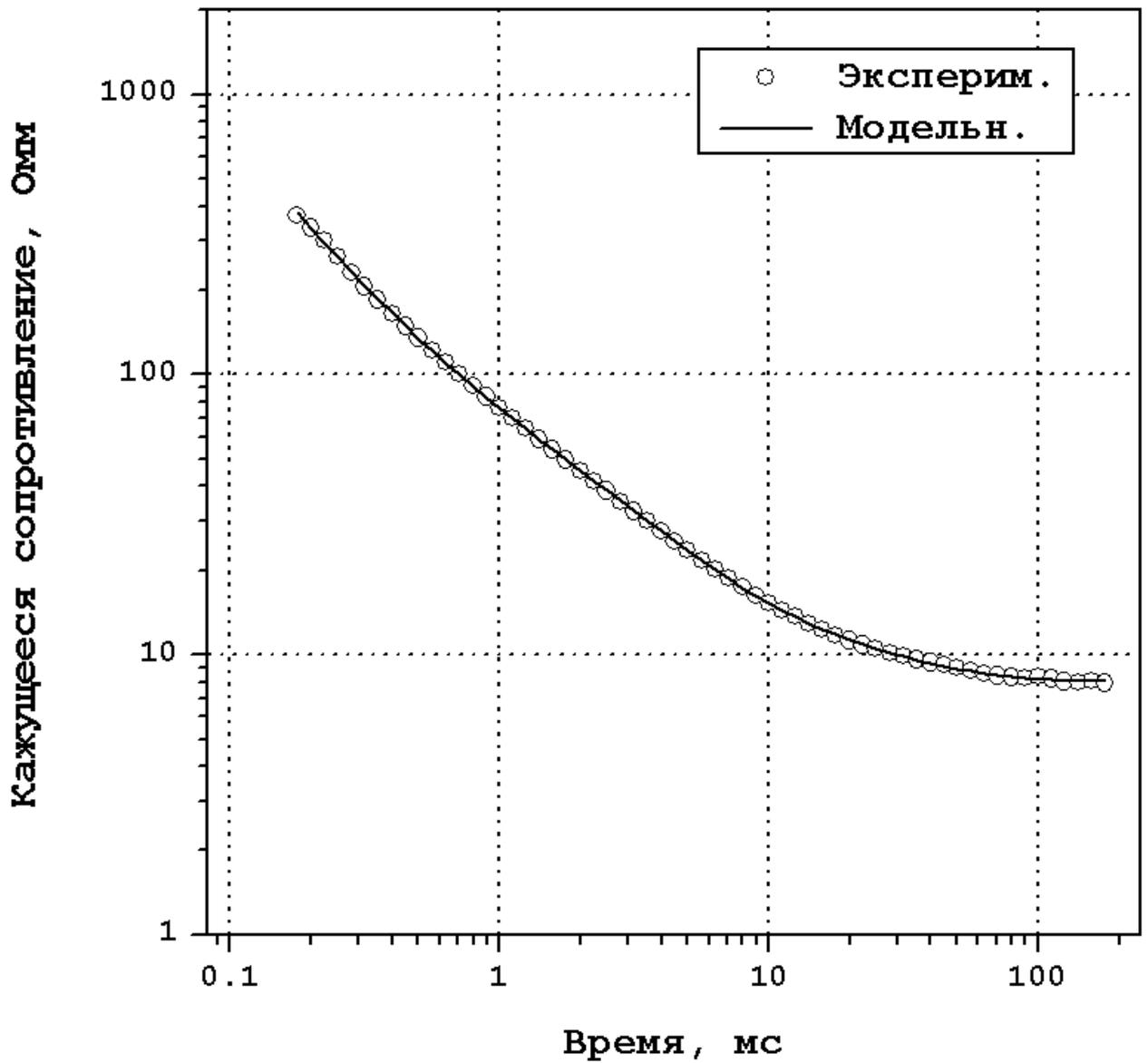
Среднеквадратичная ошибка - 6.0e-2



Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	800.	175.
2	8.	90.
3	4.2	135.
4	7.4	

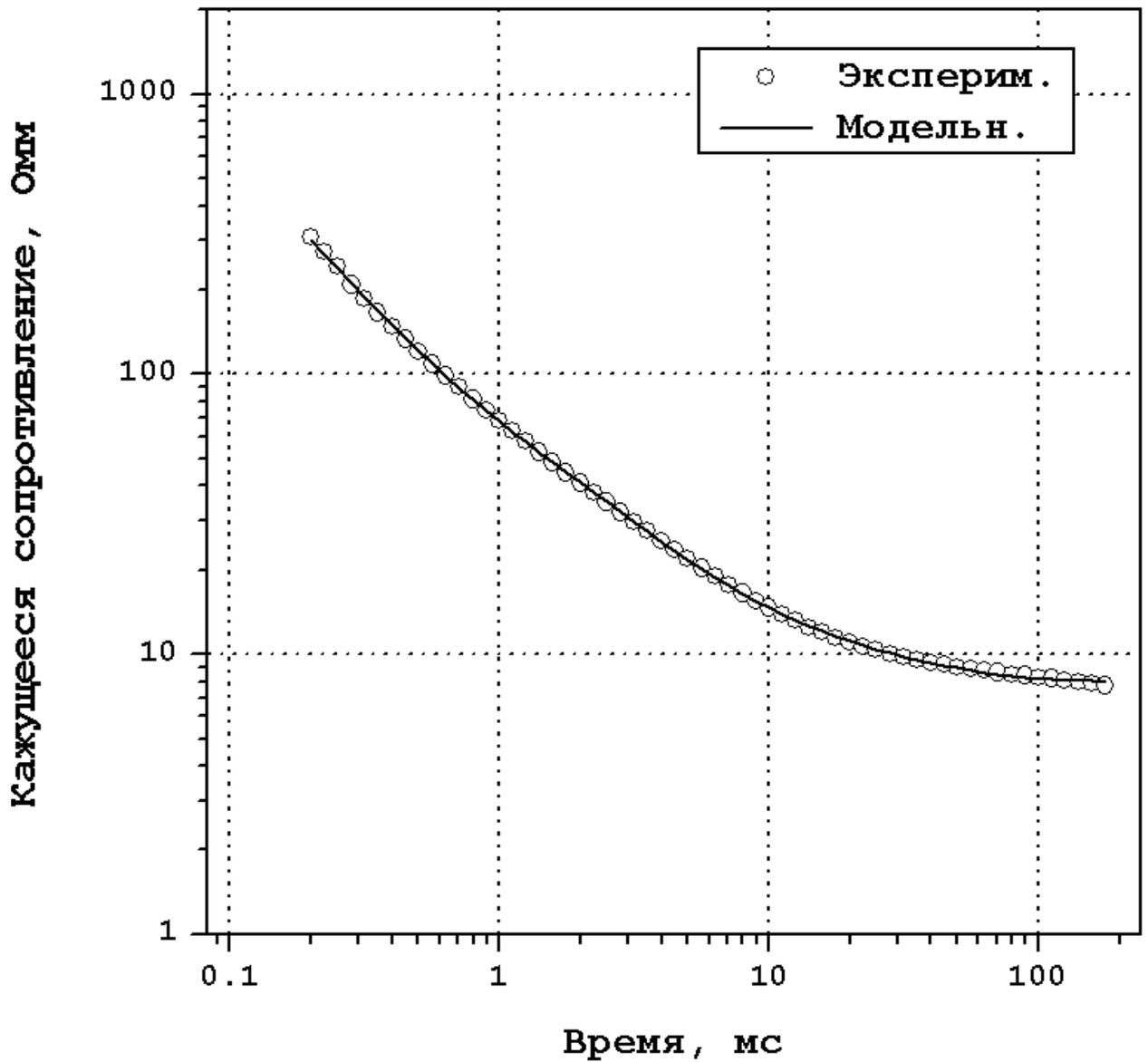
Среднеквадратичная ошибка -  $9.5e-3$



Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	699.	159.
2	7.5	91.1
3	3.9	111.
4	6.5	

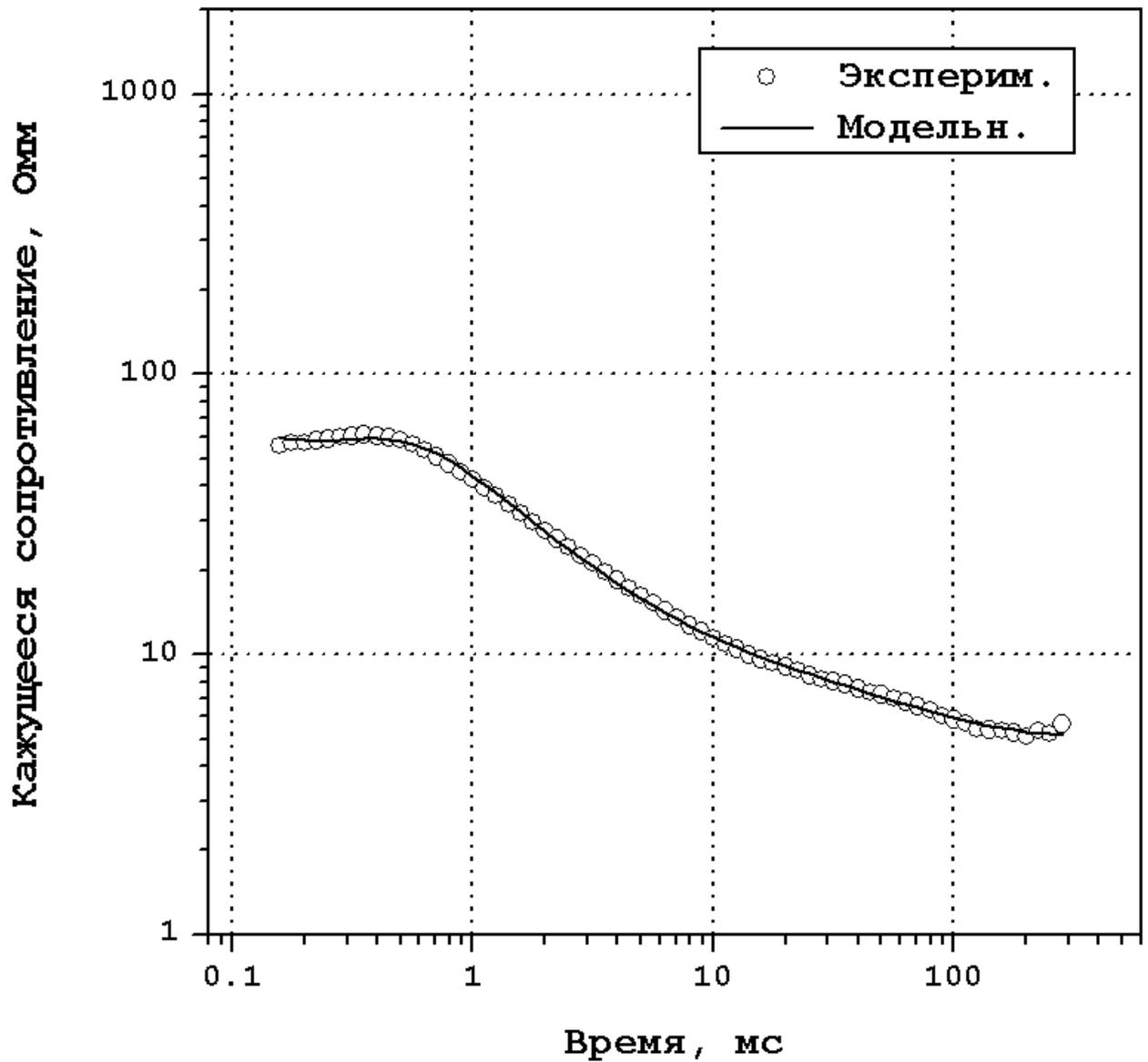
Среднеквадратичная ошибка - 1.0e-2



Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	735.5	150.
2	7.1	101.
3	3.8	73.7
4	6.4	

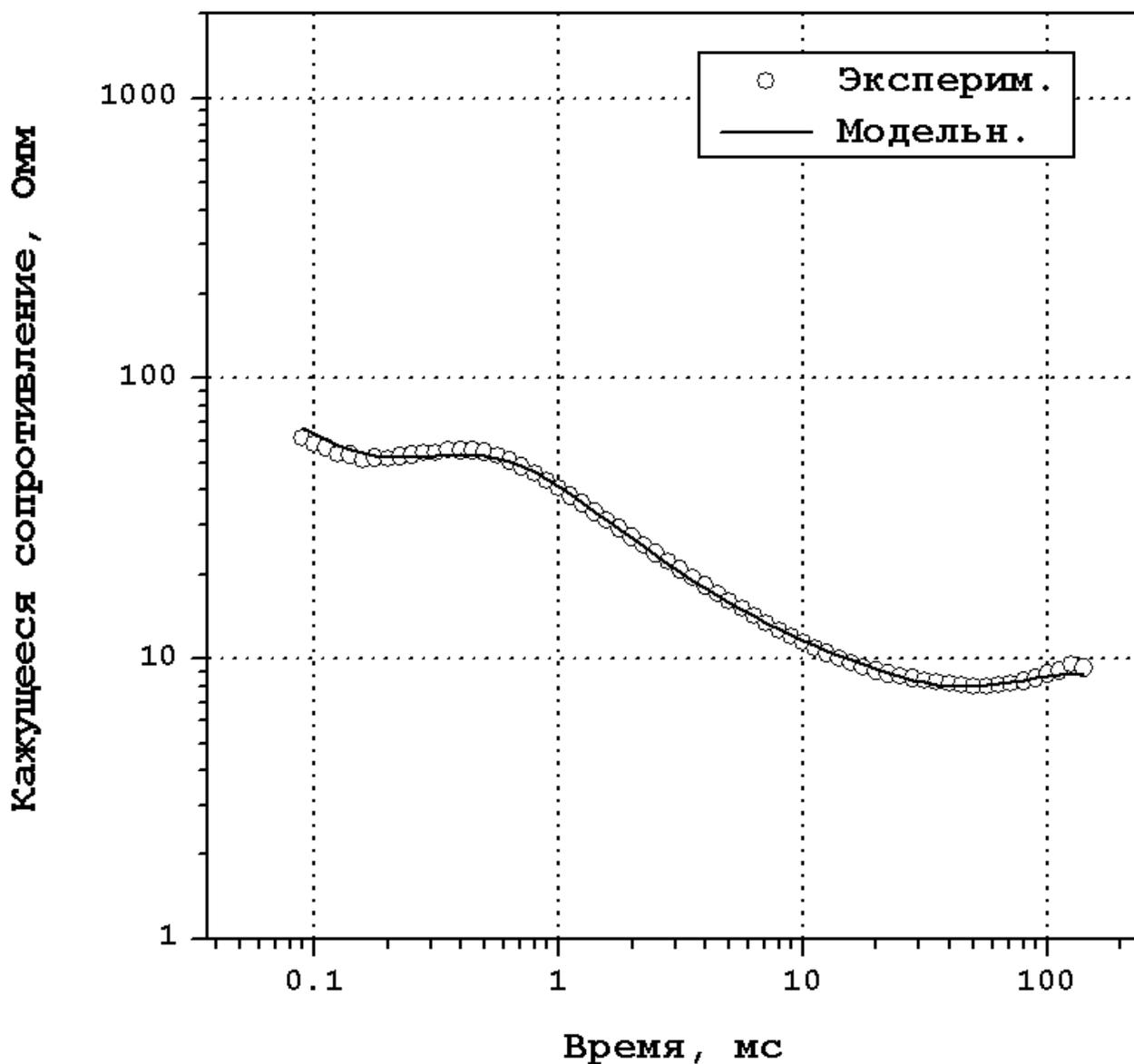
Среднеквадратичная ошибка - 1.6e-2



Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	43.6	108.
2	715.	35.2
3	4.5	356.
4	2.9	

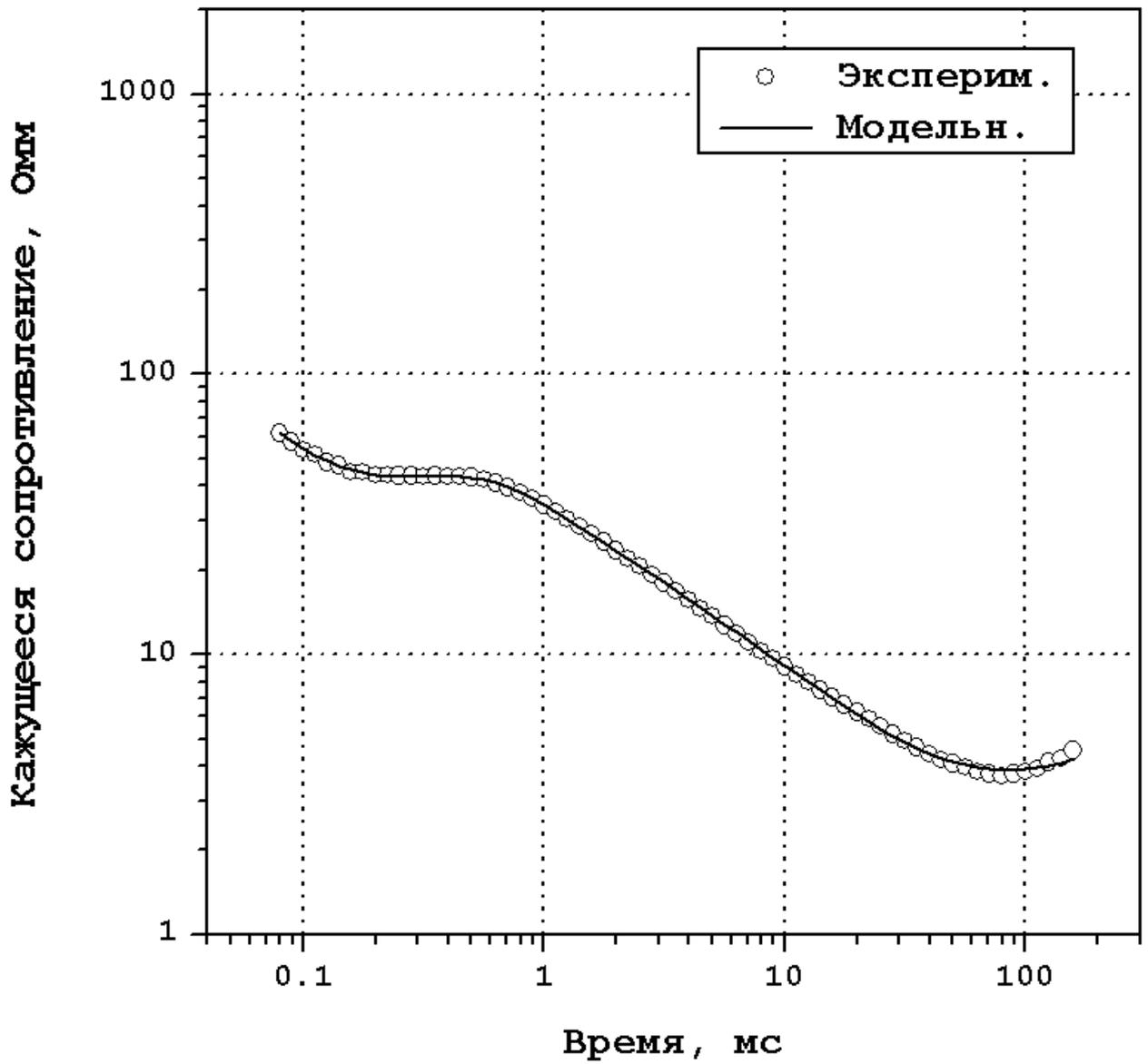
Среднеквадратичная ошибка -  $3.7e-2$



Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	38.8	97.
2	707.	43.3
3	4.8	721.
4	0.22	

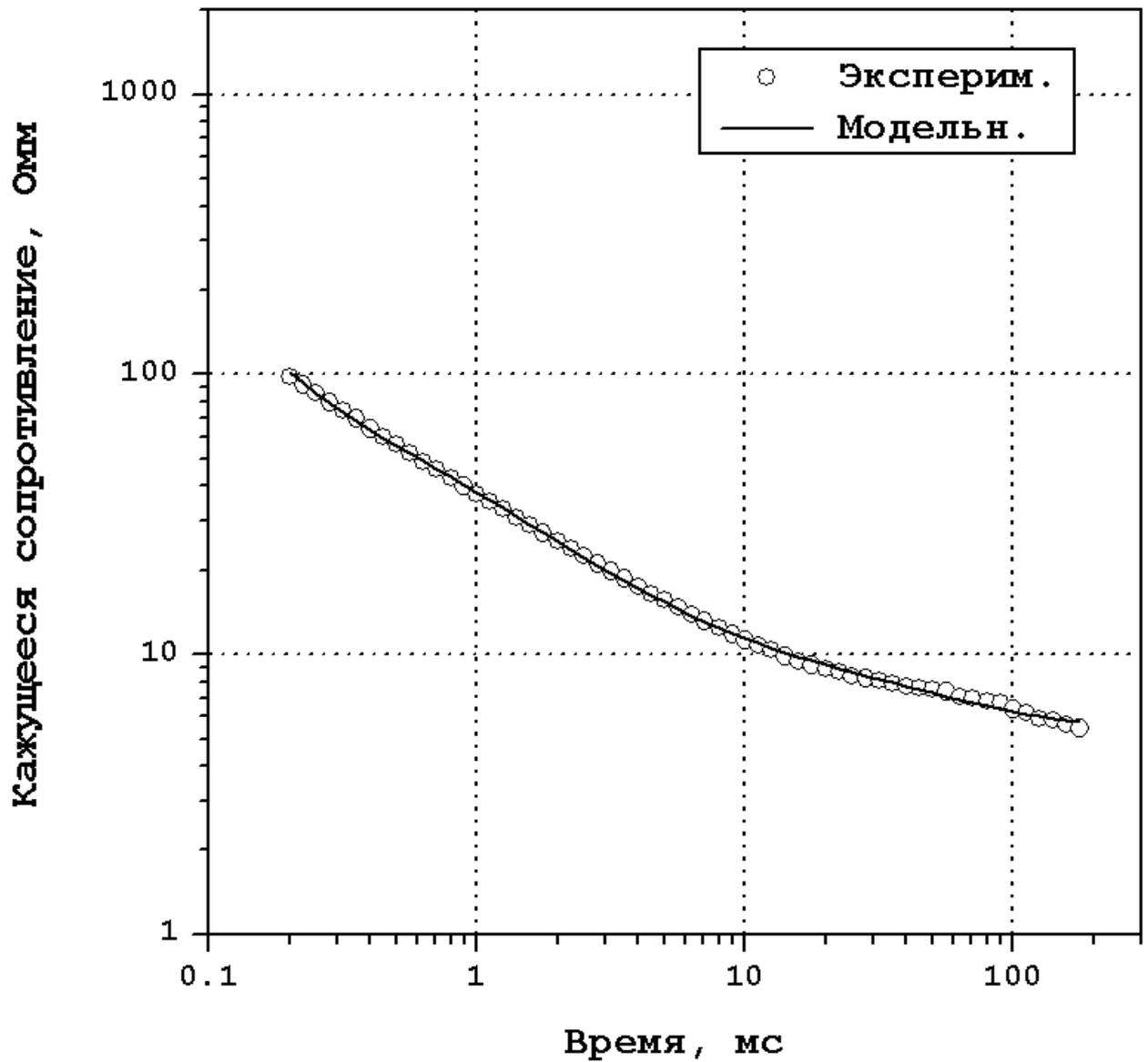
Среднеквадратичная ошибка - 4.4e-2



Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	27.5	31.8
2	38.8	98.2
3	4.	78.6
4	2.	256.
5	79.	

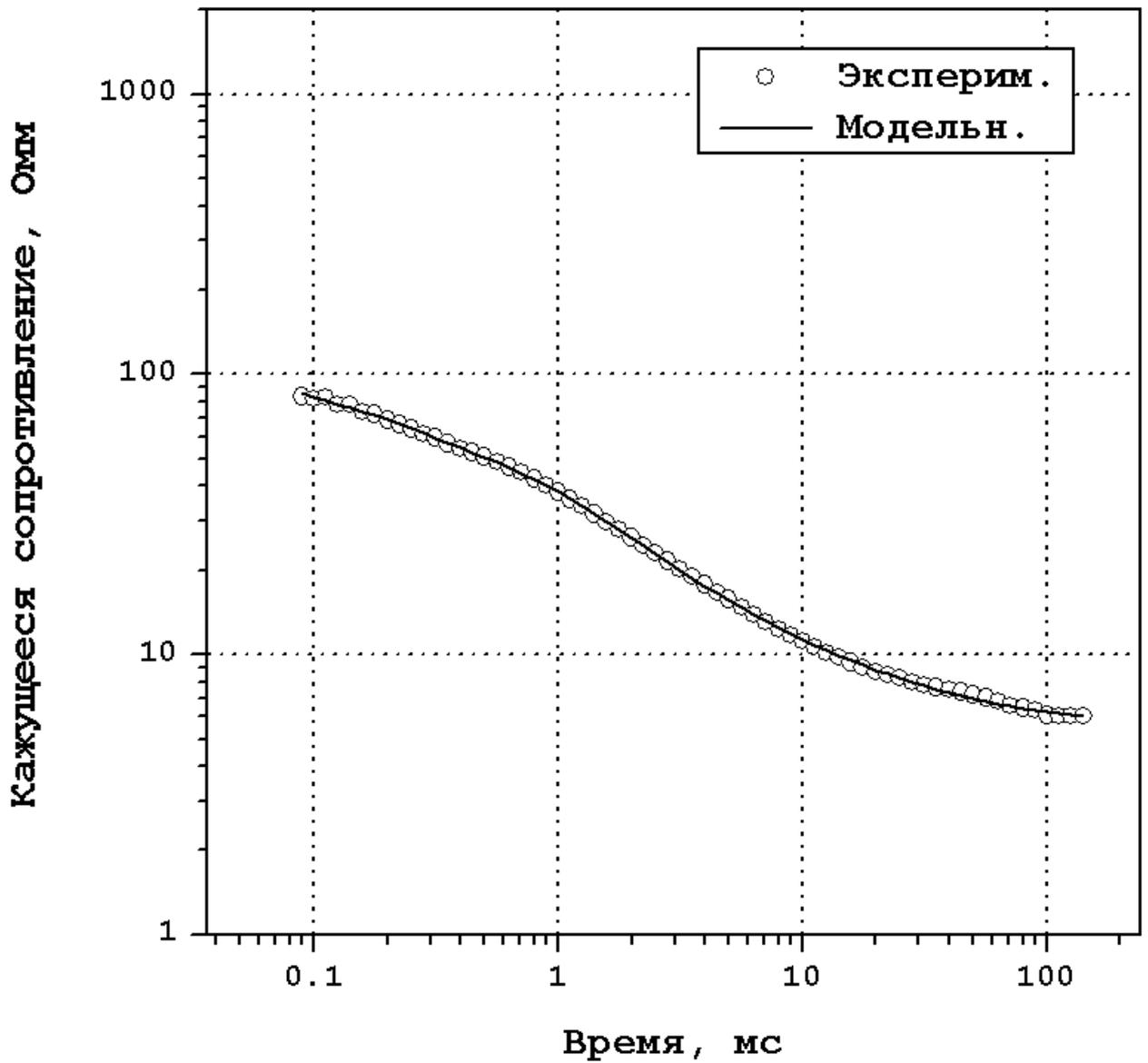
Среднеквадратичная ошибка - 2.6e-2



Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	778.	70.7
2	13.	85.3
3	4.8	354.
4	3.2	

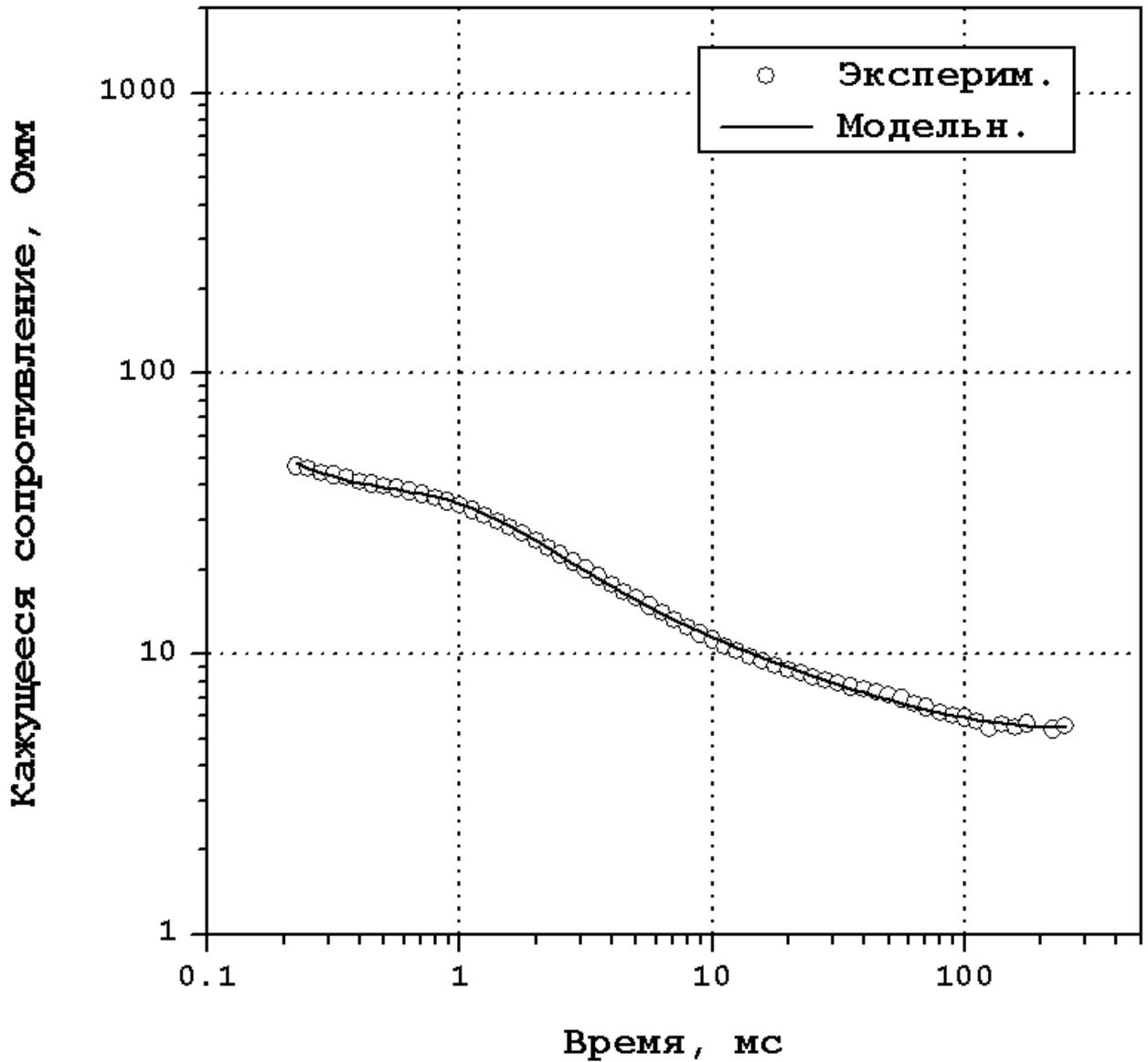
Среднеквадратичная ошибка - 3.2e-2



Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	67.3	5.9
2	51.4	87.4
3	13.7	69.4
4	4.4	

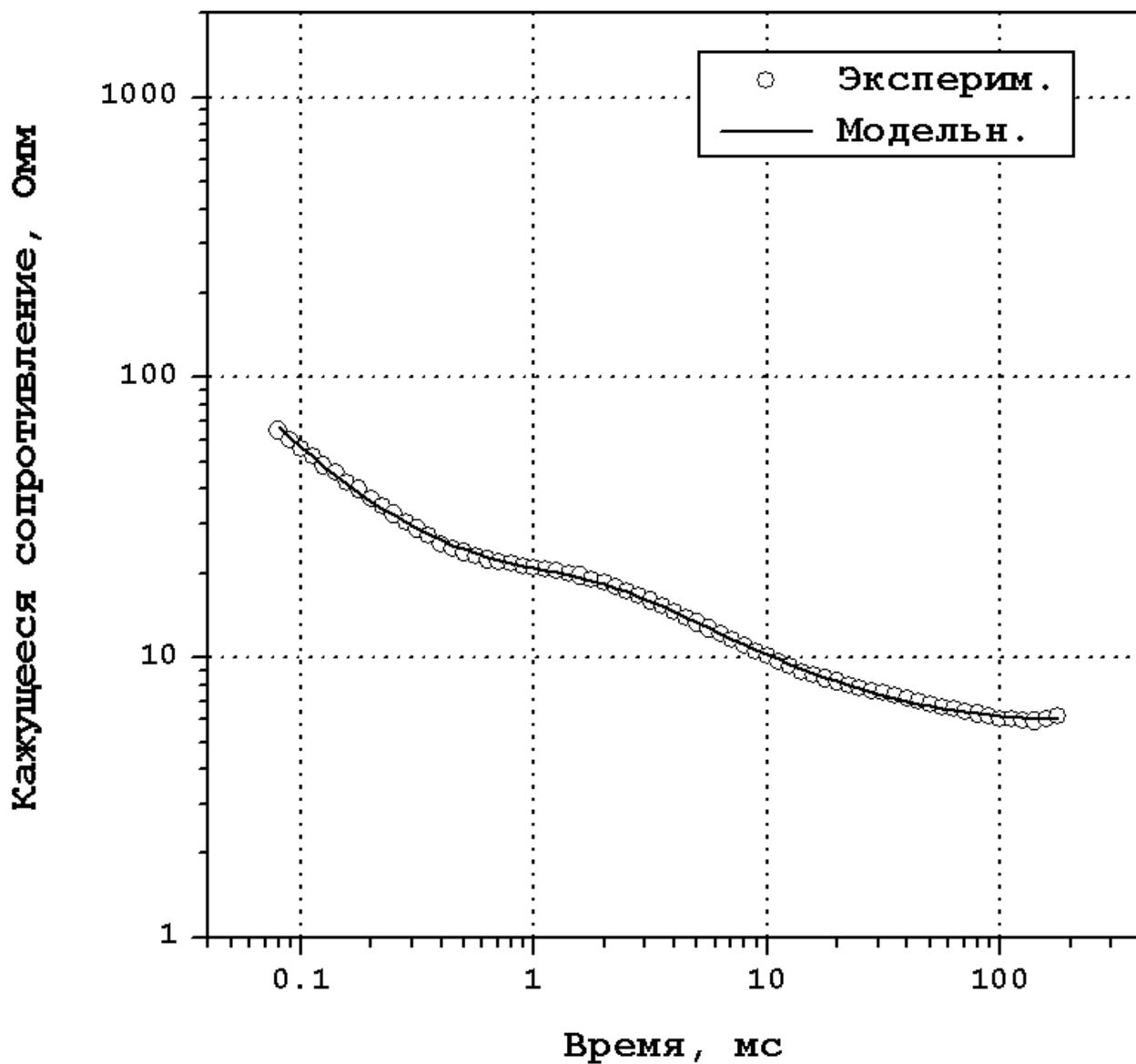
Среднеквадратичная ошибка - 2.1e-2



Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	57.8	30.8
2	24.	127.
3	4.5	252.5
4	3.6	

Среднеквадратичная ошибка - 2.7e-2

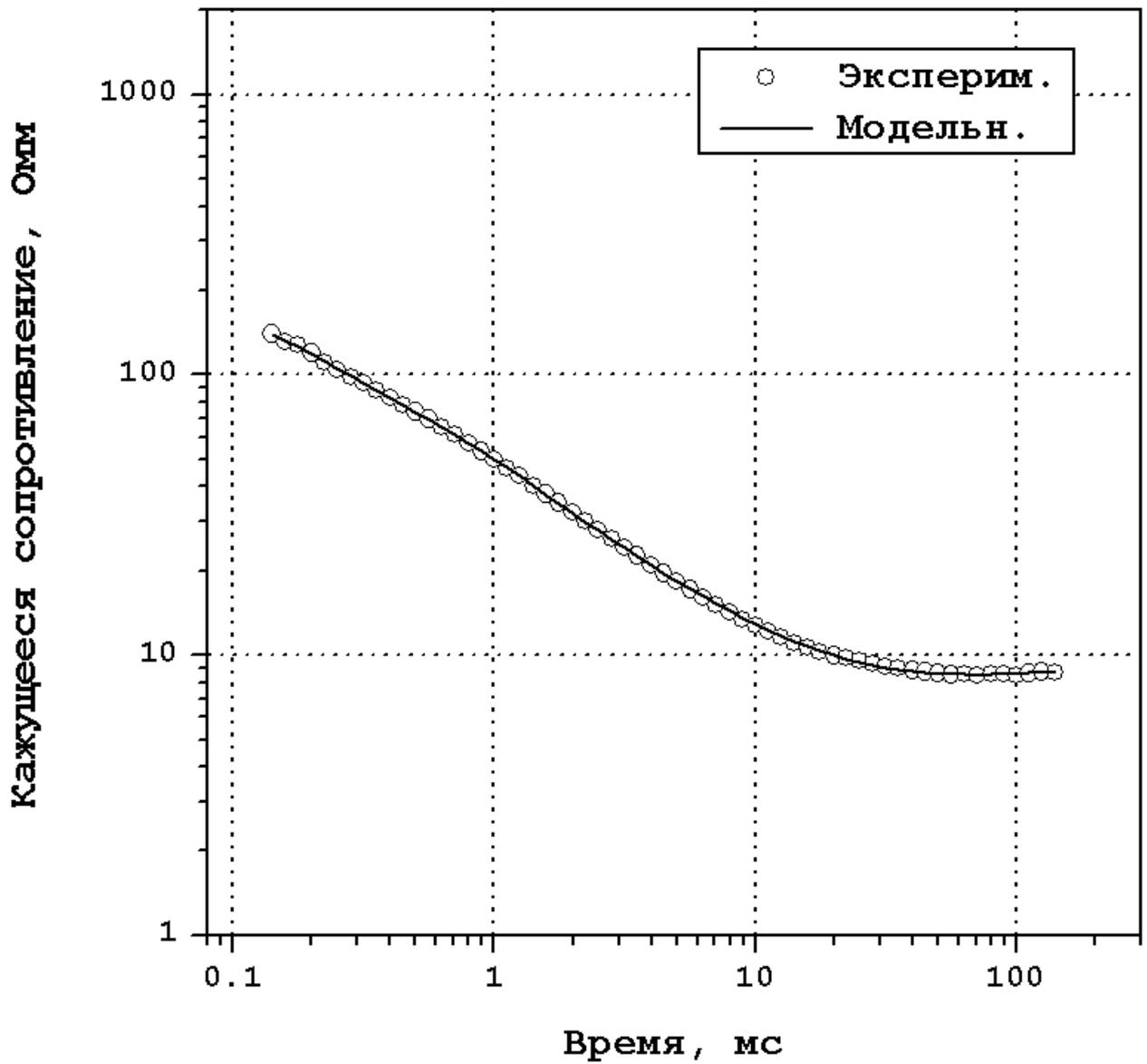


Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	114.6	52.3
2	35.7	217.6
3	11.2	

Среднеквадратичная ошибка - 2.5e-2

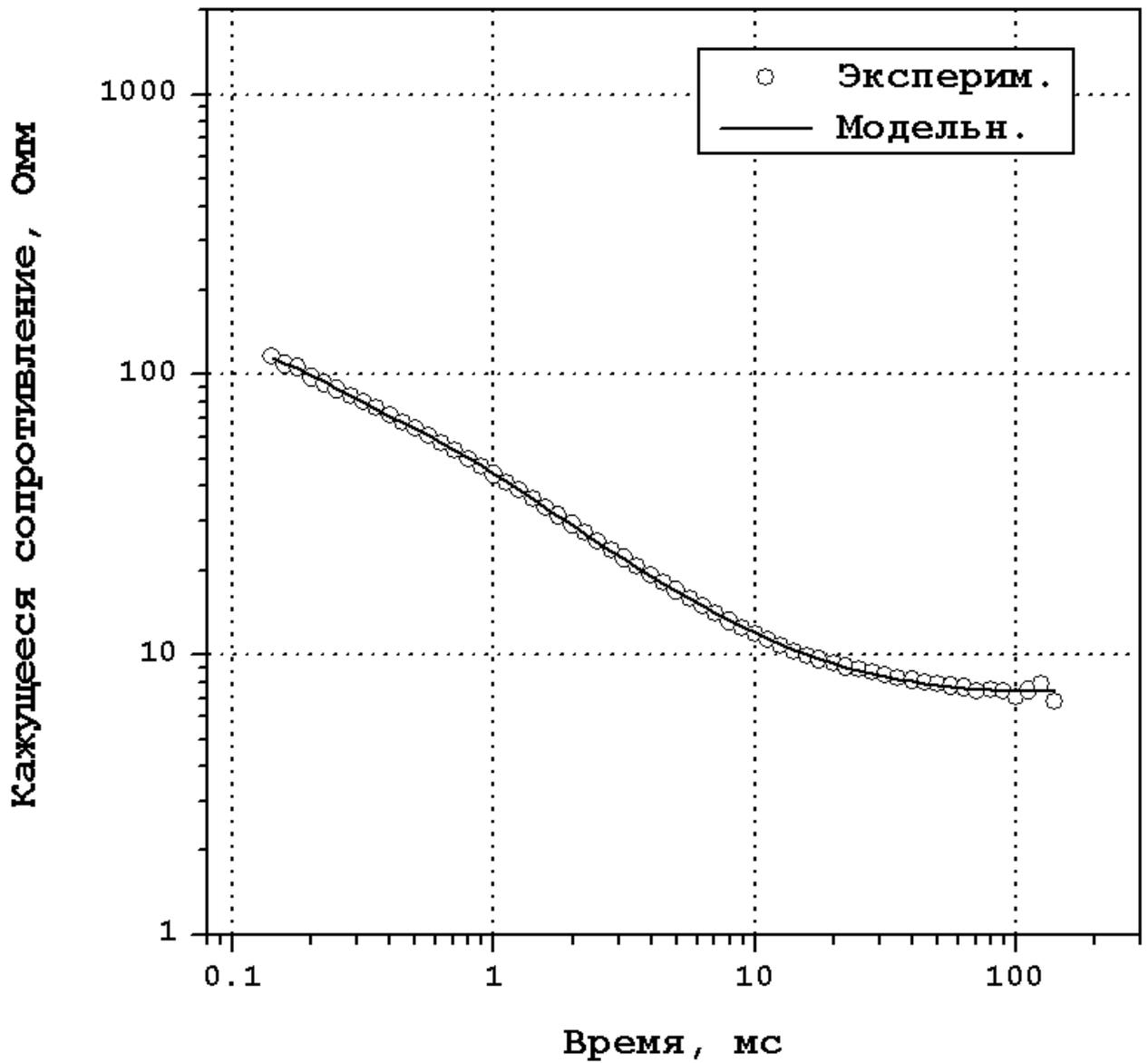
Профиль-III



Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	112.	104.
2	14.7	73.1
3	4.9	240.
4	9.8	

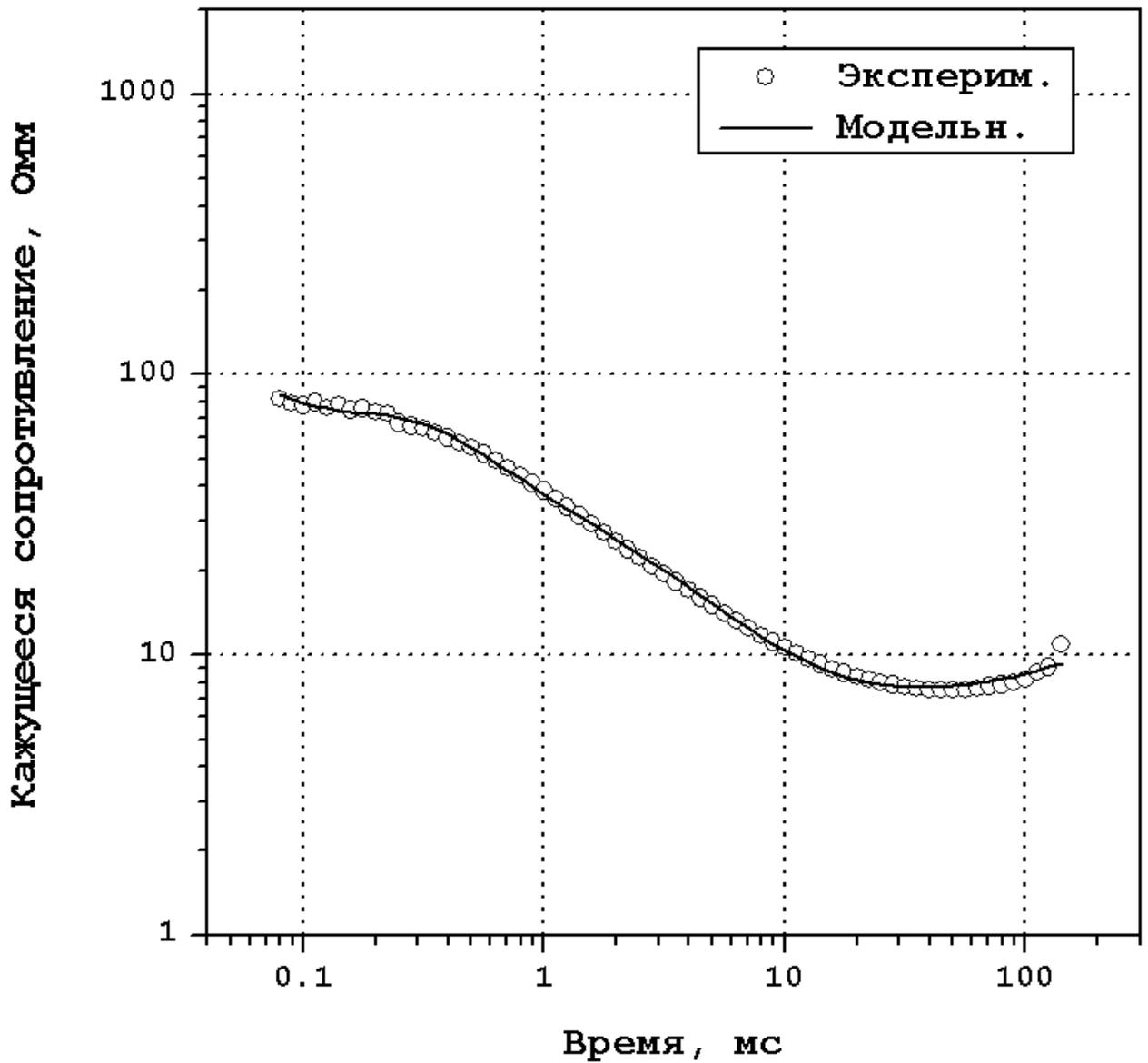
Среднеквадратичная ошибка - 1.0e-2



Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	86.2	98.3
2	13.5	71.
3	4.6	220.
4	6.7	

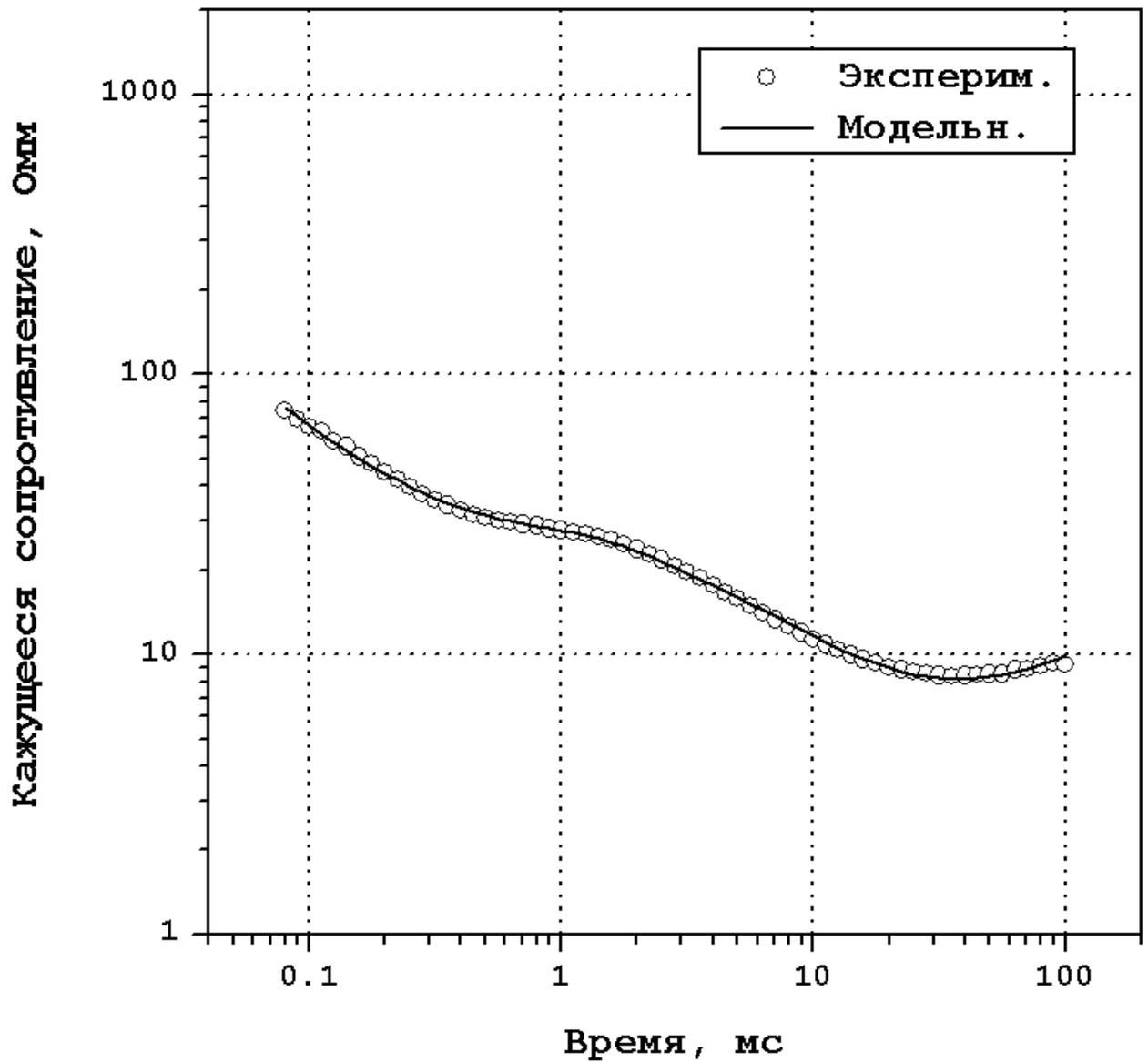
Среднеквадратичная ошибка - 2.5e-2



Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	52.	117.
2	6.8	85.
3	3.6	151.
4	16.8	

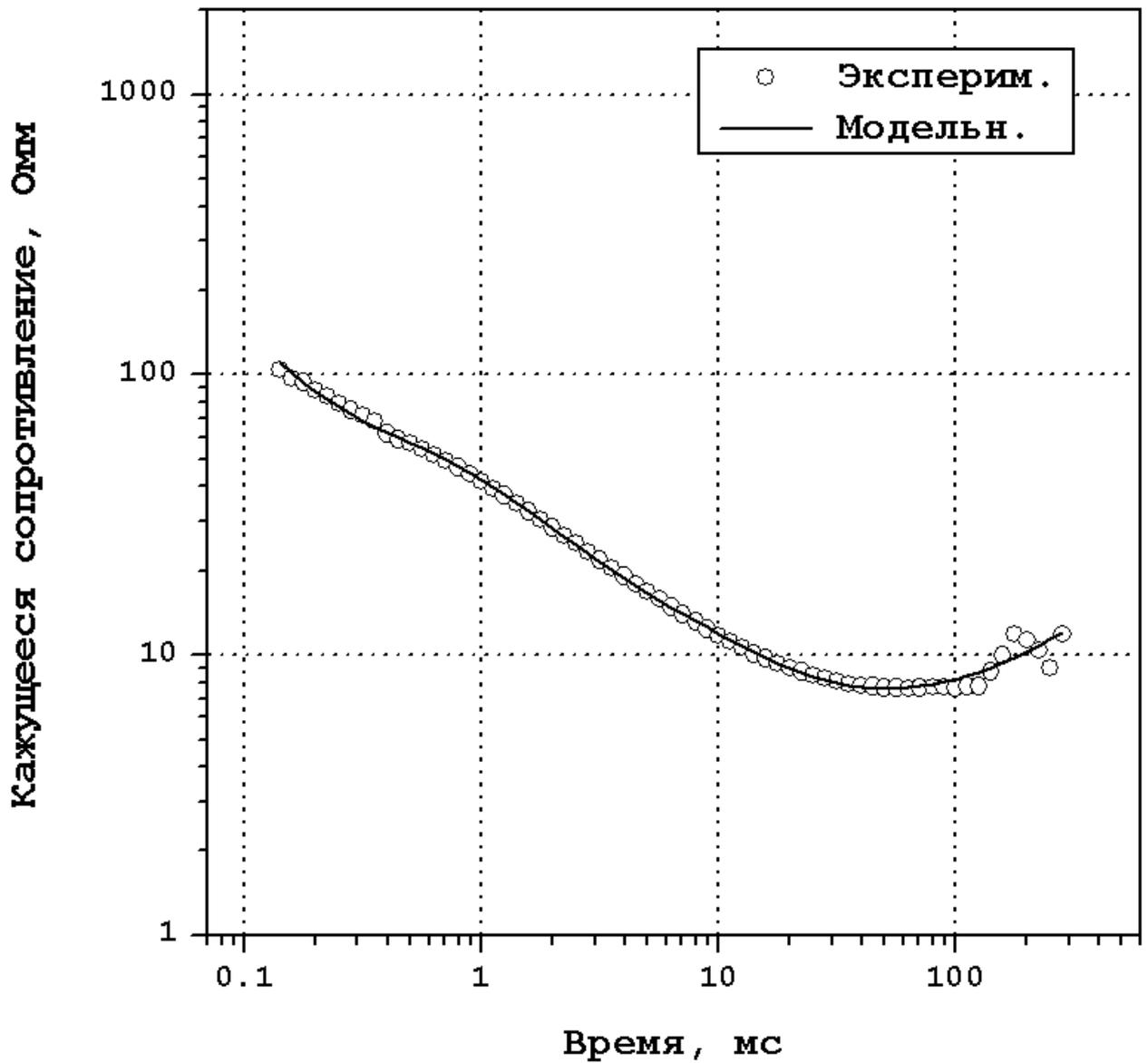
Среднеквадратичная ошибка - 5.1e-2



Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	37.8	38.6
2	18.5	136.5
3	4.9	312.6
4	1941.	

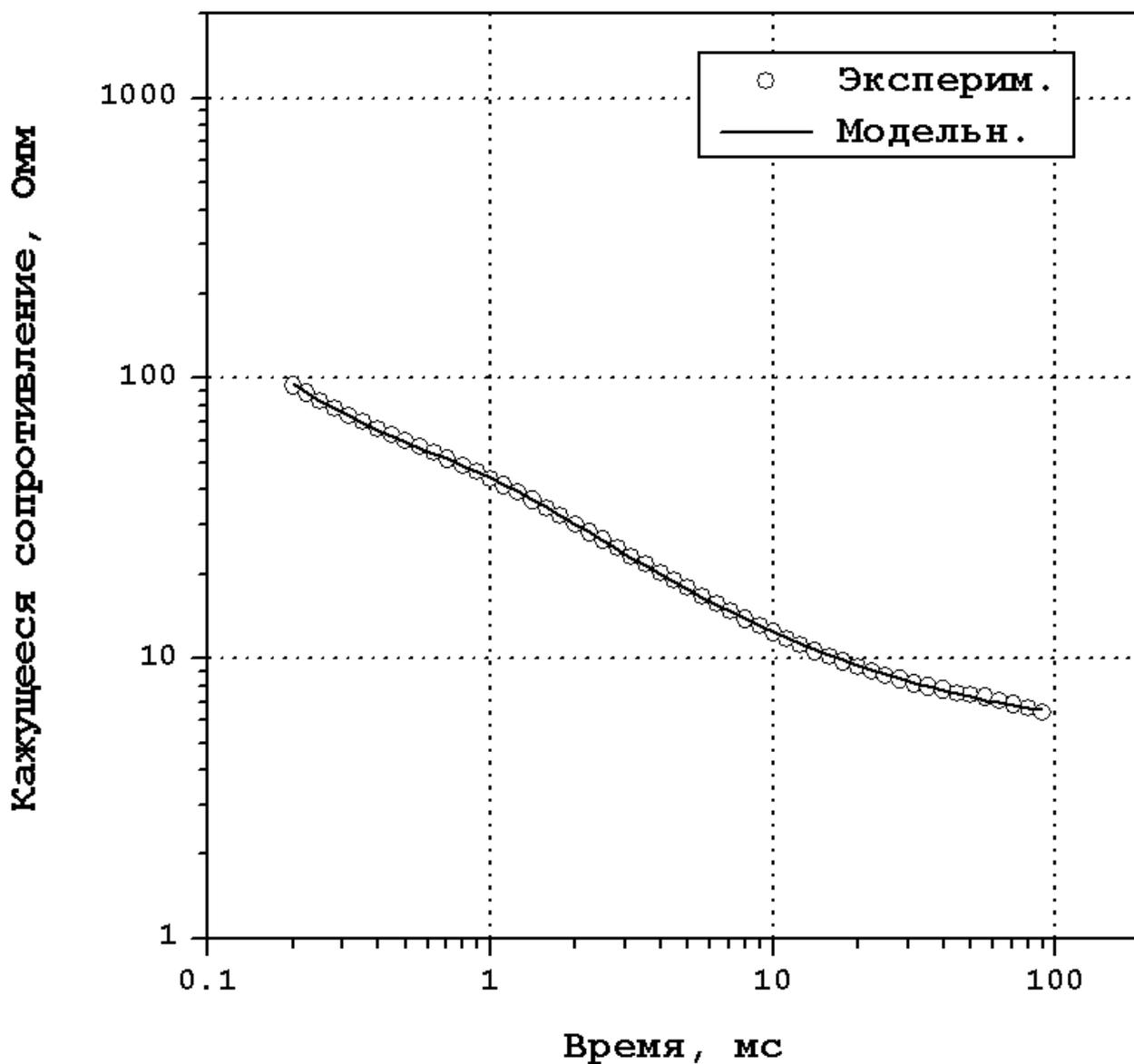
Среднеквадратичная ошибка - 2.9e-2



Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	1775.	53.
2	20.6	109.
3	4.7	357.
4	38.6	

Среднеквадратичная ошибка -  $7.1e-2$



Геоэлектрическая модель.

№	Сопротивление, Ом	Мощность слоя, м
1	112.	81.
2	16.4	98.
3	4.4	

Среднеквадратичная ошибка - 1.6e-2