

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**

Специальность 25.00.36 –Геоэкология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Томск - 2015 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ) и в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С.Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН)

Научный консультант: доктор геолого-минералогических наук, профессор
Рихванов Леонид Петрович.

Официальные оппоненты:

Эпов Михаил Иванович, доктор технических наук, профессор, академик, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск), директор

Гаев Аркадий Яковлевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Оренбургский государственный университет» (ОГУ, г. Оренбург), профессор кафедры геологии

Птицын Алексей Борисович, доктор геолого-минералогических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук (ИПРЭК СО РАН, г. Чита), главный научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский государственный горный университет» (УГГУ, г. Екатеринбург)

Защита диссертации состоится «15» декабря 2015 г. в 14 час 00 мин на заседании совета Д 212.269.07 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Ленина, 30 (20-й корпус, ауд. 504).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ТПУ (г. Томск, ул. Белинского, 55) и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/914/worklist>

Автореферат разослан « ___ » _____ 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
к.г.- м.н., доцент



Л.В. Жорняк

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследований. Одной из важных проблем геоэкологии является распространение радиоактивных элементов в среде обитания человека [Осипов, 1993, Рихванов, 2009 и др.]. В рамках государственной программы СССР №7 «Ядерные взрывы для народного хозяйства» с 15.01.1965 г. по 06.09.1988 г. было проведено 124 взрыва с использованием 135-ти ядерных взрывных устройств (ЯВУ) общей мощностью 1783.69 кт в тротиловом эквиваленте (ТЭ) [Мирные..., 2001, с. 35].

Подземный ядерный взрыв (ПЯВ) является одним из самых сильных техногенных воздействий, когда-либо оказанных человеком на геологическую среду [Яблоков, 2003, Адушкин, Спивак, 2007 и др.]. 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 и др.]. 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. 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], 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. Естественные и вновь появившиеся после взрыва техногенные геологические структуры (геоструктуры) разуплотнения горных пород с высокой флюидопроницаемостью могут привести к распространению радионуклидов в геологической среде и выходу на поверхность земли. Только зная современное состояние 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. Объекты ПЯВ стали доступны широкой научной общественности после их рассекречивания в 1990-ые гг. Основное внимание было обращено оценке: - радиационной обстановки и дозовых нагрузок [Мясников и др., 1998, Смирнов и др., 2000, Дубасов и др., 2005, Касаткин и др., 2009 и др.], радиоактивного загрязнения ландшафтов и миграции радионуклидов под воздействием экзогенных и биогенных процессов [Ложников, Сотников, 1998, Гедеонов и др., 2004, Рамзаев и др., 2009, 2010, Медведев и др., 2005, Тапхаева и др., 2011 и др.], в том числе на аварийных объектах «Кристалл» и «Кратон-3» в Якутии [Бурцев, Колодезникова, 1997, Гедеонов и др., 2004, Степанов и др., 2003, 2004, Чевычелов, Собакин, 2004, Gedeonov et. al., 2002, Ramzaev et. al., 2007, 2009 и др.]. Было проведено численное моделирование диффузии радионуклидов в сезонно-талом слое загрязненных ландшафтов ПЯВ «Кратон-3» [Пермяков, Аммосов, 2003] и численное обоснование насыпи-кургана для наращивания мерзлоты и иммобилизации радионуклидов [Киселев и др., 2004, 2010]. Единичные работы посвящены влиянию ПЯВ на живую составляющую экосистем [Тестов и др., 2000, Колесникова и др., 2005 и др.].

Вместе с тем ряд исследователей обратили внимание на геологическую среду районов ПЯВ. Выявлено, что как выдавливание на поверхность высокорadioактивных рассолов через устья боевых скважин на Астраханском газоконденсатном месторождении [Голубов, 1994, Геворкян, Голубов, 1998], так и образование воронок проседания [Шахиджанов, Кирюхина, 2005] обусловлены сокращением объемов полостей взрывов и другими поствзрывными процессами перестройки вмещающей геологической среды. После взрывов зафиксированы как практически мгновенные, так и замедленные, долгосуществующие изменения флюидодинамического режима и состава подземных вод на удалении от 3 до 40 км от объектов ПЯВ [Пиннекер, Шенькман, 1995, Горбунова, Спивак, 1997, Мельников и др., 2000, Горбунова, 2007, Вдовыкин, 2010 и др.]. Проведен анализ геолого-географических условий ПЯВ в Якутии [Микуленко и др., 2004, 2006], измерялись естественные геофизические поля при взрыве «Нева-4» [Стогний, 1998], определяли эманацию радона в районе ПЯВ «Вятка», «Нева-3» [Ковалев, Ложников, 2004], высказано предположение о возможной миграции радионуклидов из полости взрыва «Кристалл» в карьер кимберлитовой трубки «Удачная» [Голубов, 2004].

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 и др.]. 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 радиоэкогеохимических 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. 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 НППГА «Луч» при участии автора. С помощью GIS-методов автором созданы GIS-базы данных, полученных в ходе НИР, на основе спутниковых снимков Landsat. Интерпретация оригинальных радиоэкогеохимических и геофизических данных, написание научных статей, отчетов, разработка практических рекомендаций выполнены автором.

Фактический материал: В работе использованы результаты зондирования методом переходных процессов 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 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 cajanderi* 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 γ -спектрометрии на полупроводниковых детекторах 1404 определений содержания естественных и искусственных радионуклидов; 169 определений содержания ^{90}Sr с помощью β -радиометрии после предварительного концентрирования радиохимическим методом; 106 определений содержания изотопов ^{238}Pu и $^{239,240}\text{Pu}$ с помощью α -спектрометрии после предварительного концентрирования радиохимическим методом; 256 определений содержания 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.

Достоверность научных результатов обеспечена значительным количеством проб, изученных современными высокоточными аналитическими методами в аккредитированных лабораториях, большим количеством экспериментальных данных с применением апробированных методов измерений и статистических методов анализа, а также глубиной проработки материала. Внутренний контроль аналитических данных проводился по параллельным пробам, для внешнего контроля привлекались лаборатории Санкт-Петербургского НИИРГ, МосНПО «Радон».

Научная новизна работы заключена 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 оценке радиационной обстановки и дозовых нагрузок на поверхности земли, а особенно – оценке 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 радиоэкологического мониторинга районов ПЯВ с обоснованием ключевых участков, периодичности и густоты сети наблюдений.

Разработанные соискателем система радиоэкологического 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 ^3H – в 2-34, ^{90}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», Курчатова (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.

Содержание диссертации. *Глава 1.* Методика исследований;

Глава 2. Особенности геологической среды объектов ПЯВ;

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

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

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

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

Глава 7. Геоэкологические модели геотехногенных систем ПЯВ на территории Якутии;

Глава 8. Геоэкологический мониторинг и пути снижения рисков радиоактивного загрязнения в районах ПЯВ.

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 большую помощь в работе.

Методика исследований.

Для расчетов физико-механического воздействия ПЯВ на вмещающие горные породы применялись эмпирические физические формулы [Адушкин, Спивак, 2004, 2007, Механический..., 1971]. При условии превышения прочности пород на сжатие σ (Па) над пластовым давлением $\rho g H$ (Па): $\sigma > \rho g H$, где ρ – плотность пород ($г/см^3$), g - $9.8 м/с^2$, H – глубина (м) радиус полости оценивается:

$R_{п} = E^{1/3} \frac{354,6}{(\rho \cdot C^2 \cdot \sigma)^{1/9}}$ где $R_{п}$ – радиус полости взрыва (м), E – мощность взрыва (кт в ТЭ); ρ – плотность пород (г/см^3), C – скорость звука (м/с); σ – прочность пород на сжатие (Па) [Адушкин, Спивак, 2007].

Для поиска неоднородностей геологической среды, в т.ч. для выявления флюидопроницаемых геоструктур, использовано зондирование методом переходных процессов (ЗМПП). Подробно описание приведено в диссертационной работе. Измерялась ЭДС в приемной петле (рис.1), приведенная к току в генераторной, затем рассчитывалось кажущееся удельное электрическое сопротивление (УЭС) ρ_{τ} (Ом·м) по формуле [Кауфман, Морозова, 1970]:

$$\rho_{\tau}(t) = \left[\frac{IS_2 S_u}{e(t) 20\pi \sqrt{\pi}} \right]^{2/3} \left(\frac{\mu_0}{t} \right)^{5/3} \quad (2), \text{ где } t - \text{ время, с;}$$

S_2 и S_u – соответственно площадь генераторной и измерительной петель, м^2 ; $e(t)$ – ЭДС, индуцируемая в приемной петле, В; I – ток в генераторной петле, А; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума.

Количественная интерпретация выполнена в рамках горизонтально-слоистой модели с использованием программ <Unv_QQ> и <Inv_QQ> (Автор – Е.Ю.Антонов). Относительное среднеквадратичное расхождение между экспериментальными и модельными данными не превышает 2.5 %.

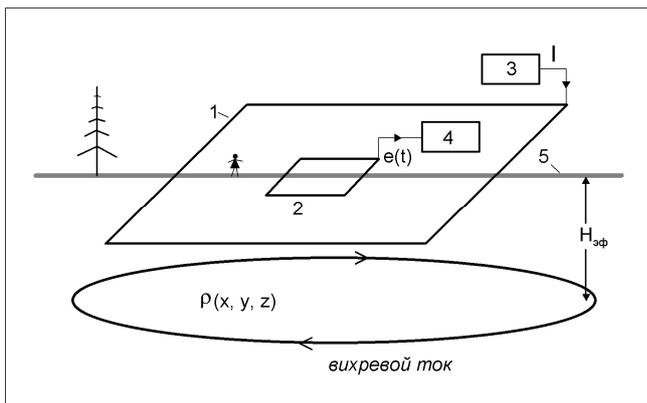


Рис.1. Схема измерений методом переходных процессов (ЗМПП): 1 – генераторная петля, размер 100×100 м на объекте «Кристалл», 200×200 м – на объекте «Кратон-3», 2 – приемная петли размером 50×50 м; 3 – генератор импульсов тока; 4 – измеритель; 5 – поверхность земли.

Применялся комплекс физико-химических аналитических методов, подробное описание которых приводится в диссертации. Активность трития измеряли методом жидкостно-сцинтилляционной спектрометрии [Бондарева и др., 2010]. Предел обнаружения 1 Бк/л, относительная погрешность: < 6 % при активности $^3\text{H} > 40$ Бк/л, 10-15 % – при активности 10-40 Бк/л, около 34 % – при активности < 10 Бк/л, время измерения от $1.8 \cdot 10^4$ до $1.7 \cdot 10^5$ с [Артамонова, 2012].

Для определения активности ^{90}Sr с помощью β -радиометрии, $^{239,240}\text{Pu}$, ^{238}Pu – с помощью α -спектрометрии применялось радиохимическое концентрирование проб [Сухоруков и др., 2004 и др.]. Активности ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{40}K и ^{137}Cs , ^{241}Am в твердых пробах измерялись с помощью прямой высокоразрешающей полупроводниковой γ -спектрометрии [Мельгунов и др., 2003 и др.]. Чувствительность этих методов составляет не менее 0.01, $5 \cdot 10^{-4}$ и 0.03 Бк соответственно. Относительная погрешность не превышала 10 %.

Для определения содержания элементов применялась масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) [Николаева и др.,

2008 и др.] и атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой [Методика..., 1998а, 1998б и др.] с относительной погрешностью не более 10 % и не более 15 % соответственно, и с нижними пределами обнаружения от 0.1 до 0.01 мкг/л и от 0.1 до 0.0005 мг/л соответственно в зависимости от определяемого элемента. Изотопное $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ отношение определялось методом ICP-MS с относительной погрешностью $\leq 2\%$ [Бондарева, 2008, Nikolaeva et. al., 2010]. При работе с рассолами применена методика отгонки урана в азеотропной смеси [патент Бондаревой Л.Г. №2011149436 (РФ) от 07.12.2011 г.]. Твердые пробы переводились в раствор методом сплавления с метаборатом лития. Дополнительно применялся рентгено-флюоресцентный анализ на синхротронном излучении с пределами обнаружения от 5 до 0.1 г/т с относительной погрешностью не более 15 % [Baryshev et. al., 1991, Артамонова, Колмогоров, 2004].

Особенности геологической среды объектов ПЯВ.

Геология и тектоника. Объекты ПЯВ расположены в пределах Сибирской платформы (рис.2): «Кратон-3» и «Кристалл» на южном склоне Анабарской антеклизы (у сочленения с Тунгусской синеклизой), сложенной карбонатными породами венда, кембрия и нижнего ордовика общей мощностью ≈ 2400 м, залегающих несогласно на породах фундамента (рис.3). Отложения накапливались в условиях мелководного моря, и представлены известняками и доломитами и их глинистыми разностями горизонтального или моноклиального залегания с падением в юго-западном направлении до $10-12^\circ$ – в сторону центральной части древнего моря. Мощность рыхлых четвертичных отложений на водоразделах и склонах до 2 м, в долинах – до 10 м. В 4 км к юго-западу от объекта «Кристалл» развит разлом «Октябрьский» северо-западного простирания.

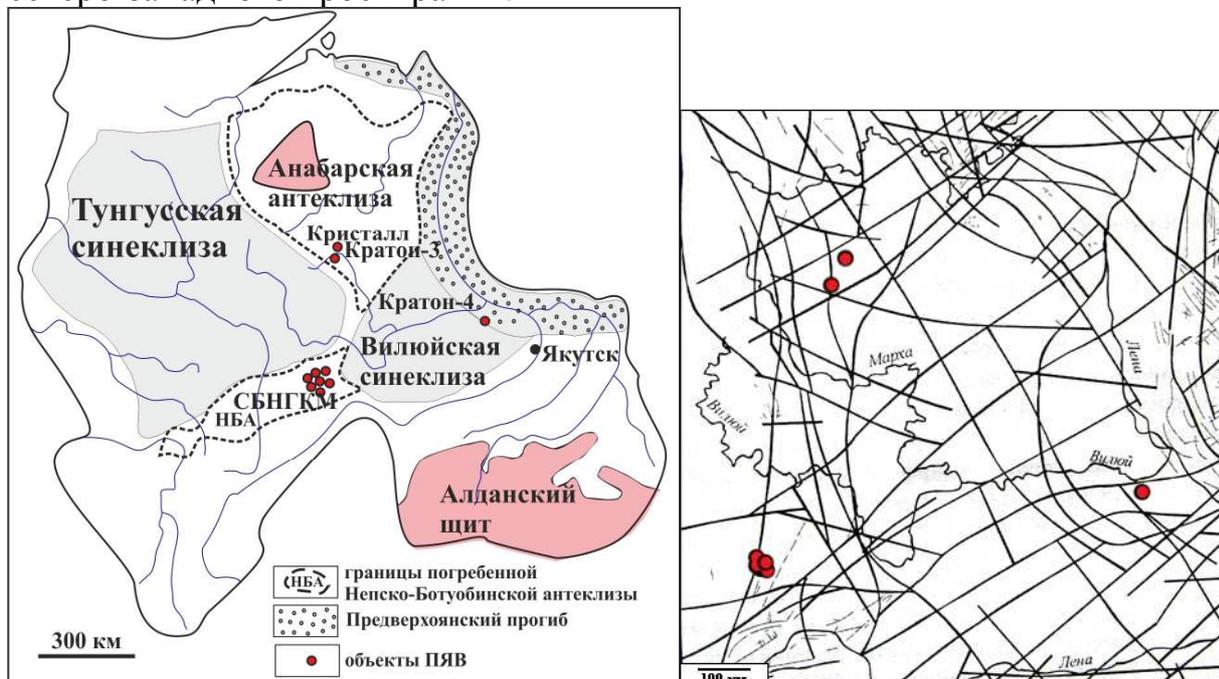


Рис.2. Схема расположения объектов ПЯВ на Сибирской платформе (основа - тектоническая карта под ред. Микуленко К.И., Старосельцева В.С. [Геология..., 1981]) (слева) и схема разломов [Микуленко и др., 2006] (справа). *Примечание:* СБНГКМ – Среднеботубинское нефтегазоконденсатное месторождение.

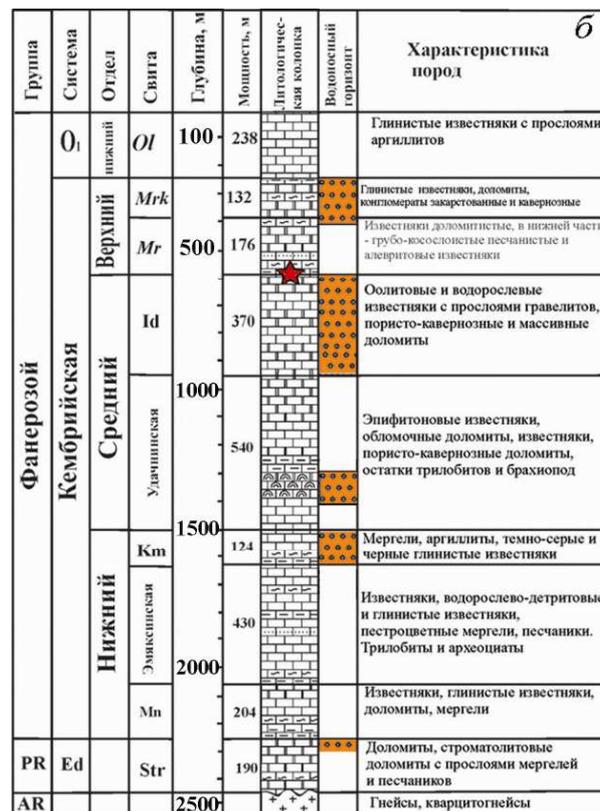
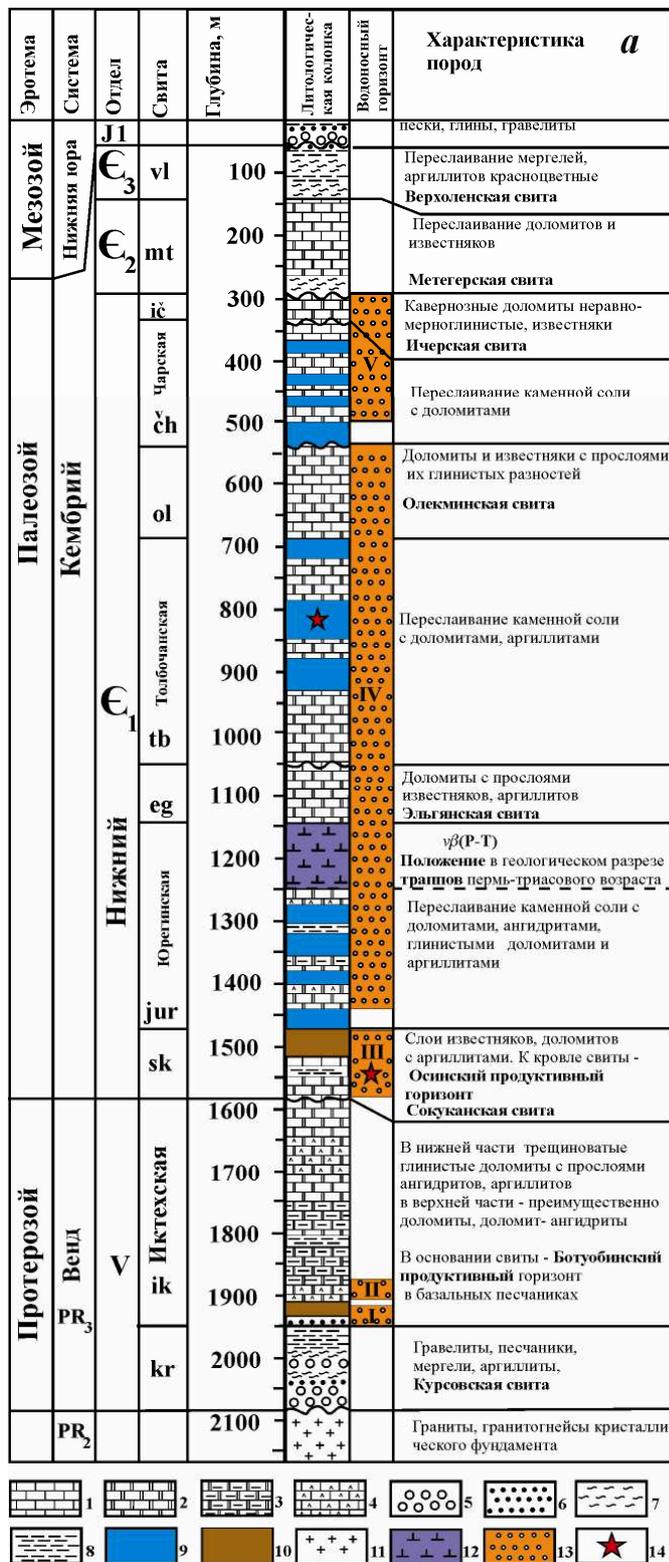


Рис.3. Литологическая колонка района Среднеботубинского нефтегазо - конденсатного месторождения (а) и района ПЯВ «Кратон-3» (б) (с уровнями распространения подземных водоносных комплексов и траппового пластового тела и расположения ПЯВ) с использованием данных скв. 51, 703, 95 [Микуленко и др., 2006, Алексеев, 2009]: 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 пермь-триасового времени в геологическом разрезе района; 13 – подземные водоносные комплексы, 14 – ПЯВ.

Эпицентр взрыва «Кратон-3» располагается всего в 160 м от уреза р. Марха, по руслу которой проходит разлом северо-западного простирания с углом падения 55° на северо-восток [Микуленко и др., 2006 и др.]. Район относится к Оленекскому криоартезианскому бассейну [Алексеев, 2009 и др.] с элизионной водонапорной системой, состоящей из 5-ти водоносных горизонтов, насыщенных хлоридными натриевыми и кальциевыми рассолами. С глубиной увеличиваются минерализация рассолов (от 90 до 550

г/л) и превышение пластового давления над нормальным гидростатическим (от 1–1.5 до 26 МПа). Напор подземных вод по латерали увеличивается к юго-западу в сторону Тунгусской синеклизы.

Объекты ПЯВ «Нева-1», «Нева-2», «Нева-3», «Нева-4», «Шексна», «Вятка» и «Ока» расположены на северной части погребенной Непско-Ботуобинской антеклизы в пределах Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения (СБНГКМ). Осадочная толща сложена в основном вендскими и нижнекембрийскими морскими отложениями мощностью ≈ 2000 м, в основном доломитами, перемежающимися пластами каменных солей (рис.3), которые перекрывает прерывистый слой юрских терригенных отложений мощностью до 40 м. Мощность четвертичных отложений от 2 до 14 м. В пермь-триасовое время было одноактное внедрение траппов: пластовое тело мощностью от 42 до 177 м располагается в карбонатах нижнего кембрия на глубинах 1100–1200 м и ступенчато поднимается в восточной части СБНГКМ до 550 м глубины. Район СБНГКМ разбит на ряд блоков разломами сбросово-взбросового типа с амплитудами перемещений 40 и более метров, что обусловило блоковое распространение водоносных комплексов с широким диапазоном пластовых давлений от 4.5 до 32 МПа. Район относится к Якутскому криоартезианскому бассейну [Алексеев, 2009 и др.]. Элизионная водонапорная система на глубине 1800–2100 м у подошвы платформенного чехла сменяется на аномально – депрессионную с дефицитом пластового давления от 2.5 до 5 МПа [Анциферов, 1989, Вожов, 1987 и др.]. Возможно, аномально низкие пластовые давления образовались вследствие ухода рассолов в трещины фундамента [Карцев и др., 1989]. Выделяют надсолевой, межсолевой и подсолевой водоносные комплексы, насыщенные рассолами. С глубиной хлоридные натриевые рассолы сменяются на хлоридные кальциевые (так называемые метаморфизованные [Шварцев, 1973 и др.]), при этом минерализация увеличивается от 30 до 650 г/л [Пиннекер, 1977, Анциферов, 1989, Вожов, 1987 и др.]. В СБНГКМ выявлены два продуктивных нефтегазоносных горизонта: осинский – в нижнекембрийских известняках и доломитах на глубине примерно 1500 м и ботуобинский – в вендских песчаниках на глубине ~ 1850 -1900 м.

Объект ПЯВ «Кратон-4» расположен на переходной зоне Вилюйской синеклизы в Предверхоанский прогиб, а именно на восточном склоне погребенного Хапчагайского мегавала – геологической структуры II порядка, перекрытого слабо литифицированными алевролитами и песчаниками нижнего мела общей мощностью до 1200 м. В районе развита инфильтрационная водонапорная система с пресными подземными водами. Преобладает латеральное движение подземных вод к северо-востоку-востоку по склону Хапчагайского мегавала. Эта простая гидрогеодинамическая система к востоку осложнена наличием алевритовых, аргиллитовых водоупорных пластов, а также влиянием восходящих глубинных потоков подземных вод со стороны Верхоянского складчато-надвигового пояса, поступающих по зонам надвиговых нарушений [Тектоника, 2001 и др.]. Загрязненные радионуклидами подземные воды из зоны взрыва могут захватываться этими потоками и выходить на поверхность земли. С глубиной превышение пластовых давлений над нормальным гидростатическим уровнем увеличивается от 0.5 до 15 МПа, а минерализация подземных вод повышается от 20 до 180 г/л [Тектоника..., 2001 и др.]. В своде

Хапчагайского мегавала на глубинах от 1500 до 3300 м в пористых песчаниках образованы газоконденсатные залежи, разделенные флюидоупорными пластами аргиллитов мощностью от 60 до 100 м.

Многолетнемерзлые толщи слагают верхние 100–300 м геологического разреза, в них вода находится в виде льда. Ниже залегают охлажденные породы, содержащие высокоминерализованные подземные воды с отрицательной температурой (криопэги), и морозные породы – с отрицательной температурой и сухие. Изотерма с температурой 0° С залегает на глубине максимально до 1050 м [Климовский, Готовцев, 1994 и др.]. Под руслом р. Лена развит сквозной талик (мерзлота отсутствует).

Рельеф и ландшафты. Районы 9-ти ПЯВ, кроме «Кратон-4», расположены на Среднесибирском плоскогорье – средне-расчлененном плато с уровнями водоразделов от 300 до 600 абс.м, с врезом рек от 100 до 400 м. Район ПЯВ «Кратон-4» - на Центрально-Якутской равнине с абсолютными отметками до 100 м. В условиях сплошной многолетней мерзлоты развиты ландшафты северной и средней тайги с доминирующим древесным видом - лиственницей Каяндера (*Larix sajaneri* Mayr.), мохово-лишайниковым покровом (род *Cladina*, род *Dicranum*, *Hylocomium*). В бассейне р. Улахан-Ботуобуйа по поймам рек распространены заболоченные участки. В районе объекта «Кратон-4» в низовье р. Вилюй на нижнемеловых песках произрастает, в основном, сосновый лес (*Pinus sylvéstris*) и развиты тукуланы – пустынные ландшафты перевеваемых песков.

Геохимический фон ландшафтов соответствует составу подстилающих осадочных пород, обедненных редкими элементами и естественными радионуклидами (кроме К) (г/т, отн. погрешность $\leq \pm 10\%$):

Типы почв и подстилающих горных пород	Th, г/т	U, г/т	Th/U
суглинистые дерново-карбонатные почвы на известняках-доломитах бассейна р. Марха	2–6.9	1.4–2.4	3-3.5
мерзлотные таежные почвы на терригенных породах и доломитах бассейна р. Улахан-Ботуобуйа	3.6-6.6	1.4-1.8	2.4-4.5
Мерзлотные таежные оподзоленные почвы на песках и супесях, низовье р. Вилюй	2.0-4.0	0.4-2.0	4.5-5.5

Региональное фоновое загрязнение техногенными радионуклидами соотносится с данными, полученными в Центральной Якутии [Сухоруков и др., 2001 и др.], и с глобальным уровнем, и, следовательно, сформировано в период ядерных испытаний в 1949-1962 гг., вклад Чернобыльского следа в общем загрязнении составляет не более 6 % [Израэль и др., 1990 и др.] и оценивается (мКи/км², отн.погрешность $\leq \pm 10\%$):

Типы почв и подстилающих горных пород	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	^{239, 240} 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 региональный фон загрязнения по ^{137}Cs значительно ниже фона в 40 мКи/км^2 , установленного для Сибири [Страховенко, 2011 и др.].

В почвах рассматриваемых районов фоновое содержание редкоземельных элементов ниже или на уровне кларков земной коры, отношение $\text{La}+\text{Ce}/\text{Yb}+\text{Lu} \approx 18-34$, $\text{Ce}/\text{Eu} \approx 38-53$.

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 и др.], фоновой активности трития в р. Енисей [Bondareva, Zhizhaev, 2010 и др.], в р. Обь-Теча [Крышев, Сазыкина, 2009 и др.]. Региональная фоновая активность ^{90}Sr в поверхностных водах – от 0.005 ± 0.0004 до 0.008 ± 0.0007 Бк/л соответствует глобальному, изотопы Pu - ниже детектируемой активности ($< 2 \cdot 10^{-5}$ Бк/л).

Основные характеристики объектов ПЯВ.

Первый в Якутии ПЯВ «Кристалл» (02.10.1974 г.) мощностью 1.7 кт в ТЭ был первым из 8-ми запланированных взрывов рыхления поперек долины ручья для создания плотины хвостохранилища (рис.4, а). Насыпь получилась с радиусом у основания ≈ 100 м, высотой ≈ 14 м вместо расчетных 30 м, потому от последующих взрывов отказались [Мирные..., 2001]. Через 17 ч образовался провал по центру насыпи радиусом до 50 м, глубиной до 5 м. Объем провала был примерно в 10^4 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. Из-за малой глубины взрыва в 98 м столб обрушения и зона откола соединились. В 1992 г. провал вокруг устья скважины был перекрыт обломочным материалом высотой до 20 м. Выход около 4 % общей радиоактивности на поверхность был штатным, но позднее ПЯВ «Кристалл» отнесен к аварийным [Мирные..., 2001]. По расчетам общая активность в полости взрыва через 1 год составляла – 22 тыс. Ки, а через 35 лет снизилась за счет естественного распада до 2.9 тыс. Ки.

Остальные 9 взрывов мощностью от 3.2 до 22 кт в ТЭ проведены на глубине от 567 до 1542 м, или приведенной глубине $205-625 \text{ м/кт}^{1/3}$, что заведомо глубже $95 \text{ м/кт}^{1/3}$ – необходимого условия полной камуфлетности [Адушкин, Спивак, 2007] без выхода радиоактивности на поверхность, за исключением аварийного ПЯВ «Кратон-3». При взрыве «Кратон-3» вследствие разгерметизации произошел выход примерно 2 % общей радиоактивности, и на радиоактивном следе погиб лес. С помощью ГИС-методов уточнена площадь «мертвого» леса – она составила 1.6 км^2 [Артамонова, 2012] вместо 1 км^2 , как считалось ранее [Бурцев, Колодезникова, 1997]. В 1981 г. загрязненная почва и техника были захоронены в канаве рядом с устьем боевой скважины, в 2006 г. этот участок был перекрыт слоем из местного аллювия высотой до 1.5 м. По расчетам общая активность в полости «Кратон-3» через 1 год составляла 240 тыс. Ки, к 2009 г. в результате естественного распада она снизилась до 14.7 тыс. Ки.

Под действием ударной волны вокруг полости взрыва возникают *зоны дробления и трещиноватости*, а при резком падении давления в центре взрыва (на 60-90-й мс) возникает *зона камуфлетности* (уплотнения) из-за движения массива центру взрыва, которая разрушается из-за прихода на поздних временах (сотни мс) волны разгрузки от свободной поверхности и

формирования *столба обрушения* (секунды-часы) над полостью взрыва под действием силы тяжести.

Расчетные размеры механического разрушения недр приведены ниже:

ПЯВ	Е, кт в ТЭ	Н, м	Рп	Рдр, м	Ртр, м	Нсто, м	Роз, м
Кристалл	1.7	98	12-13	45-60	96-123*	72-96*	180-240
Нева-4	3.2	815	15	-	-	90-120	220-290
Нева-1,-2, -3	15	1501-	25-28	54-66	104-126	152-223	370-490
Вятка, Ока, Шексна		1541					
Кратон-3, -4	22	574-577	29-32	112-133	168-199	186-249	420-560

Примечание: Е – мощность, Н – глубина, радиусы зон разрушения: Рп – полости, Рдр – дробления, Ртр – трещиноватости, Роз – радиус откольной зоны на поверхности вокруг эпицентра взрыва, Нсто – высота столба обрушения. *- глубина взрыва меньше расчетных размеров этих зон.

Размеры зон разрушения вмещающих пород, в основном, зависят от мощности взрыва в 1/3 степени [Адушкин, Спивак, 2007 и др.]. Наиболее сильные разрушения пород вызваны взрывами «Кратон-3» и «Кратон-4», каждый мощностью в 22 кт в ТЭ, проведенными в качестве источников волн для сейсмозондирования Земли. По сравнению с ними размеры зон разрушения взрывов мощностью 15 кт в ТЭ, проведенных для интенсификации выхода газа и нефтеотдачи из осинского продуктивного горизонта СБНГКМ, согласно расчетов, были меньше в 1.5 – 2 раза.

Обоснование защищаемых положений.

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.

Положение 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.

Устья боевых скважин и эпицентры камуфлетных ПЯВ, рассматриваемых в работе, 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, в работе названа площадкой ПЯВ. Натурные наблюдения выявили, что на площадках ПЯВ развит мелко- и крупнопolygonально - холмистый («байджараховый») термокарстовый рельеф вследствие вытаявания polygonально-жильных льдов, а в ложбинах между холмов находится вода, который ярче проявлен на льдистых рыхлых отложениях пойм рек, как, например, на площадке

объектов: «Ока» в долине р. Тэлгэспит, «Кристалл» на нижнем склоне руч. Улахан-Бысытта и «Кратон-3» на нижнем склоне р. Марха. Механическое разрушение многолетнемерзлых пород при ПЯВ, по-видимому, привело к их разуплотнению и увеличению потока тепла из зоны взрыва. Известна низкая устойчивость термовлажностного равновесия в льдистых многолетнемерзлых породах [Качурин, 1961, Климовский, Готовцев, 1994 и др.]. Вырубка деревьев и нарушение почвенного покрова на площадке ПЯВ изменило альbedo поверхности, что также, по-видимому, стало дополнительным фактором, способствующим деградации мерзлоты [Ершов, 1982, Климовский и др., 2002, Федоров и др., 2008 и др.].

Для оценки состояния многолетней мерзлоты на объекте «Кристалл» проведено ЗМПП по двум взаимоперпендикулярным профилям, проходящим через эпицентр взрыва – пикет №5 (рис. 4, б). Все кривые кажущегося УЭС ρ_{τ} схожи между собой, кроме одной, полученной на эпицентре взрыва (пикет № 5) (рис.5, табл.1). Данный факт свидетельствует о преимущественно однородном геоэлектрическом строении геологической среды на фланговых

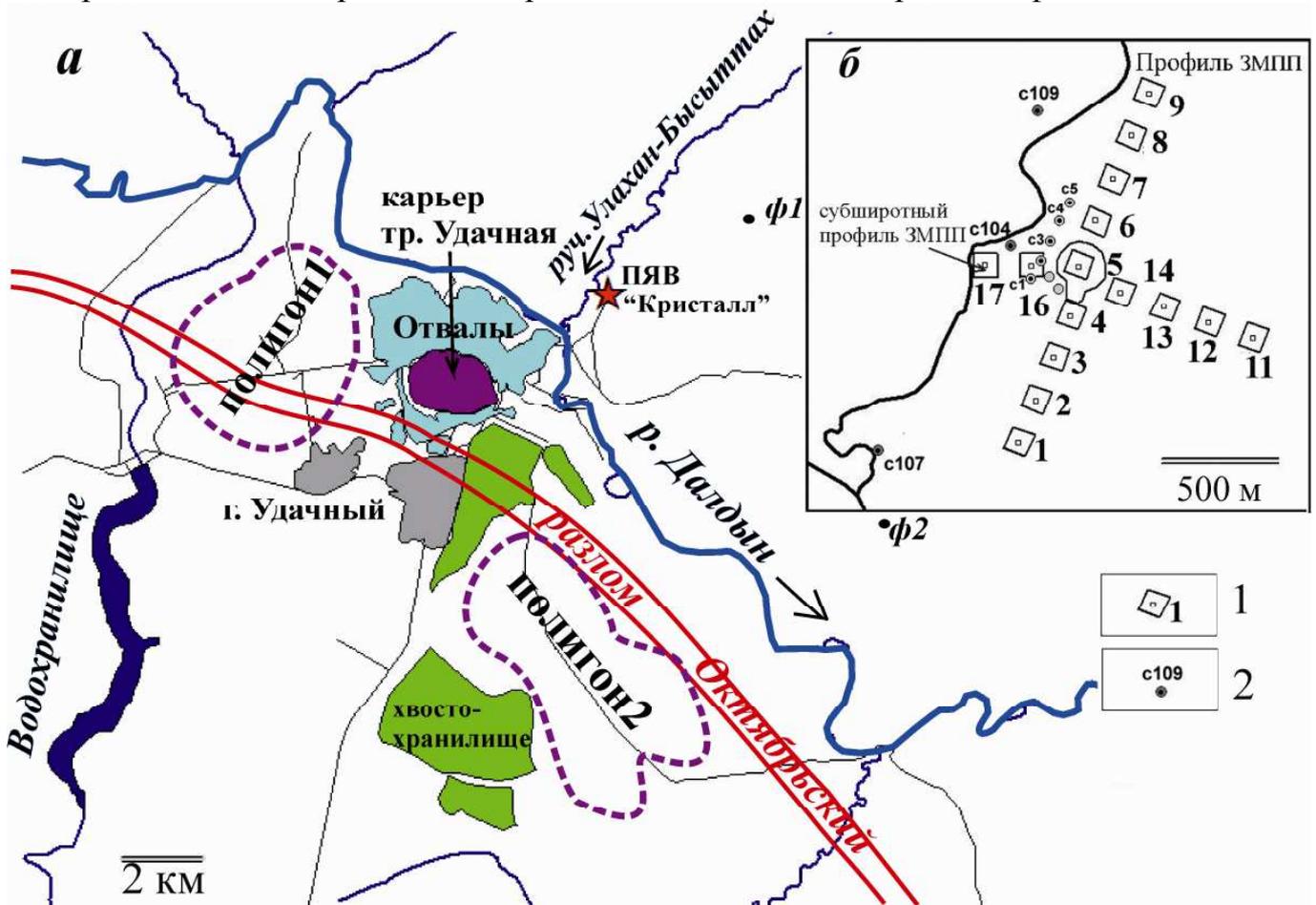


Рис.4. Схема района (а) и профилей ЗМПП на объекте ПЯВ «Кристалл» (б). *Примечание:* полигон1, полигон2 – места подземного захоронения рассолов, зона тектонического разлома Октябрьский проведена по Микуленко К.И.[Микуленко и др., 2006]; ф1, ф2 – фоновые участки опробования. Условные знаки: 1- генераторная петля и номер пикета ЗМПП, 2 – гидрогеологические скважины.

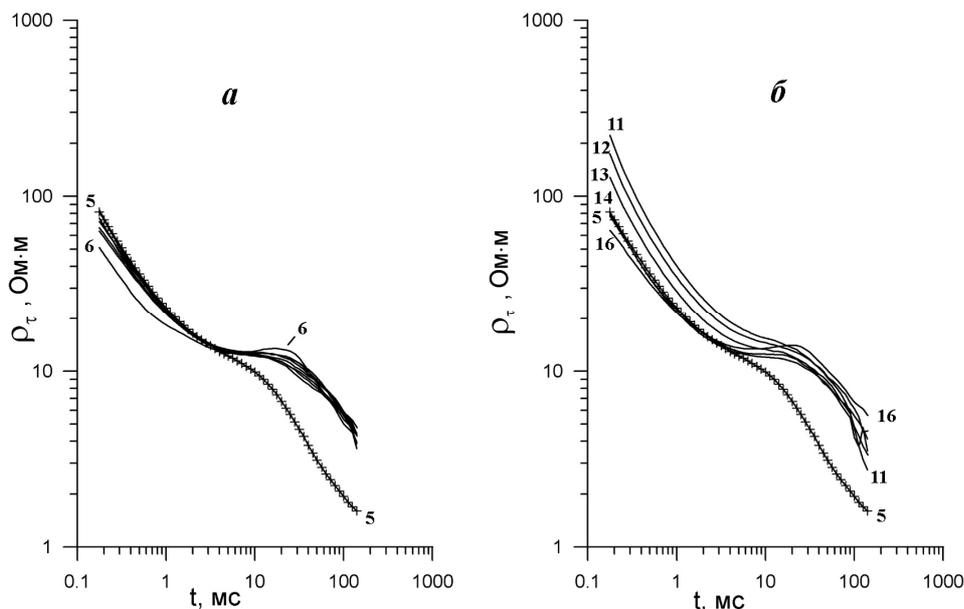


Рис.5. Кривые кажущегося удельного сопротивления ρ_{τ} , измеренные на субмеридиональном (а) и субширотном (б) профилях на ПЯВ «Кристалл». Цифры у кривых соответствуют номерам пикетов (см. рис.4, б).

Таблица 1. Мощности (м) и удельные электрические сопротивления пород (Ом·м) (в скобках) по результатам ЗМПП района ПЯВ «Кристалл»

Пикет	Н	Л1 (ρ_1)	С1 (ρ_3)	Л3 (ρ_4)	С2 (ρ_5)	С3 (ρ_6)
Субмеридиональный (I) профиль						
П1	317.8	80 (110)	39 (5.3)	240 (8.5)	91.1 (4.3)	(1.2)
П2	315.5	77 (120)	59 (5.8)	210 (8.3)	126 (1.45)	(0.25)
П3	318.3	81 (510)	5.0 (1.5)	280 (7.6)	111 (1.0)	(0.16)
П4	306.5	82 (82)	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)	
Субширотный (II) профиль						
П11	348.3	131 (690)	6.5 (1.5)	330 (8.2)	(1.2)	(1.2)
П12	345.0	119 (340)	6 (1.4)	360 (8.4)	(1.4)	
П13	328.5	106 (180)	4.6 (1.2)	350 (7.8)	(0.9)	
П14	317.0	86 (82)	17.7 (3.6)	340 (8.2)	(0.8)	
П5 *	314.0	74 (98)	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 ЗМПП в эпицентре взрыва.

частях профилей на глубину до 600 м (при временах регистрации до 150 мс) и о вероятном аномальном строении под эпицентром (рис. 5, 6). Верхнему слою, выделяемому по данным ЗМПП на ранних временах регистрации ($t < 2$ мс), характерны УЭС ρ_1 от 54 до 690 Ом·м (в среднем 187 Ом·м) и этот слой интерпретирован нами как слой многолетнемерзлых пород Л1 [Артамонова и др., 2012а]. Слою Л1 характерна выдержанная мощность (в

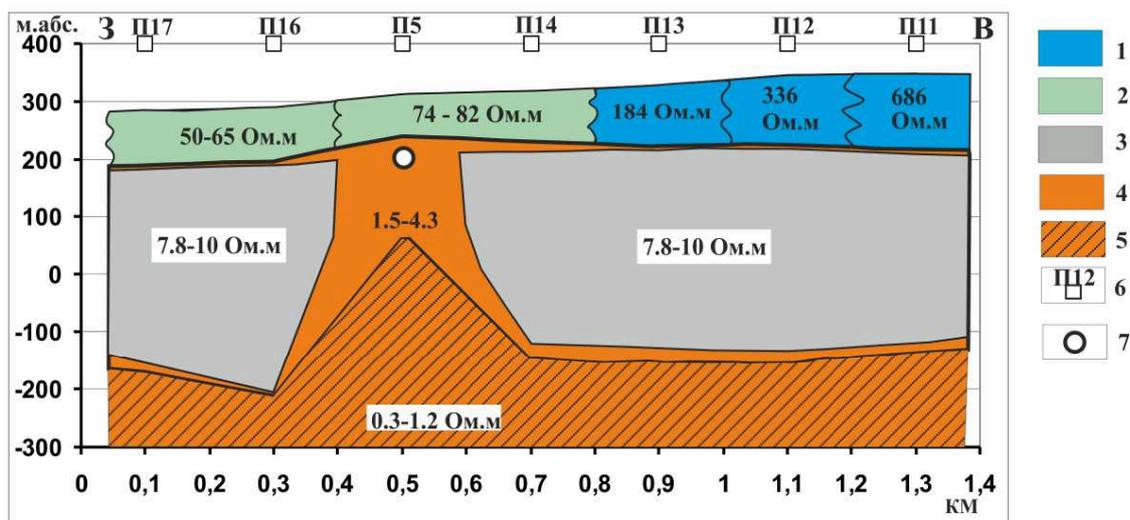


Рис. 6. Мерзлотно-гидрогеологическая модель объекта «Кристалл» по данным ЗМПП по субширотному профилю. Условные обозначения: 1 – многолетнемерзлые породы слоя Л1; 2 – участки деградировавшей многолетней мерзлоты с более теплыми и влажными породами; 3 - слой морозных пород Л3; 4 – кембрийские водоносные горизонты С1 (верхний) и С2 (нижний); 5 – высокопроводящее основание С3; 6 - пикет ЗМПП и его номер; 7 – полость взрыва.

среднем 100 м). Выявлено, что кривым кажущегося УЭС ρ_t , полученным на пикетах в долине руч. Улахан-Бысыттах, на ранних временах ($t < 2$ мс) присущи наиболее низкие удельные УЭС (53-57 Ом·м). Это говорит о том, что здесь мерзлые породы наиболее влажные и «теплые» (табл.1). УЭС слоя Л1 под саркофагом оказалось несколько выше – 74-98 Ом·м, и поэтому сделано предположение, что саркофаг толщиной до 20 м мог оказать защитный эффект для сохранения и, возможно, наращивания многолетнемерзлых пород в поствзрывной период, что согласуется с расчетными моделями динамики температурного поля пород [Киселев и др., 2004] и экспериментальными данными о способности самовосстановления многолетней мерзлоты [Федоров и др., 2008 и др.]. По мере удаления от эпицентра ПЯВ по субширотному профилю от пикета №14 к пикету №11 уровень кривых кажущегося УЭС ρ_t последовательно повышается (рис.5, б), и УЭС слоя Л1 последовательно увеличивается от 50 Ом·м до 690 Ом·м (табл.1).

На объекте «Кратон-3» ЗМПП проведено по трем субмеридиональным (азимут 26°) параллельным профилям, отстоящим друг от друга на 1 км, кривые кажущегося УЭС ρ_t получены на 22-х пикетах (рис. 7, 8). Кривые ρ_t пикетов на приводораздельных ландшафтах правого борта р. Марха однообразны и практически идентичны (все пикеты восточного, пикеты №1-4 центрального профилей) (рис.8, а,б). Здесь на самых ранних временах ($t < 0.2-0.3$ мс) характерны очень высокие (до 1200 Ом·м) значения ρ_t , которые автор связывает со слоем многолетнемерзлых пород. Как и на объекте «Кристалл», наблюдается последовательное повышение уровня кривых ρ_t от эпицентра ПЯВ к северному флангу центрального профиля. Кривые ρ_t в эпицентре ПЯВ и соседних пикетах (№3-4 западного профиля) в долине р. Марха отличаются от остальных, полученных на приводораздельном ландшафте. На ранних временах ($t < 2$ мс) отмечаются

очень низкие (15.8–35.5 Ом·м) значения УЭС, при этом выявляется не только латеральная, но и вертикальная гетерогенность УЭС слоя Л1 (табл.2)[Артамонова и др., 2013]. Понижение УЭС слоя Л1 и, соответственно, повышение электропроводности пород в эпицентре взрыва и примыкающем участке долины р. Марха, по-видимому, обусловлено деградацией мерзлоты вследствие однонаправленного воздействия природных и техногенных факторов: 1) механического и термического воздействия ядерного взрыва, поскольку ударная волна ПЯВ могла воздействовать на разлом и усилить его флюидопроницаемые свойства, и по разлому осуществлялся постоянный массо- и энергоперенос из зоны взрыва; 2) повышенного потока естественного тепла Земли через зону разлома; 3) естественного отепляющего действия крупных водоемов и водотоков [Климовский, Готовцев, 1994 и др.], к которым относится р. Марха.

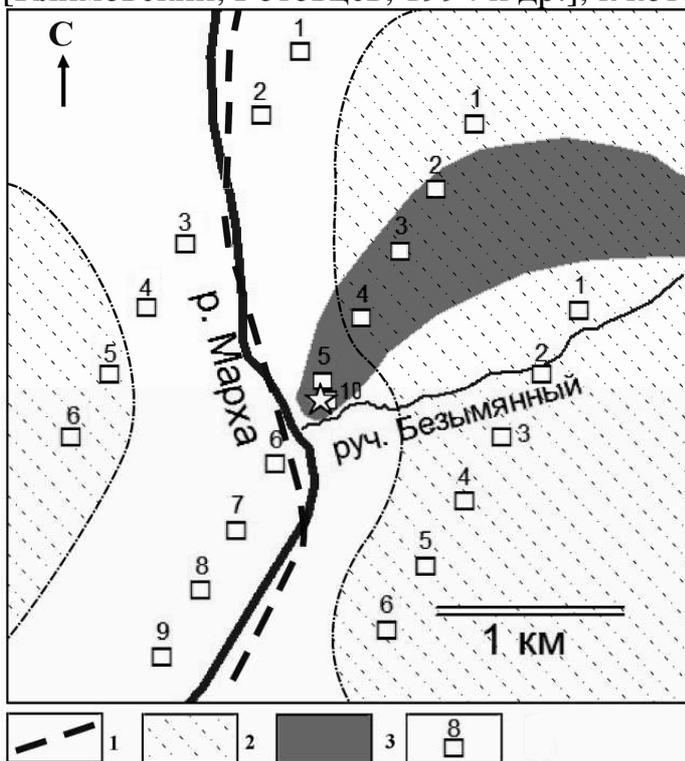


Рис.7. Схема ЗМПП в районе ПЯВ «Кратон-3».

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; 4 – генераторная петля и номер пикета ЗМПП.

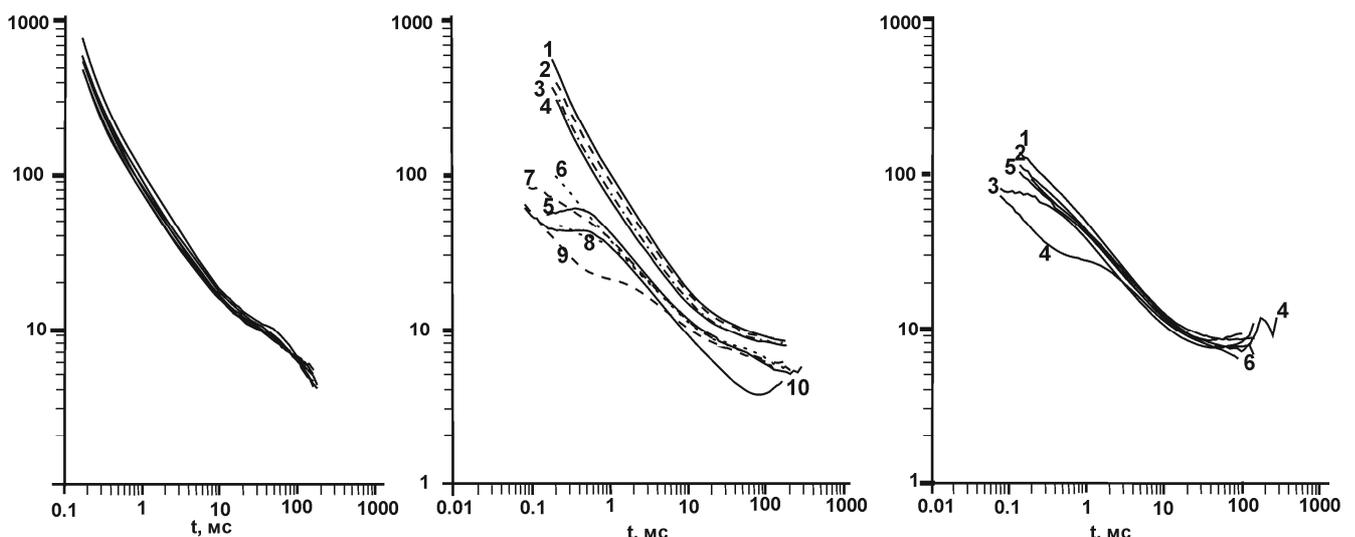


Рис.8. Кривые кажущегося удельного сопротивления ρ_t , измеренные на восточном (А), центральном (Б), западном (В) профилях ЗМПП на объекте «Кратон-3».

По данным ЗМПП на участке деградации мерзлоты граница перехода от многолетнемерзлого слоя Л1 к подстилающему слою Л2 (УЭС ρ_2 10–17.7 Ом·м) размыта, а мощность слоя Л1 почти в 2 раза меньше, чем его мощность на северном фланге с сохранной многолетней мерзлотой (рис.9). Таким образом, в ослабленной зоне вокруг боевой скважины ПЯВ «Кратон-3» и примыкающем участке долины р. Марха вдоль разлома, по-видимому, сформировалась зона сквозного талика. 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 [Артамонова и др., 2012, 2013, Кожевников и др., 2012].

Таблица 2. Мощности (м) и удельные электрические сопротивления пород (Ом·м) (в скобках) по результатам ЗМПП района ПЯВ «Кратон-3»

Пикет	Н	Л1 (ρ_1)	Л2 (ρ_2)	С1(ρ_3)	Л3 (ρ_4)	С2 (ρ_5)
Восточный профиль						
П1	376.2	200 (1100)	123 (6.3)	8 (0.8)	320 (4.7)	(1.2)
П2	370.1	180 (1120)	119 (6.4)	4.4 (0.7)	270 (3.6)	(0.6)
П3	354.6	176 (1200)	118 (5.6)	3(0.5)	260 (3.0)	(0.3)
П4	367.2	170 (1140)	125 (6.5)	3 (0.6)	340 (3.6)	(0.8)
П5	361.2	164 (1150)	120 (6.3)	2.4 (0.6)	290 (3.5)	(0.8)
П6	355.3	162 (1150)	130 (6.4)	2.3 (0.6)	330 (4.0)	(1.2)
Центральный профиль						
П1	363.4	147 (510) 71 (400)	-----	2.3 (0.5)	28.6 (65.0)	(4.9)
П2	360.0	175 (810)	108 (8)	2.9 (0.7)	140 (4.7)	(7.5)
П3	355.7	158 (730)	105 (7.7)	2.2 (0.6)	121 (4.5)	(6.6)
П4	340.3	149 (680)	115 (7.3)	2.1 (0.6)	33.5 (3.8)	(6.1)
П5*	318.5	125 (46) 24 (630)	-----	2.2 (1.1)	110 (5.0)	(4.1)
П10*	317.8	39 (30) 99 (35.5)	-----	2.2 (1.1)	69 (3.8)	279(2.1)
П6	313.0	80 (780)	120 (10)	2.1 (0.4)	434 (4.6)	(1.5)
П7	315.6	5.2 (73.0) 100 (50.0)	-----	2.0 (1.6)	51 (19.8)	(4.4)
П8	322.6	25.6 (140) 145 (22.6)	-----	2.2 (0.9)	369 (4.0)	(3.1)
П9	323.0	75 (75.3) 100 (33.7)	144 (33.7)	2.0 (0.5)	(11.7)	
Западный профиль						
П1	332.9	123 (88)	92 (9.7)	2.0 (0.5)	166 (4.9)	(8.7)
П2	321.5	98 (95)	96 (12.5)	2.0 (0.5)	184 (4.8)	(6.6)
П3	313.4	111 (53)	82 (8.3)	1.9 (0.4)	243 (4.7)	(20.4)
П4	336.3	41.4 (37.0) 105 (17.7)	64 (17.7)	3.9 (0.4)	300 (5.8)	(1960)
П5	351.2	61 (1410) 80 (17.4)	43 (17.4)	2.0 (0.6)	295 (4.6)	(16.0)
П6	358.9	82 (112) 58 (15.8)	54 (15.8)	1.3 (0.5)	270 (4.4)	(6.4)

Примечание: Л2 – сухие подмерзлотные (морозные) нижнеордовикские породы в районе МПЯВ «Кратон-3»; остальное см. табл.1.

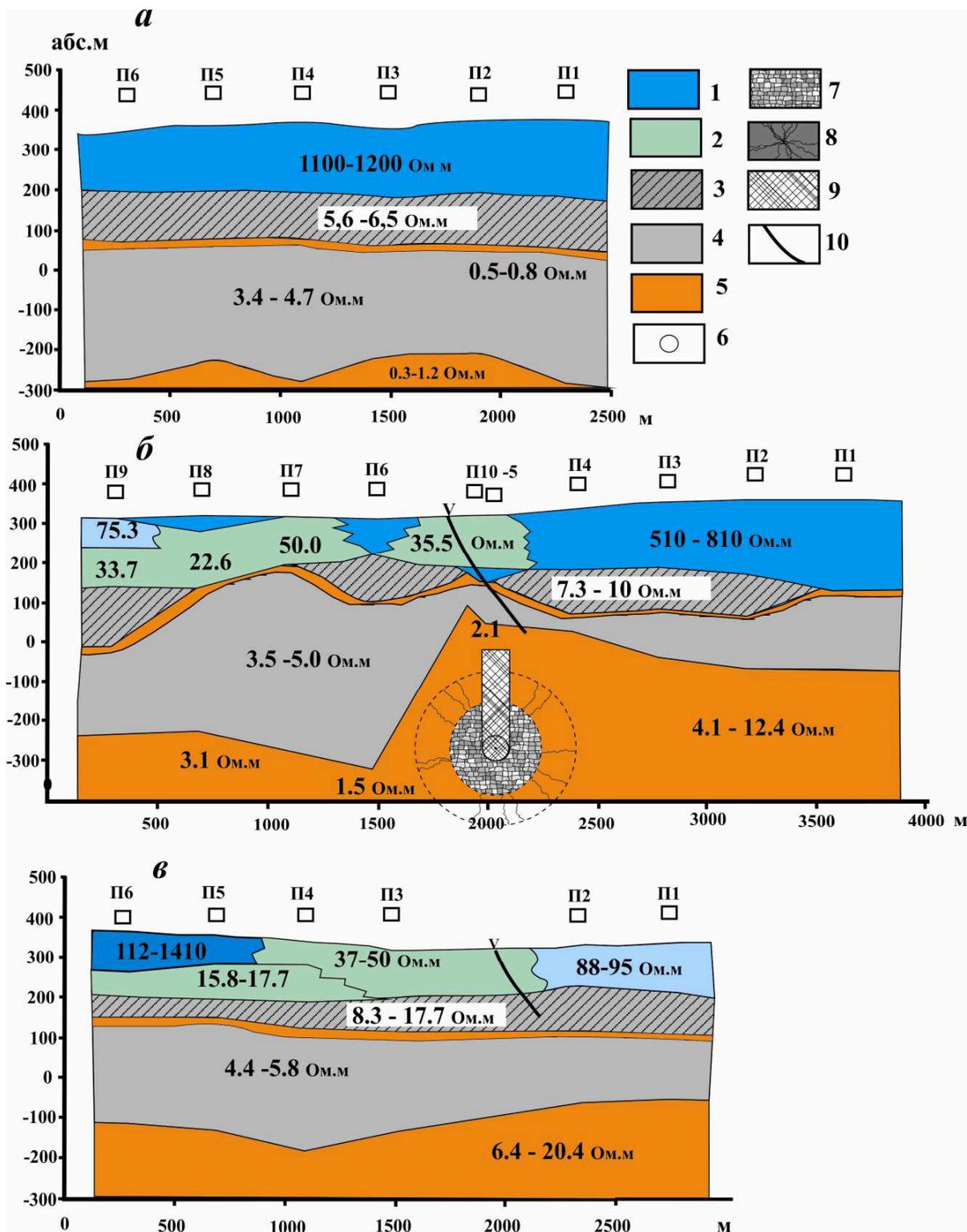


Рис.9. Мерзлотно-гидрогеологическая модель района объекта ПЯВ «Кратон» по данным ЗМПШ на восточном (а), центральном (б), западном (в) профилях. Условные обозначения: 1 – многолетнемерзлые породы (слой Л1); 2 – участки деградировавшей многолетней мерзлоты (слой Л1); 3 – подмерзлотные сухие (морозные) нижнеордовикские известняки и доломиты (слой Л2); 4 – подземные водоносные горизонты, насыщенные рассолами (слои С1, С1, С3); 5 – верхнекембрийские влажные (охлажденные) породы (слой Л3); зоны механического воздействия ПЯВ: 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.

Нужно отметить, что УЭС слоя Л1 ослабленной зоны ПЯВ «Кристалл» в 2 раза выше (табл.1), чем ослабленной зоны ПЯВ «Кратон-3» (табл.2). Автор заключает, что на ПЯВ «Кристалл» имеет место более слабая деградация многолетней мерзлоты в силу: 1) существенно меньшей мощности взрыва «Кристалл», обусловившей меньшее термическое воздействие на мерзлоту; 2) отсутствия разломов, и, соответственно, значимых потоков естественного тепла Земли на участке; 3) меньшего отепляющего влияния небольшого ручья Улахан-Бысытта по сравнению с рекой Марха.

Установление в апреле 2001 г. отрицательной температуры пород -4.8°C в скв. 104 на глубине около 180 м в 300 м к северо-западу от площадки ПЯВ «Кристалл» [Микуленко и др., 2006] подтверждает этот вывод.

Таким образом, в результате ЗМПП выявлено, что многолетнемерзлые породы в пределах ослабленных зон вокруг боевых скважин и примыкающих к ним участках долин претерпели деградацию в разной степени вплоть до появления талых «окон», что проявляется на поверхности в виде полигонально-холмистого рельефа и термокарстовых озер в ложбинах.

Положение 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.

Вернемся к анализу кривых кажущегося УЭС ρ_t , полученных на фланговых частях профилей ЗМПП (рис. 5, 8). Кривые УЭС ρ_t на временах 2–10 мс, соответствующим эффективным глубинам порядка 200 м, сгущаются, что указывает на присутствие здесь горизонтальной границы, разделяющей вышележащие высокоомные мерзлые породы от нижележащих низкоомных пород. На объекте «Кратон-3» выделен второй слой Л2 с низкими УЭС ρ_2 5.6–18 Ом·м, мощностью 100–120 м, который соотносится с «сухими» нижнеордовикскими и верхнекембрийскими известняками и доломитами, он отсутствует в разрезе района ПЯВ «Кристалл». На временах $t \approx 30-100$ мс для районов обоих ПЯВ выделяется третий слой с очень низкими УЭС, который мы связываем с верхнекембрийским водоносным горизонтом, насыщенным рассолами, обозначенный С1. В районе ПЯВ «Кристалл» слой С1 расположен под слоем Л1 (табл.2, рис.5), а его УЭС ρ_3 составляет 1.2 – 5.8 Ом·м при средней мощности 14 м. В районе ПЯВ «Кратон-3» мощность слоя С1 составляет всего 2-3 м, УЭС ρ_3 – 0.4–1.6 Ом·м.

Для хорошо сцементированных терригенных и карбонатных пород с межзерновой пористостью m (см. формулу 3, стр.7) равно 2, а в трещиноватых породах m можно приравнять к 1. Приняв в качестве вероятной оценки пористости карбонатных пород величину $k_{п} = 0.1$, при $\rho_{3-1cp} = 3.1$ Ом·м, получаем, что сопротивление воды, насыщающей породы слоя С1, должно составлять 0.31 Ом·м. Этому УЭС соответствуют рассолы с

минерализацией порядка 45-50 г/л при 0°C (при пересчете на NaCl), что в целом согласуется с гидрогеохимическими данными – минерализация рассолов верхнекембрийского водоносного горизонта составляет 45-90 г/л. Положение слоя С1 в геоэлектрическом разрезе соответствует уровням верхнекембрийского водоносного горизонта, полученным по данным бурения [Кобылкина и др., 2005 и др.].

Ниже слоя С1 выделяется слабопроводящий геоэлектрический слой, обозначенный нами Л3: на объекте «Кристалл» со средним ρ_4 8.35 Ом·м и средней мощностью 320 м, на объекте «Кратон-3» - соответственно 3.8–5.8 Ом·м и 260-340 м. Судя по интервалу глубин и геоэлектрическим свойствам слоя, он соответствует охлажденным известнякам и доломитам мархинской свиты (рис.6, 9). УЭС ρ_4 на порядок меньше, чем ρ_1 слоя многолетнемерзлых пород Л1, но в 3-7 раза больше ρ_3 верхнекембрийского водоносного горизонта С1, и потому по своим геоэлектрическим свойствам слой Л3 занимает промежуточное положение.

Ниже слоя Л3 выделяется высокопроводящий геоэлектрический слой С2 со средним УЭС ρ_5 1.86 Ом·м. Судя по интервалу глубин и геоэлектрическим свойствам пород, слой С2 соответствует верхней части I среднекембрийского водоносного горизонта, насыщенного подземными рассолами. Поскольку на самых поздних ($t > 100$ мс) временах наклон кривых ρ_t усиливается, это свидетельствует о том, что в основании разреза на глубинах около 500 м предполагается наличие еще более высокопроводящего слоя-основания С3 с УЭС 0.3-0.8 Ом·м. Имеется только одна вероятная причина, объясняющая, столь низкие УЭС слоя С3 – насыщенность карбонатных пород высокоминерализованными рассолами. Слой С3 соответствует основной части кавернозно-поровых коллекторов I среднекембрийского подземного водоносного горизонта. Согласно формуле Арчи (см. выше) для плотных сцементированных пород, содержащих трещины либо другие «прямые» каналы, при $m = 1$, $k_{п} = 0.1$, УЭС слоя С3 оценивается примерно в 0.056 Ом·м, которому при температурах ниже 0°C соответствуют концентрации рассолов NaCl порядка несколько сотен г/л, что близко к реальным измеренным значениям минерализации рассолов I среднекембрийского водоносного горизонта (450-600 г/л). Тот факт, что для разумной интерпретации данных ЗМПП необходим показатель цементации, близкий к единице, косвенным образом указывает на кавернозно-поровый тип коллекторов I среднекембрийского водоносного комплекса, что подтверждается данными бурения и изучения карьера кимберлитовой трубки Удачная [Микуленко, Готовцев, 1994, Алексеев, 2009 и др.]. Уровни водоносных горизонтов С2 и С3 в районе ПЯВ «Кристалл» соответствуют измеренным гидрогеологическим данным скважин. УЭС водоносных горизонтов С1, С2, С3 с глубиной снижается $\rho_3 > \rho_5 \gg \rho_6$ (рис.6), что согласуется с измеренными данными повышения минерализации подземных рассолов с глубиной от 90 до 450 г/л.

Таким образом, в результате инверсии данных ЗМПП построена 5-числовая геоэлектрическая модель геологической среды районов: ПЯВ «Кристалл» $\rho_1 > [\rho_3 < \rho_4] > \rho_5 > \rho_6$ (ρ_6 – основание), ПЯВ «Кратон-3» $\rho_1 > \rho_2 > [\rho_3 < \rho_4] > \rho_5$ (ρ_5 – основание) (рис.6, 9) [Артамонова и др., 2012, 2013, Кожевников и др., 2012].

Рассмотрим участки с аномальным геоэлектрическим строением. Кривая ρ_t пикета №5 в эпицентре ПЯВ «Кристалл» в отличие от других кривых ρ_t на временах $t > 5$ мс круто уходит вниз. Столь низкое значение УЭС (0.3 - 4.3 Ом·м) могут иметь только породы, насыщенные сверхкрепкими рассолами с минерализацией ≈ 300 и более г/л, минерализация рассолов верхнекембрийского водоносного горизонта в 45–90 г/л для этого недостаточна. Данный факт указывает на появление флюидопроницаемой геоструктуры не только выше, но и ниже зоны взрыва, и поднятие по ней сверхкрепких рассолов I среднекембрийского водоносного горизонта с минерализацией примерно 450 г/л. По данным ЗМПП поднятие подземных рассолов слоя С2 оценивается примерно в 300 м и более, для слоя С3 – 200-260 м. Появление на площадке ПЯВ «Кристалл» соленых поверхностных вод, хлоридных по составу, не согласующиеся с присущими для района пресными гидрокарбонатными природными водами, подтверждает данные ЗМПП и указывает на выход подземных рассолов на поверхность земли (см. ниже).

Аномальные кривые ρ_t , полученные в эпицентре «Кратон-3» и по простиранию разлома в долине р. Марха (рис.8, б, в, пикеты №5-10 центрального, пикеты №3,4 западного профилей) весьма разнообразны, что указывает на неоднородное латеральное и вертикальное строение геологической среды этого участка. Как было сказано выше, именно на этом участке развиты наиболее деградировавшие многолетнемерзлые породы с УЭС ≤ 50 Ом·м, условно отнесенные к талым. Инверсия аномальных кривых кажущегося УЭС ρ_t показала, что над полостью взрыва наблюдается снижение мощности не только слоя Л1, но и слоя Л2, а также появление геоэлектрической аномалии в виде «сквозной» зоны пониженных электросопротивлений, которая, по-видимому, обусловлена поднятием напорных подземных сверхкрепких рассолов по ослабленной зоне вокруг боевой скважины и по зоне тектонического разлома, выходящего на поверхность по руслу р. Марха. По данным ЗМПП геоэлектрическая неоднородность с очень низкими УЭС оценивается примерно в 300 м по вертикали при латеральных размерах в 400 м. Высота столба обрушения согласно расчетов по формулам [Адушкин, Спивак, 2007 и др.] оценивается в 190-250 м. Поскольку взрыв «Кратон-3» был аварийным: произошла разгерметизация по стволу боевой скважины, и это, возможно, придавало значимость газовой-динамической составляющей, которая могла раскрыть (подновить) тектонический разлом, секущий ослабленную зону вокруг боевой скважины в 390-410 м выше полости взрыва. Поскольку высота столба обрушения и расстояние от полости взрыва до зоны тектонического разлома примерно одного порядка, сделано предположение, что столб

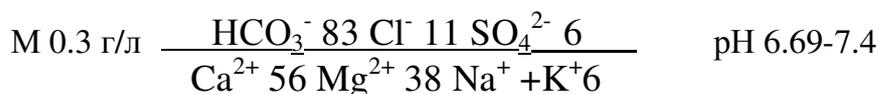
обрушения мог достичь зоны разлома и в результате появился путь для напорных рассолов не только по ослабленной зоне вокруг боевой скважины, но и по подновленной зоне разлома к поверхности земли. Это предположение подкрепляется данными ЗМПП для западного профиля – наличием геоэлектрической неоднородности с низкими УЭС высотой 100-150 м, что указывает на поднятие напорных подземных рассолов вдоль зоны тектонического разлома на расстоянии примерно 1 км от ПЯВ (рис.9, в).

Итак, выявлено, что в районах ПЯВ «Кристалл» и «Кратон-3» в условиях высококонтрастной в геоэлектрическом отношении геологической среды, благоприятной для постановки ЗМПП, ослабленные зоны вокруг боевых скважин радиусом до 200 м сохраняются по прошествии более 30 лет после взрывов, и в условиях элизионной водонапорной системы способствуют развитию локальных гидрогеологических аномалий – подъему – просачиванию вверх подземных рассолов по этим флюидопроницаемым геоструктурам на 260-300 м. Кроме того, в районах ПЯВ подновленные взрывом разломы способствуют подъему уровней напорных подземных рассолов на 100–150 м на расстоянии до 1 км от полости взрыва.

Положение 3. Индикаторами переноса радионуклидов в системе «полость взрыва – геологическая среда … поверхность земли» служат: увеличение активности ^3H – в 2-34, ^{90}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.

Рассматриваемые в работе объекты ПЯВ, за исключением «Кратон-4», расположены в пределах Анабарской и Вилюй-Ботуобинской криогидрогеологических систем [по Алексееву С.В., 2009] – области распространения напорных высокоминерализованных (до 450 г/л) подземных рассолов Сибирской платформы. Согласно результатам ЗМПП, напорные подземные рассолы поднимаются по появившимся в результате ПЯВ флюидопроницаемым геоструктурам – ослабленным зонам вокруг боевой скважины к поверхности земли. Поступление подземных рассолов на поверхность земли обнаружены и другими, в т.ч. химическими методами.

В районе ПЯВ «Кристалл» и «Кратон-3» - 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]:



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]:

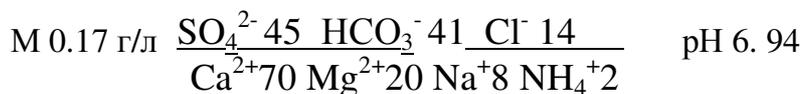


Таблица 3. Общий химический состав поверхностных вод районов ПЯВ «Кристалл» и «Кратон-3», мг/л

Место, год	pH	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻
район ПЯВ «Кристалл»								
Ручей из-под саркофага	7.72	410	155	780	450	190	3130	380
	7.10	320	240	560	310	270	2370	200
Грунтовые воды у саркофага	6.05	220	8.8	910	450	45	2400	390
	6.95	17	8.0	440	180	29	980	340
Руч. Дьяаха	6.68	5.8		47	15.8	17	17.0	210
руч. Улахан-Бысытгах	нд	5.1		32	30	14.4	9.5	220
	7.82	3	1.6	73	25	8.3	18	320
Р. Далдын	7.73	10	3.5	53	30	6.2	92	180
	7.8	52	1.7	17	17	18.2	55	220
р. Сытыкан	7.2	26	12	6.4	13	20	59	140
Дно карьера «Удачная»	4.4	50000	20200	71700	1800	1.8	223400	150
	4.18	28800	10800	63300	15200	18.2	238200	550
Рудник –580 абс.м	5.6	20000	11000	47660	3000	4	212800	370
	5.1	39000	7900	89300	19800	1.7	390600	490
район ПЯВ «Кратон-3»								
Руч. у навала	6.7	130	4.9	33	14.7	<0.05	270	100
Грунтовые воды у навала	6.5	150	24.9	430	250	4.2	1550	210
Руч. Безымянный	8.22	НПО	0.25	53	26.7	10.2	1.77	310
Руч. б/н	7.7	2.28	0.53	74	35.0	7.6	39	360
Р.Марха	7.3	11.7	0.003	47	18.0	4.2	1.6	245

Примечание: нд – нет данных, нпо – ниже предела обнаружения

Выявлено, что на площадках ПЯВ в пределах ослабленной зоны вокруг боевой скважины резко возрастает минерализация поверхностных вод на ≥ 1 порядок по сравнению с водой фоновых участков. Здесь тип поверхностных вод изменяется: из гидрокарбонатной становится хлоридным в результате появления доминирующих концентраций ионов Cl⁻, Na⁺, Ca²⁺:

Площадка ПЯВ «Кристалл»: в ручьях, вытекающих из-под саркофага, минерализация максимально достигает 5.5 г/л (2012 г.) за счет концентраций Cl⁻ до 3.1 г/л, Ca²⁺ до 780 мг/л, Mg²⁺ до 453 мг/л, Na⁺ до 408 мг/л. В пробах

воды значительные концентрации Br^- - до 35 мг/л, в среднем 20 мг/л при их отсутствии в фоновых водах (табл.3)[Артамонова и др., 2009, 2012]:

$$\text{M } 3.5 \text{ г/л } \frac{\text{Cl}^- 85 \text{ HCO}_3^- 7 \text{ SO}_4^{2-} 7}{\text{Ca}^{2+} 46 \text{ Mg}^{2+} 35 \text{ Na}^+ 14 \text{ K}^+ 5} \quad \text{pH } 7.31$$

В грунтовых водах так же, как в ручьях из-под саркофага, зафиксировано повышение минерализации до 4.3 г/л.

Площадка ПЯВ «Кратон-3»: в пробах воды зафиксировано резкое повышение содержания Cl^- до 1.6 г/л, Ca^{2+} до 434 мг/л, Na^+ до 154 мг/л [Артамонова, 2012](табл.3):

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

Площадки ПЯВ на территории СБНГКМ (рис.10): в поверхностных водах наблюдается резкое повышение минерализации – до 2 г/л (средняя – 584 мг/л) за счет появления больших концентраций Cl^- , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , превышающих их содержание в речной воде района в 95 (29), 14 (3), 23 (3), 78 (19) раз соответственно. На площадке объекта «Ока» наблюдается разнообразие ионного состава водных проб:

$$\text{M } 0.82 \text{ г/л } \frac{\text{Cl}^- 70 \text{ SO}_4^{2-} 18 \text{ HCO}_3^- 12}{\text{Ca}^{2+} 56 \text{ Na}^+ 20 \text{ Mg}^{2+} 19 \text{ K}^+ 5} \quad \text{M } 0.82 \text{ г/л } \frac{\text{Cl}^- 91 \text{ HCO}_3^- 6 \text{ SO}_4^{2-} 3}{\text{Na}^+ 65 \text{ Ca}^{2+} 24 \text{ Mg}^{2+} 10}$$

и их промежуточных разностей, что указывает на выход разных подземных рассолов из разных горизонтов геологического разреза: метаморфизованных кальциевых хлоридных из подсолевого водоносного комплекса, так и хлоридно натриевых рассолов из межсолевого водоносного комплекса. Тем самым подтверждается, что пласты каменной соли (рис.3) в полной мере не залечивают трещины и существуют сквозные флюидопроницаемые зоны вокруг боевых скважин глубиной до 1.5 км (от полости ПЯВ до поверхности земли), по которым поднимаются подземные рассолы.

Таким образом, в условиях элизионной водонапорной системы повышение минерализации и появление хлоридных по составу поверхностных и грунтовых вод в мелких водотоках и водоемах районов ПЯВ является индикатором просачивания подземных флюидов из недр по ослабленным проводящим структурам вокруг боевой скважины. Отметим, что в крупных водотоках из-за разбавления концентраций данный индикатор не будет достаточно эффективен. А выходящие на поверхность соленые подземные флюиды несут ли с собой радионуклиды из зон взрывов?

Площадка ПЯВ «Кристалл»: В жидком стоке ручьев, вытекающих из-под саркофага в 130-280 м к западу, юго-западу и северу от устья боевой скважины ПЯВ «Кристалл», зафиксированы высокие активности радионуклидов: трития – 221 Бк/л в 2002 г. [Голубов и др., 2004], 27 Бк/л в 2008 г., 15 Бк/л в 2012 г [Артамонова и др., 2012, Artamonova et.al., 2011, 2012], что превышает местный фон в 44, 5.5 и 3 раза соответственно. Активность ^{90}Sr в ручье в 2002 г. составила 25.9 Бк/л, в 2012 г. – 0.02 Бк/л.

Площадка ПЯВ «Кратон-3»: в заболоченном термокарстовом озере с размерами 10 X 6 м в 5 м от устья боевой скважины были установлены

активности техногенных радионуклидов: ^3H - (700±250) Бк/л в 1996 г., (320±32) Бк/л в 2001 г. В 2006 г. озеро было перекрыто насыпью из аллювия. В 2008-2012 гг. в ручьях, вытекающих из-под насыпи, на расстоянии от 86 до 130 м от устья боевой скважины зафиксированы уже более низкие активности трития от (19±6) до (67.2±1.9) Бк/л [Артамонова, 2009, 2012, 2013]. Активность ^{90}Sr в водоеме у устья скважины в 2001 г. составляла (38±6) Бк/л [Ramzaev et al., 2009], а 2008 г. – гораздо меньше – всего (1.99±0.07) Бк/л. В 2009 г. определены активности $^{239,240}\text{Pu}$ – $(4±0.16) \cdot 10^{-4}$ и ^{238}Pu – $(7.8±0.3) \cdot 10^{-3}$ Бк/л [Артамонова, 2012, 2013]. Зафиксированные активности радионуклидов на 2-4 порядка превышают местные и региональные фоновые уровни в поверхностных водах.

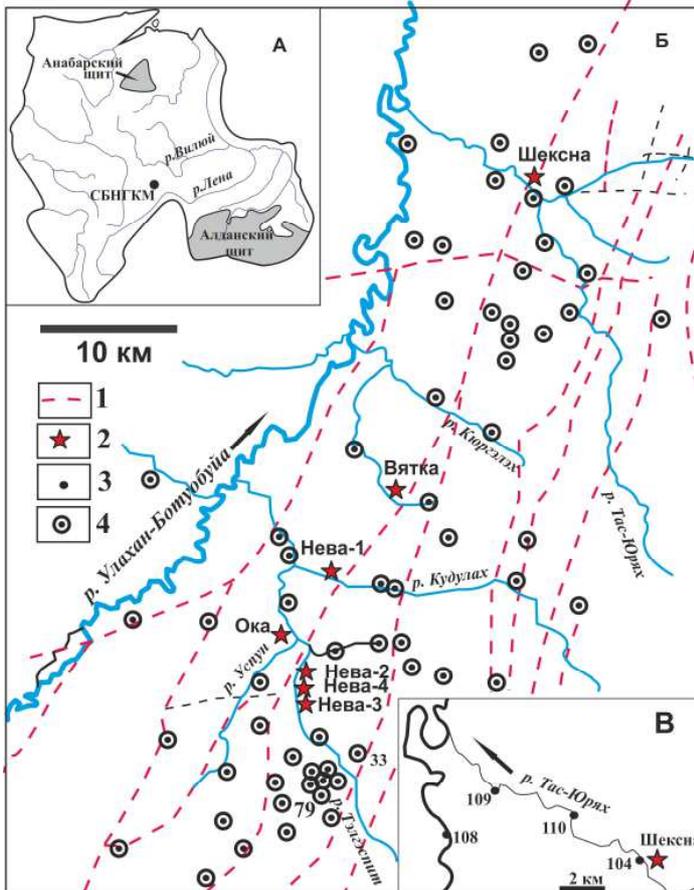


Рис.10. Схема расположения Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения на Сибирской платформе (А), объектов ПЯВ на его территории (Б) и точек отбора проб на р. Тас-Юрях около объекта ПЯВ «Шексна» (В).

Условные обозначения: 1 – тектонический разлом; 2 – объект ПЯВ и его название; 3 – № точек отбора проб поверхностных вод и донных отложений; 4 – буровые скважины.

Площадки ПЯВ на территории СБНГКМ: В пробах поверхностных вод зафиксировано высокая активность трития - максимально 170 Бк/л (рис.11). Поскольку ПЯВ в районе СБНГКМ были проведены в штатном режиме без радиоактивного загрязнения поверхности, источником трития может быть только подземный источник, а именно полости взрывов. В силу высокой подвижности в форме $^3\text{H}^1\text{NO}$ тритий является одним из ярких индикаторов современных потоков радионуклидов: в пробах подземных рассолов максимальная активность трития достигает 146 Бк/л, поверхностных водах – 170 Бк/л, что превышает в 34 раза региональный фоновый уровень (рис.11).

Радионуклиды ^{90}Sr , $^{238,239,240}\text{Pu}$, ^{137}Cs также являются индикаторами массопереноса в геологической среде, но широкое применение ^{90}Sr , $^{238,239,240}\text{Pu}$ в качестве индикаторов ограничено трудоемкостью

пробоподготовки, а ^{137}Cs определялся только в твердых пробах (донных отложениях и выпаренных рассолах).

Выявлено, что как в подземных рассолах, так и в поверхностных водах и донных отложениях площадок ПЯВ и на других местах выходов подземных радиоактивных флюидов изотопное отношение $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ снижается вследствие повышенного содержания оружейного урана – остатков делящегося материала ЯВУ: максимально до 126 вместо природного 138 (рис.12). В районе «Кратон-4» при слабой интенсивности выхода подземных радиоактивных флюидов на поверхность земли, именно изотопное отношение $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ показал себя как лучший индикатор переноса радионуклидов в системе «полость взрыва- геологическая среда- поверхность земли».

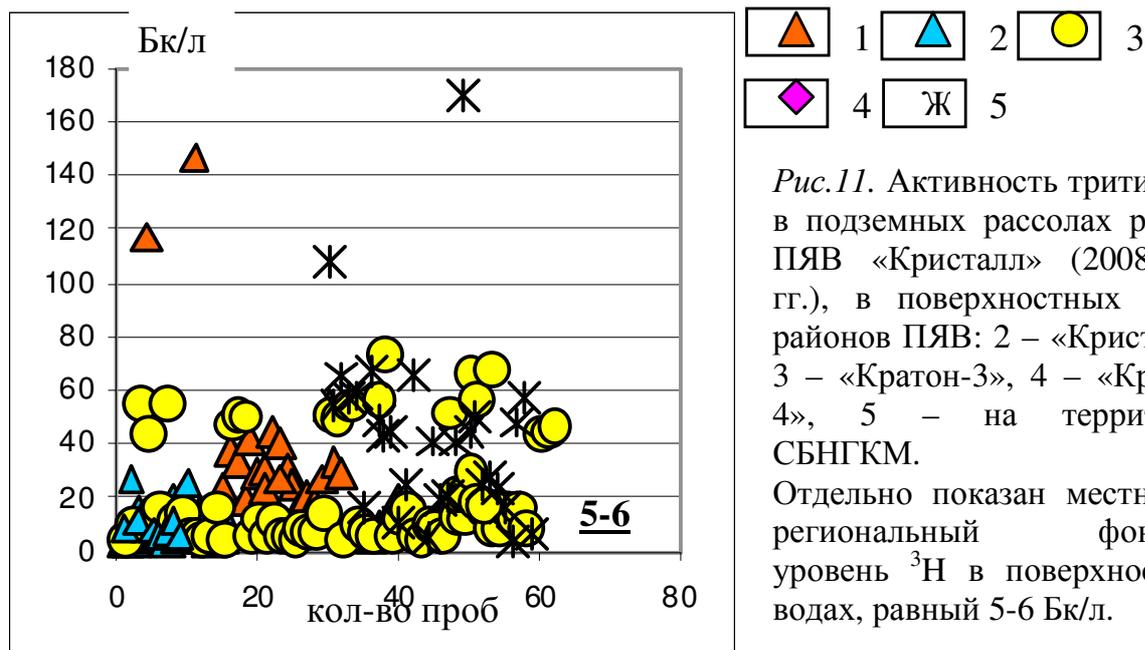


Рис.11. Активность трития: 1 – в подземных рассолах района ПЯВ «Кристалл» (2008-2012 гг.), в поверхностных водах районов ПЯВ: 2 – «Кристалл», 3 – «Кратон-3», 4 – «Кратон-4», 5 – на территории СБНГКМ. Отдельно показан местный и региональный фоновый уровень ^3H в поверхностных водах, равный 5-6 Бк/л.

В рассолах района ПЯВ «Кристалл» нами обнаружены следующие содержания: Li – 30-36 мг/л, В- 110-180 мг/л, Rb – 25-115 мг/л, Sr – 600-1650 мг/л, Br – 3-12 г/л, Ва – 1-6.7 мг/л, I – 4 -9.6 мг/л и также ряд других микроэлементов. Известно, что подземные рассолы Сибирской платформы обогащены редкими элементами, и они могут быть использованы в качестве жидких руд для получения Li, Ва, Rb, Sr, Br, В, I [Шварцев, 1973, Анциферов, 1989, Рябцев и др, 2004, Зелинская, Воронин, 2009, Вахромеев, 2009 и др.].

В поверхностных водах площадок ПЯВ «Кристалл», «Кратон-3», «Ока», «Шексна», «Нева-3» зафиксированы типоморфные элементы, генетически связанные с подземными рассолами: Sr – 1,5- 8.8 мг/л , Rb – 16-96 мкг/л, Br – 1.7-35 мг/л, Ва – 0.35-0.45 мг/л, I – до 0.4 мкг/л, В – до 3.5 мг/л. Помимо них также установлены (мкг/л): Be – 1.9, Y – 6.6, Co - 19, La – 7, Cr – 54, Ti – 31.7, V – 18, несвойственные местным геохимическим ландшафтам. В условиях кислородной среды лантаноидам, Co, Cr, Ti, V характерна низкая водная миграционная способность (из-за быстрого осаждения), поэтому, наверное, они обнаружены только рядом с устьями боевых скважин.

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 – одна из местных технических проблем, встречающихся при горнодобыче). Выявленные нами микроэлементы Co, Cr, Ti, V в поверхностных водах площадок ПЯВ,

возможно, связаны как с выносом вещества из металлических конструкций боевых скважин, так и с подземными рассолами. Но Be, Y, La не свойственны как местным подземным рассолам, так и поверхностным водам, и соискатель связывает их появление в пробах воды с ПЯВ, с остатками ЯВУ: известно, что в ЯВУ обычно использовался шар из металлического Be с ^{238}Pu покрытием (урчина) в качестве первичного источника нейтронов (при сжатии происходит смешение ^{238}Pu и Be с выбросом большого количества нейтронов, что снижало критическую массу тяжелой части ЯВУ, необходимую для начала ядерных реакций).

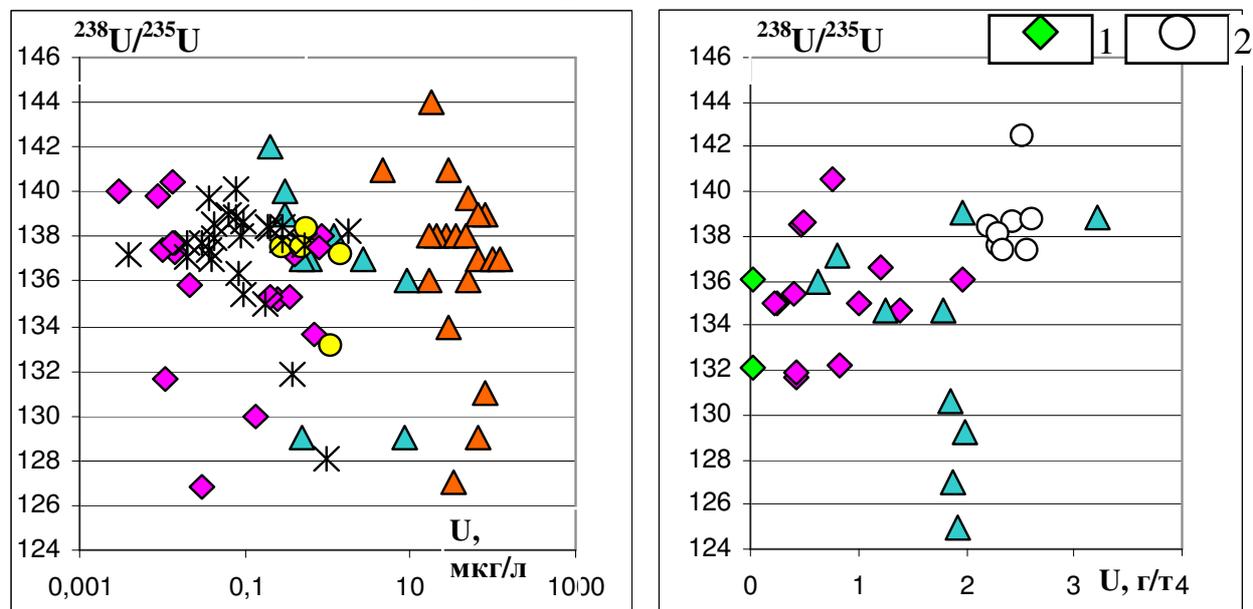


Рис.12. Изотопное отношение $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ и содержание U в подземных рассолах и поверхностных водах (слева) и в донных отложениях (справа) районов ПЯВ. Условные обозначения: 1- во мхах и лишайниках объекта «Кратон-4», 2 – в донных отложениях фоновых участков, остальные условные обозначения см. рис.11.

В подтверждение предположения выявлено, что в районах ПЯВ отношение $^{238}\text{Pu}/^{239, 240}\text{Pu}$ в поверхностных водах часто больше 1, в районе СБНКГМ $^{238}\text{Pu}/^{239, 240}\text{Pu}$ достигает 2.75, «Кратон-3» – 31.

Геохимическим ландшафтам низовья р. Вилюй, развитых на подстилающих кварц-полевошпатовых песках, Y, Co, Be, La также не свойственны, но тем не менее они выявлены в поверхностных водах и донных отложениях района ПЯВ «Кратон-4», при отсутствии других техногенных источников. В донных отложениях площадок ПЯВ и других местах выходов подземных радиоактивных флюидов выявлен рост содержания лантаноидов по сравнению с фоновыми участками, и на диаграммах эти пробы формируют отдельные геохимические поля (рис.13). Лантаноиды – это типоморфные элементы продуктов ядерного распада. Донные отложения в пределах ослабленной зоны ПЯВ «Кристалл» больше загрязнены Eu по сравнению с районом ПЯВ «Кратон-4» (рис.13).

Таким образом, радиоэкогеохимическими индикаторами переноса радионуклидов в системе «**полость взрыва – геологическая среда ... поверхность земли**» служат повышенные активности техногенных радионуклидов, превышающие местный и региональный фоновый уровень:

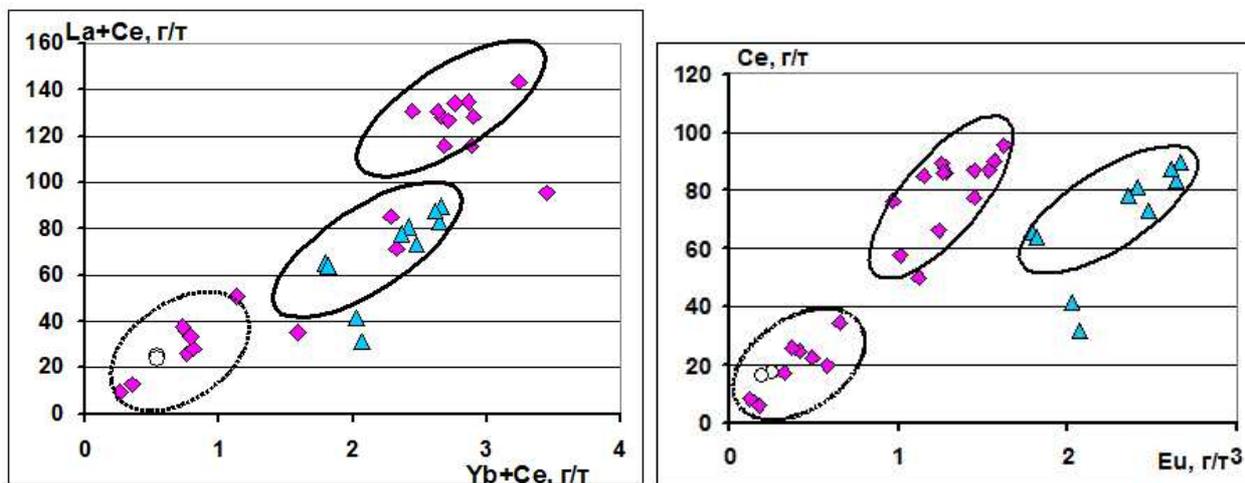


Рис.13. Отношение $La+Ce/Yb+Lu$ и Ce/Eu в донных отложениях районов ПЯВ «Кристалл» и «Кратон-4». Овалами сплошной линией показаны геохимические поля в местах выхода радиоактивных подземных флюидов, прерывистой линией – вне зоны влияния радиоактивных подземных флюидов. Условные обозначения см. рис.11.

3H – в 2-34 раза (до 170 Бк/л), ^{90}Sr – в 2-16 (до 0.04 Бк/л), $^{239+240}Pu$ – 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 $^{238}U/^{235}U$ до 126 вместо естественного 138. Поскольку смещение соотношения $^{238}U/^{235}U$ фиксируется не только в донных отложениях, но и в водных пробах, это является признаком продолжающегося процесса выхода подземных флюидов на поверхность земли. В пределах области распространения напорных подземных рассолов дополнительным индикатором выхода подземных флюидов на поверхность является существенное повышение в поверхностных водах концентраций Cl^- , Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} по сравнению с фоновыми уровнями.

Положение 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).

Повышение минерализации поверхностных вод площадок ПЯВ до 5.5 г/л из-за появления хлоридов Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , обнаружение техногенных радионуклидов и микроэлементов, несвойственных местным геохимическим ландшафтам: лантаноидов, Y, Co, Be, снижение $^{238}U/^{235}U$ в водах и донных отложениях на площадках ПЯВ показали, что ослабленные зоны вокруг боевых скважин, несомненно, являются проводниками радионуклидов из

полости взрыва. В условиях криолитозоны верхнюю часть этих ослабленных зон составляют талые «окна», сформированные в многолетнемерзлом слое. Радиометрическая съемка на площадке ПЯВ «Ока» показала, что над сухими ложбинами мощность экспозиционной дозы гамма-излучения достигает 11 мкР/ч (35 измерений на высоте 1 м) при средних показаниях МЭД на холмах в 8-9 мкР/ч (130 измерений), и это неравномерное распределение МЭД, по-видимому, обусловлено преимущественным выходом радиоактивных подземных флюидов, в т.ч. потока природного радона, по термокарстовым расщелинам в ложбинах по унаследованной полигональной сети морозобойного растрескивания (рис.14).

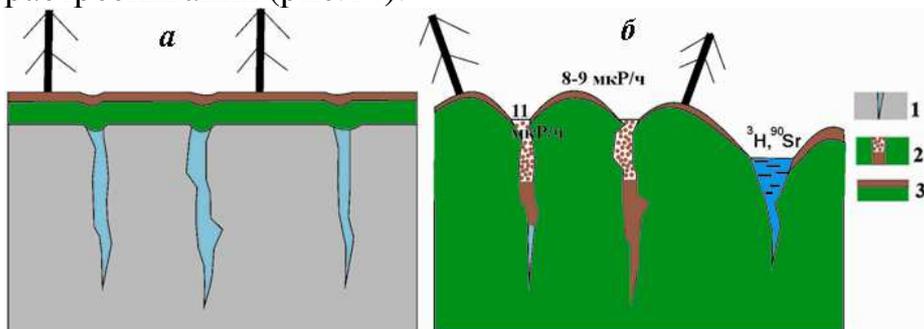
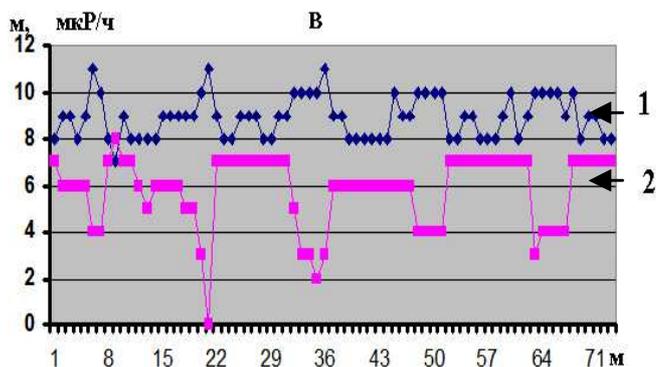


Рис.14. Формирование полигонально-холмистого рельефа (а, б) на площадках ПЯВ. Условные обозначения: 1 – полигонально-жильные льды в многолетнемерзлых породах; 2 – заполнение трещин и ложбин мелкоземом и водой в сезонно-талом горизонте; 3 – сезонно-талый слой (сверху почвенный покров). Мощность экспозиционной дозы γ -излучения на 1 м от поверхности земли (в), мкР/ч (1), перепады рельефа относительно отметки устья боевой скважины, м (2)



Перенос радионуклидов и сопутствующих элементов в системе «**полость взрыва – геологическая среда ... поверхность земли**» может осуществляться по другим природным и (или) техногенным проводящим геоструктурам:

Подземные водоносные горизонты. В карьер кимберлитовой трубки «Удачная», что находится в 3.5 км к юго-западу от объекта «Кристалл», с 1982 г. разгружаются подземные рассолы, и по мере углубления карьера растут объемы рассолов, затекающих в карьер, повышается также их минерализация [Алексеев, 2009 и др.]. Доказано, что подземные рассолы загрязнены техногенными радионуклидами. У стен и на дне карьера на уровнях от –125 до –265 абс. м в рассолах выявлены активности трития от 29.5 до 146 Бк/л, в руднике на уровне –580 абс. м – 117 Бк/л. Также в этих рассолах установлены активности (Бк/л): ^{90}Sr – до 3.9, $^{239,240}\text{Pu}$ – до 0.62, ^{238}Pu – до 0.083 [Артамонова и др., 2012].

При создании «подвешивания» объектов ПЯВ по отношению к создаваемым «геологическим окнам», как глубокий карьер кимберлитовой трубки «Удачная», подземные флюиды из зоны взрыва устремляются в депрессионную воронку, создаваемую при осушении карьера и рудника. При этом подземные водоносные горизонты, по-видимому, были приоткрыты

взрывом, и поныне служат проводником для переноса радионуклидов в геологической среде. Поскольку радионуклиды ^3H , ^{90}Sr , $^{238,239,240}\text{Pu}$, ^{137}Cs зафиксированы даже в рассолах на глубине примерно –580 абс.м (в руднике), то предполагается, что их переносу вниз по разрезу, по-видимому, способствует контактная зона кимберлитовой трубки «Удачная», отличающаяся высокой водопоглощающей способностью - трещиноватостью и флюидопроницаемостью.

В районе СБНГКМ на верховье р. Тэлгэспит в 6 км южнее от объектов ПЯВ в буровом шламе кустовых скважин (рис.10, б, т.79) на глубине 1541-1717 м установлены техногенные радионуклиды: ^{90}Sr – 1.2 - 2.9 Бк/кг, $^{239,240}\text{Pu}$ – 0.2 Бк/кг, ^{238}Pu – 0.2 Бк/кг, а там же в подземных рассолах на глубине 1541-1558 м зафиксирован ^{90}Sr – 0.049 Бк/л, 1709 м – 0.054 Бк/л, 1717 м – 0.702 Бк/л. Этот факт несомненно указывает на перенос радионуклидов по подземным водоносным горизонтам и, возможно, по тектоническим разломам (которые будут рассмотрены ниже) как по латерали, так и по вертикали – на переток на 200 м в нижезалегающие горизонты от зон взрывов. Существование в нижней части (на глубине ≥ 1800 м) геологической среды района СБНГКМ аномально-депресссионной водонапорной системы вполне допускает развитие подобной ситуации, где подземный водоносный горизонт, несомненно, служит проводящей геоструктурой для распространения радионуклидов в системе «полость взрыва – геологическая среда».

Тектонические разломы В р. Марха вблизи объекта ПЯВ «Кратон-3» установлены следующие активности техногенных радионуклидов (Бк/л): ^{90}Sr (0.078 ± 0.003), $^{239,240}\text{Pu}$ - $(6 \pm 0.24) \cdot 10^{-4}$, ^{238}Pu (18.6 ± 0.7) $\cdot 10^{-3}$, ^3H (13 ± 2.0) – (52.1 ± 2.6), сравнимые с их концентрациями в мелких водотоках мертвого леса и в стоках, вытекающих из-под навала над боевой скважиной, что указывает на отсутствие эффекта разбавления. Данный факт свидетельствует о наличии постоянного подводного выхода радионуклидов в р. Марха предположительно по цепи: «*полость взрыва – столб обрушения (ослабленная зона) – разлом*». Взрыв мог оказать воздействие на разлом, выходящий на поверхность вдоль р. Марха рядом с объектом ПЯВ. С помощью ЗМПП над полостью взрыва выявлен подъем подземных рассолов до 300 м, в 1–километровом удалении по ходу простираения разлома также наблюдается повышение уровней подземных рассолов (около 100 м). Путем проведения «третиевой съемки» выявлено несколько пиков активности трития, совпадающих при опробовании как из бочажин, ручейков, так и из речной воды, в т.ч. и по левому борту реки на расстоянии до 3 км ниже по течению от объекта ПЯВ «Кратон-3» (рис.15, 16). Активность ^3H в речной воде, ручьях и бочажинах достигает 74 Бк/л, что превышает до 15 раз местный фоновый уровень, равный 5-6 Бк/л. Эти геофизические и радиогеохимические данные подтверждают наше предположение о переносе радионуклидов по системе «*полость взрыва – столб обрушения (ослабленная зона) – разлом – поверхность земли*». Влияние радиоактивных стоков из мертвого леса исключаются из-за особенностей рельефа местности (рис.15). Просачивание активности из недр, возможно, идет и в долине р. Чукука - левого притока р. Мархи в 4 км ниже по течению от объекта ПЯВ «Кратон-3», поскольку в ней повышена активность трития в 3.5 раза по сравнению с местным фоновым уровнем.

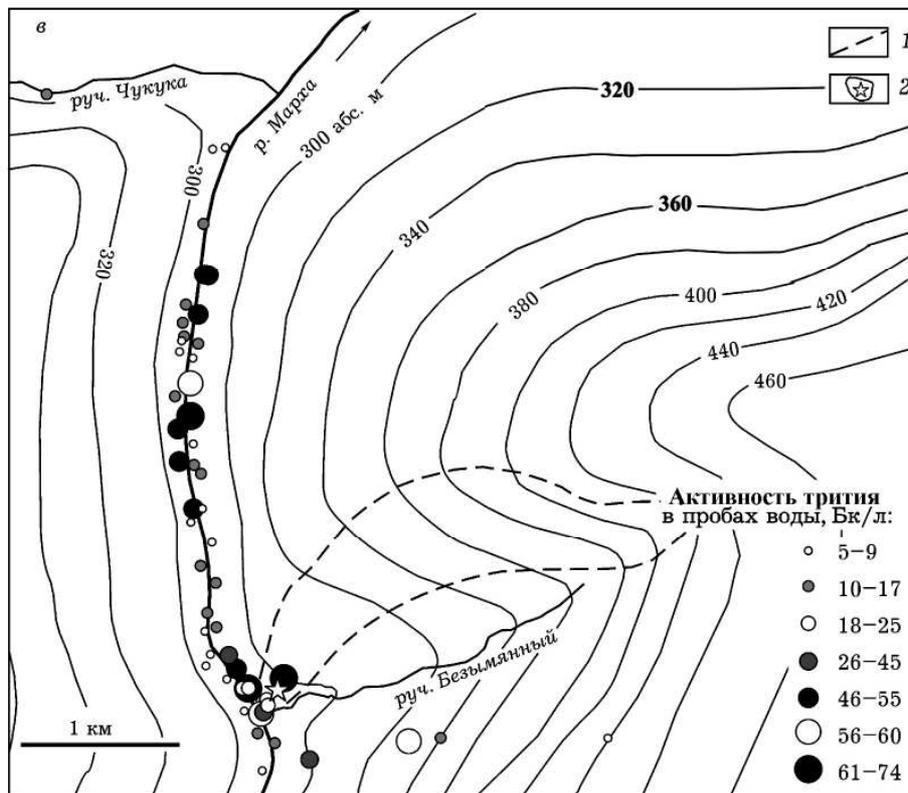


Рис.15. Схема расположения объекта ПЯВ «Кратон-3» (а) и результатов тритиевой съемки водных проб, отобранных из р. Мархи и из бочажин и ручьев по обоим бортам р. Мархи. 1 - граница леса, погибшего в результате аварийного радиационного воздействия при проведении взрыва; 2- устье боевой скважины.

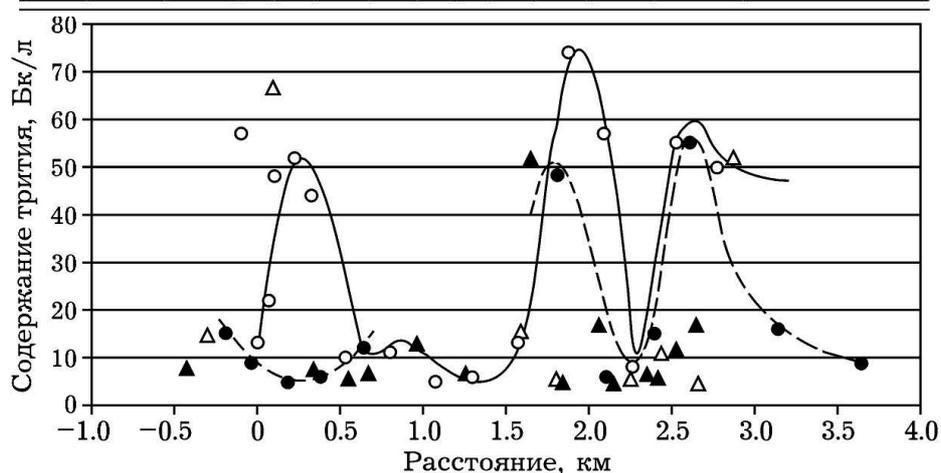


Рис.16. Активность трития в поверхностных водах долины р. Мархи (за точку отсчета принята под склоном у устья боевой скважины: 0-4 – расстояния ниже по течению, 0...-1 – выше по течению): речная вода: 1 – с правого берега, 2 – с левого берега; воды мочажин и мелких ручейков, стекающих: 3 – с правого берега, 4 – с левого берега; кривые аномалий: 5, 6 – кривые тритиевых гидрохимических аномалий на правом (5) и левом (6) берегах.

Все 7 объектов ПЯВ в районе СБНГКМ (рис.10) были произведены вблизи разломов: объект «Шексна» практически «сидит» на разломе регионального масштаба, что отмечал Микуленко К.И. с соавторами [2004, 2006]. Исследования показали, что здесь также наблюдается выход радионуклидов по зонам тектонических разломов. На это указывают выявленные высокие активности техногенных радионуклидов: ^3H – 66 Бк/л, $^{239, 240}\text{Pu}$ – (5.1×10^{-4}) Бк/л, ^{238}Pu – (1.4×10^{-3}) Бк/л в главном водотоке района – в р. Улахан-Ботубуйа в 10 км от ближайшего объекта ПЯВ, также в мелких водотоках, например: в ручье на верховье р. Тэлгэспит в 3.5 км выше по течению от объектов ПЯВ активность ^3H составляет 108 Бк/л (т.33, рис.10),

куда тритий мог попасть только по подземным флюидопроницаемым геоструктурам. Средняя активность проб поверхностных вод СБНГКМ составила 51 Бк/л.

Таким образом, в районе СБНГКМ высокая активность трития в поверхностной воде как рядом, так и на удалении до 10 км от объектов ПЯВ как в полноводной р. Улахан-Ботубуйа, так и в мелких ручьях свидетельствуют о повсеместном выходе подземной активности по сети тектонических разломов (рис.10).

Вместе с тем в районе СБНГКМ на 300-500 м выше полостей ПЯВ (за исключением Нева-4, который был произведен в соляном пласте выше по разрезу, на глубине всего 815 м) развито пластовое тело траппов с водопоглощающей контактной зоной. При расчетной высоте столбов обрушения 150-220 м минимальное расстояние до траппов оценивается всего в 80 м, и при установлении гидравлической связи флюидопроницаемая контактная зона траппов также может служить проводником для переноса радиоактивных флюидов по геологической среде. Помимо этого, высокая разбуренность территории СБНГКМ (рис. 10) создает возможность межслоевого перетекания флюидов, в том числе радиоактивных, по стволам и околоствольному пространству потерявших герметичность старых геологоразведочных буровых скважин.

Воздействие на флюидо-динамический режим: создание депрессионных воронок, закачка растворов по сети скважин при добыче нефти, возможно, усиливает миграцию радионуклидов в геологической среде. Пласты каменной соли, отличающиеся свойством залечивать трещины и разломы [Мирные..., 2001], в реальных условиях СБНГКМ, вопреки прогнозам [там же], как показали исследования, не препятствуют выходу радионуклидов с подземными напорными рассолами на поверхность земли.

Известно, что в районе СБНГКМ элизионная напорная система верхней части разреза ниже 1800-2100 м сменяется на аномально – депрессионную с дефицитом пластового давления от 2.5 до 5 МПа [Анциферов и др., 1981, 1989, Абукова и др., 2008, 2011 и др.]. Как было показано выше, первые результаты установили факт перетекания флюидов вниз на 200 м в нижезалегающие горизонты. Таким образом, в зависимости от конкретных геологических и геотехногенных условий идет перенос радиоактивных флюидов из зон ПЯВ как к поверхности земли, так и в нижезалегающие горизонты. Распространение радионуклидов в геологической среде может идти по разным путям при сочетании как естественных флюидопроницаемых геоструктур (водоносные горизонты – контактные зоны траппов (кимберлитов) – зона разломов), так и техногенных (ослабленные зоны вокруг боевых скважин, старые буровые скважины) (см. рис.17).

Объект ПЯВ «Кратон-4» расположен на глубине 574 м на восточном склоне погребенного Хапчагайского мегавала в зоне перехода Виллюйской гемисинеклизы в Предверхоаянский краевой прогиб в слаболитифицированных песчаниках и алевролитах. В условиях инфильтрационной водонапорной системы верхней части разреза радионуклиды из полости взрыва вместе с подземными водами преимущественно двигаются к востоку по склону Хапчагайского мегавала, чему способствует тектонический разлом восточного простираения [Тектоника..., 2001]. Поскольку глубина объекта «Кратон-4» ниже уровня дренажа р.Лены, выход радиоактивных стоков на поверхность земли был бы

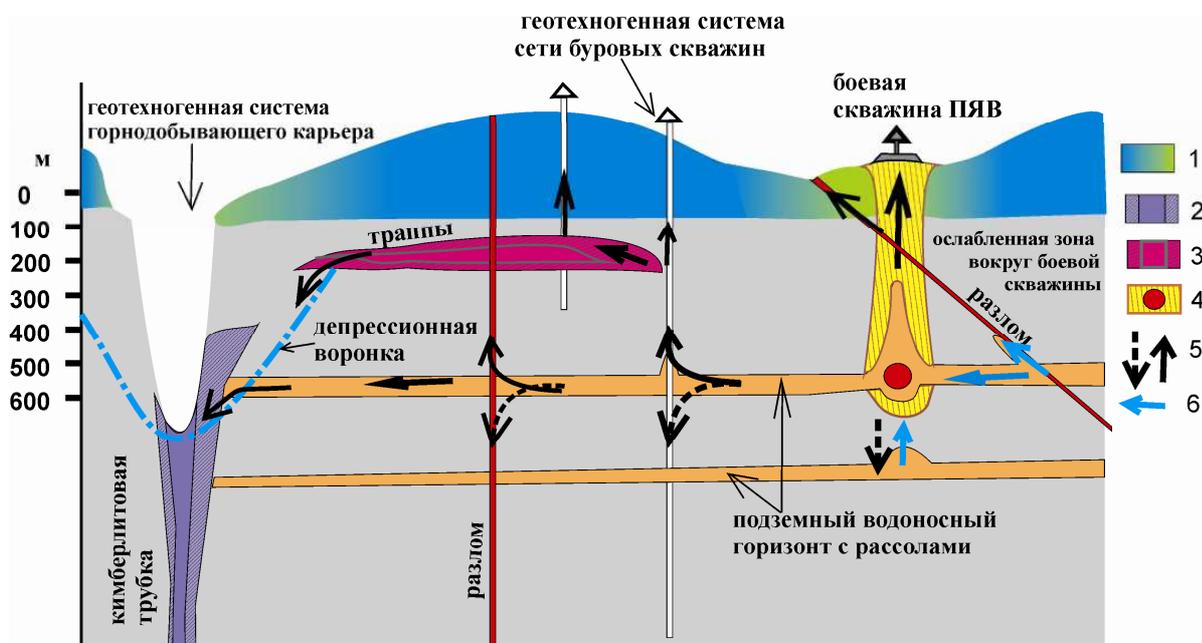


Рис.17. Модель геотехногенной системы «полость взрыва – геологическая среда - - поверхность земли» в условиях элизионной водонапорной системы (и штрихом – в условиях аномально-депресссионной водонапорной системы в нижней части разреза). Условные обозначения: 1 – многолетнемерзлые породы (зеленый - талики); 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 Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺; 6 – поступление природных подземных флюидов.

маловероятным, если бы инфильтрационная водонапорная система не осложнялась наличием алевролитовых и аргиллитовых водоупоров и поступлением восходящих глубинных потоков подземных вод по зонам надвиговых нарушений со стороны Предверхоянского прогиба. Предположение соискателя о вероятном выходе радионуклидов к востоку от объекта ПЯВ «Кратон-4» в результате их захвата восходящими потоками подземных вод получило подтверждение: в 2.6-4 км от объекта «Кратон-4» в донных отложениях озер обнаружены ¹³⁷Cs – до 54 Бк/кг, ⁹⁰Sr – до 17 Бк/кг, ^{239, 240}Pu – до 2.08 Бк/кг. К западу от объекта ПЯВ активности радионуклидов намного ниже: в 8 км в донных отложениях озера ¹³⁷Cs всего 5.7 Бк/кг, ⁹⁰Sr – 2.8-10 Бк/кг, изотопы Pu – не установлены (рис.18, а). Фоновое содержание U, Th в донных отложениях района составляют 0.5 и 2.4 г/т. Фоновое содержание U в поверхностных водах составляет 0.012 мкг/л, а Th не обнаружен. Низкие фоновые содержания Th, U соответствуют местному геохимическому ландшафту, развитому на подстилающих кварц-полевошпатовых песчаниках. Вместе с тем в пределах ослабленной зоны боевой скважины «Кратон-4» и к востоку от него в поверхностных водах концентрации U увеличиваются в 22–73 раза и составляют 0.25–0.85 мкг/л, а в донных отложениях содержание Th и U увеличивается примерно в 2 раза. Наилучшим индикатором выхода радиоактивных подземных флюидов стало изотопное ²³⁸U/²³⁵U отношение. Около боевой скважины и к востоку от

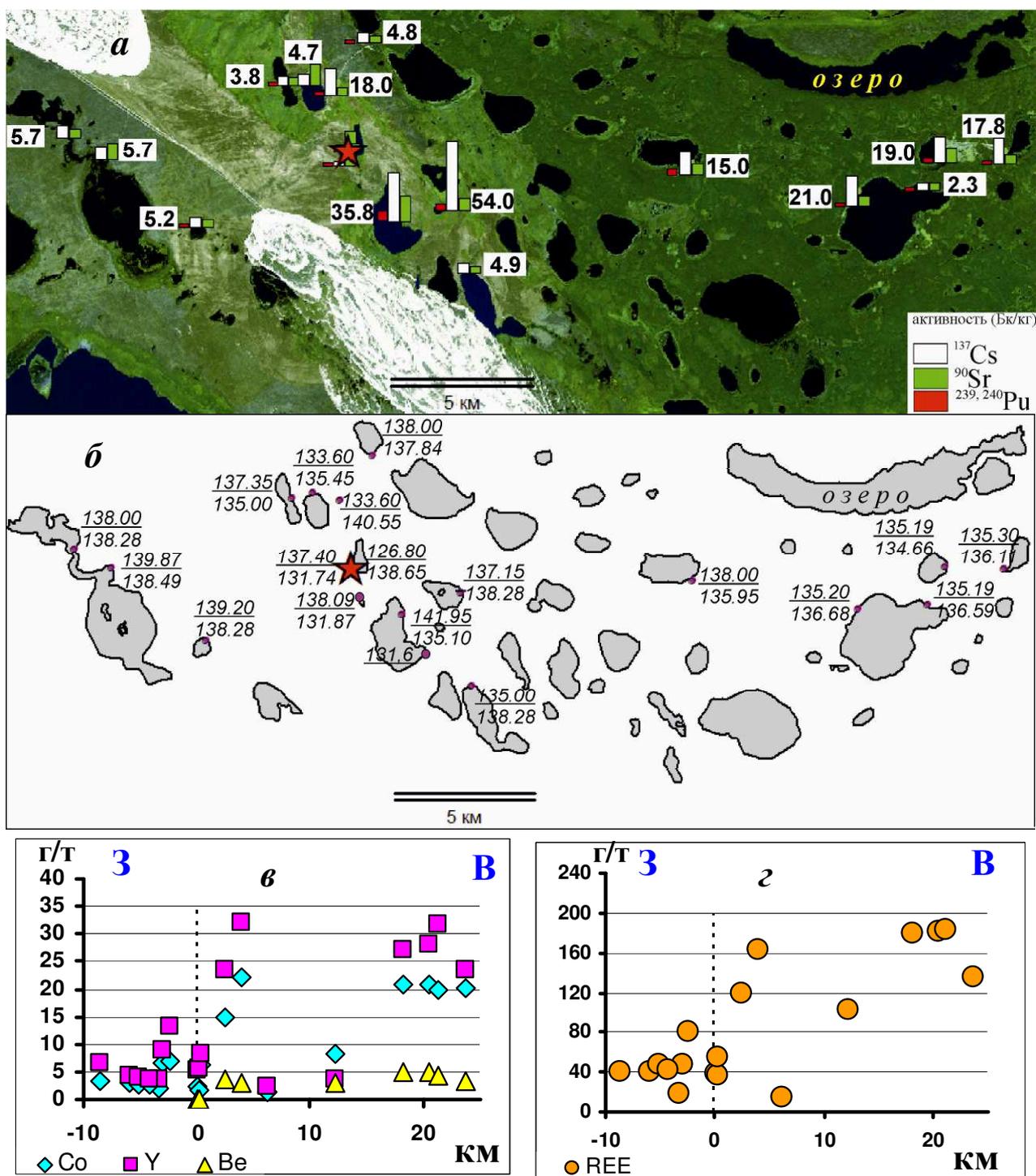


Рис.18. Гистограмма активностей радионуклидов в донных отложениях района ПЯВ «Кратон-4» (Бк/кг, активность ^{137}Cs показана рядом) (а), изотопное отношение $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$: в числителе – в поверхностных водах, в знаменателе – в донных отложениях района ПЯВ «Кратон-4» (б), содержание Co, Y, Be (г/т) (в), сумма редкоземельных элементов (REE, г/т) (г) в донных отложениях района ПЯВ «Кратон-4».

Примечание: Звездочкой показано устье боевой скважины, (а) – подложка космоснимок Landsat (1999 г.), озера видны в виде темных пятен, (б) подложка отсутствует, озера показаны серым цветом, (в) и (г) – по оси X показано расстояние (км) от устья боевой скважины ПЯВ «Кратон-4» (принятого за 0) на запад и восток.

объекта ПЯВ $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ в поверхностных водах снижено до 126,8, а в донных отложениях – до 131,74 (вместо природного 138) (рис.18, б). Если бы

поступление ^{235}U в озерно-речную систему было однократным – при проведении взрыва, то за прошедший период после взрыва $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ отношение было бы снивелировано до 138 за счет поступления природного урана с метеорными водами и размыва ^{235}U поверхностными потоками. А сохранение смещения изотопного соотношения $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ указывает на продолжающийся процесс выхода радионуклидов из зоны взрыва.

В донных отложениях 5-ти озер, расположенных к востоку от ПЯВ «Кратон-4» установлены редкие элементы: Ве – 2.9–5.1 г/т, Со – 15-21 г/т, Y – 24-32 г/т (рис.18, в), тогда как в донных отложениях других озер района Ве не установлен, а содержание Со 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 (рис.18, з), которое формирует отдельное геохимическое поле на диаграмме La+Ce/Yb+Lu (рис.13). Эти редкие элементы обнаружены в единичных пробах поверхностных вод площадки ПЯВ (Ве – 0.1 мкг/л, Со – 1.11 мкг/л, Y – 0.4 мкг/л). Таким образом, в районе ПЯВ «Кратон-4» в условиях инфильтрационной водонапорной системы распределение концентраций радиоэкогеохимических индикаторов свидетельствуют о преимущественно латеральном переносе радиоактивных флюидов в восточном направлении согласно существующих геологических и гидрогеологических условий (рис.19).

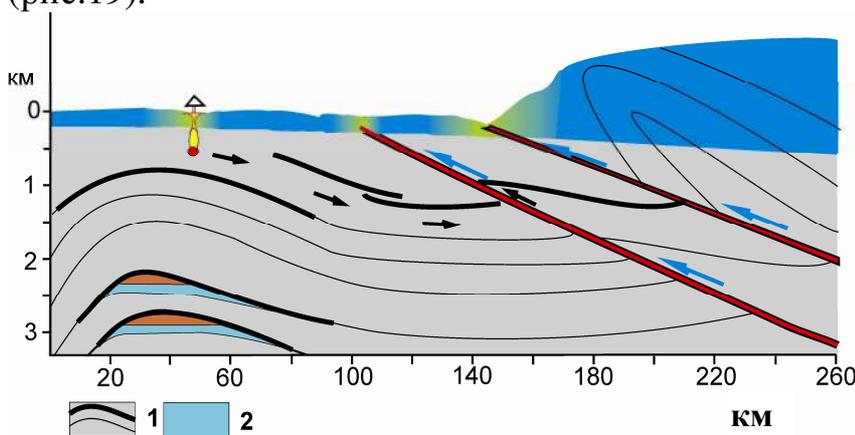


Рис. 19. Геоэкологическая модель района ПЯВ «Кратон-4». Условные обозначения: 1 – вмещающие песчаники, алевролиты с водоупорными аргиллитами (в виде черных линий), 2 – подземные водоносные горизонты; черными стрелками показаны стоки из зоны взрыва, остальные см. рис.17.

Заключение

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 ($< 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), 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: ^3H – в 2-34 раза (до 170 Бк/л), ^{90}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}Sr – 5.1 Бк/л, $^{239+240}\text{Pu}$ – 0.2 Бк/л, ^{238}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 Na^+ , Ca^{2+} , 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 основных работ по теме диссертации

Монографии:

1. Миронова, С.И. Рекомендации по отводу под самозаращение земель, нарушенных горными работами / С.И. Миронова, Ю.В. Шумилов, В.В. Иванов, С.Ю. Артамонова [и др.]. – Якутск: ИПЭС, 2001. – 81 с.
2. Шумилов, Ю.В., Проблемы и практика экологического нормирования на Севере / Ю.В. Шумилов, Д.Д. Саввинов, В.В. Иванов, С.Ю. Артамонова [и др.]. – Якутск:ИПЭС, 2001. – 325 с.
3. Журавская, А.Н. Повышенный естественный радиационный фон и растение / А.Н. Журавская, С.Ю. Артамонова. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2014. – 153 с.

Статьи в журналах списка ВАК

1. Артамонова, С.Ю. Радиоэкологическая обстановка в районе проведения мирного подземного взрыва "Кратон-3" в 1978 г. (Северо-Западная Якутия) / С.Ю. Артамонова // Химия в интересах устойчивого развития. – 2012. – Т. 20, № 2. – С. 143–155.
2. Артамонова, С.Ю. Мерзлотно-гидрогеологическое строение района мирного подземного ядерного взрыва «Кратон-3» (Якутия) по результатам

- электромагнитных зондирований / С.Ю. Артамонова, Н.О. Кожевников, Е.Ю. Антонов // Геология и геофизика. – 2013. – Т.54, №5. – С.722–736.
3. Артамонова, С.Ю. Геоэкологическая модель района мирного подземного ядерного взрыва Кристалл (Якутия) / С.Ю. Артамонова, Л.Г. Бондарева, Е.Ю. Антонов, Н.О. Кожевников // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2012. – № 2. – С. 143–158.
 4. Аргунова, Т.В. Геохимические особенности поверхностных вод Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения / Т.В. Аргунова, А.С. Терентьев, И.О. Тихонов, С.Ю. Артамонова // Разведка и охрана недр. – 2012. – № 7. – С. 26–29.
 5. Кожевников, Н.О. Геоэлектрический разрез в районе подземного ядерного взрыва "Кристалл" (Западная Якутия) по данным метода переходных процессов / Н.О. Кожевников, Е.Ю. Антонов, С.Ю. Артамонова, А.Е. Плотников // Геология и геофизика. – 2012. –Т. 53, № 2. – С. 237–249.
 6. Артамонова, С.Ю. Техногенные радионуклиды в природных водах районов мирных подземных ядерных взрывов «Кратон-3» и «Кратон-4» / С.Ю. Артамонова // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2013. – № 5. – С. 417–428.
 7. Аргунова, Т.В. Геоэкология: геотехногенные системы мирных подземных ядерных взрывов в юго-западной Якутии / Т.В. Аргунова, С.Ю. Артамонова // Инженерная экология. – 2014. – № 4 (118). – С.27–47.
 8. Артамонова, С.Ю. Пути решения радиоэкологических проблем в районе мирных подземных ядерных взрывов на территории Якутии / С.Ю. Артамонова, Л.И. Разворотнева // Российский химический журнал. – 2010. – Т. LIV, № 3. – С. 162–171.
 9. Артамонова, С.Ю. Техногенное загрязнение при золотодобыче и реакция экосистем в зоне многолетней мерзлоты / С.Ю. Артамонова, В.А. Данилов // Химия в интересах устойчивого развития. – 2004. – Т.12, №1. – С. 19–32.
 10. Смоляков, Б.С. Оценка последствий комплексного загрязнения пресного водоема солями металлов с помощью мезокосмов / Б.С. Смоляков, С.Б. Бортникова, М.В. Жигула, А.А. Богуш, Н.И. Ермолаева, С.Ю. Артамонова // Водные ресурсы. – 2004. – Т.31, № 3. – С.365–374.
 11. Артамонова, С.Ю. Влияние атмосферного загрязнения на экосистемы Нерюнгринского топливно-энергетического комплекса (Якутия) / С.Ю. Артамонова, Ю.П. Колмогоров, В.Ф. Рапута, Т.В. Ярославцева // Химия в интересах устойчивого развития. – 2005. – Т. 13, № 4. – С. 491–500.
 12. Артамонова, С.Ю. Использование результатов РФА-СИ метода при оценке экологического состояния Алданского золотодобывающего района (Якутия) / С.Ю. Артамонова, Ю.П. Колмогоров // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2005. – № 9. – С.16–20.
 13. Артамонова, С.Ю. Тяжелые металлы в тканях лиственницы Нерюнгринского промышленного комплекса (по данным РФА-СИ) / С.Ю. Артамонова, Ю.П. Колмогоров // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2005. – № 9. – С.21–24.
 14. Артамонова, С.Ю. Минерально-геохимические индикаторы техногенных источников аэрозольного загрязнения / С.Ю. Артамонова, А.С. Лапухов, Л.В. Мирошниченко, Л.И. Разворотнева // Химия в интересах устойчивого развития. – 2007. – Т.15, № 6. – С. 643–652.

15. Артамонова, С.Ю. Экология городов: анализ и оценка с помощью РФА-СИ на примере Новосибирска / С.Ю. Артамонова // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2011. – № 11. – С. 66–71.
16. Артамонова, С.Ю. Геохимические особенности аэрозольного загрязнения в районе Сибирского химического комбината / С.Ю. Артамонова // Химия в интересах устойчивого развития. – 2012. – Т. 20, № 4. – С. 405–418.
17. Артамонова, С.Ю. Уран в техногенных аэрозолях промышленных районов Новосибирска / С.Ю. Артамонова // Химия в интересах устойчивого развития. – 2012. – Т. 20, № 5. – С. 507–513.
18. Артамонова, С.Ю. Отвалы горных выработок Эльконского горста как источники естественных радионуклидов и токсичных элементов / С.Ю. Артамонова, М.С. Мельгунов, В.Н. Дементьев, Л.В. Мирошниченко // Химия в интересах устойчивого развития. – 2012. – Т. 20, № 3. – С. 305–319.
19. Журавская, А.Н. Радионуклиды и тяжелые металлы в системе "радиоактивные отвалы - грунт - растение" и их влияние на семенное потомство ольховника кустарникового (*Duschekia fruticosa* (Rupr) Pouzar) / А.Н. Журавская, С.Ю. Артамонова, Г.В. Филиппова // Сибирский экологический журнал. – 2012. – № 2. – С. 295–303.
20. Артамонова, С.Ю. Химический и фазовый состав техногенных аэрозолей в районе Сибирского химического комбината (Томская область) / С.Ю. Артамонова // Химия в интересах устойчивого развития. – 2014. – Т. 22, № 3. – С. 229–240.

В других рецензируемых журналах

1. Artamonova, S.Yu. Synchrotron X-ray fluorescent analysis application in biogeochemical investigations in Yakutia / S.Yu. Artamonova, Yu.P. Kolmogorov // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research [Sec. A.]. – 2009. – Vol. 603, № 1/2. – P. 128–130.
2. Bondareva, L. The relationship of mineral and geochemical composition to artificial radionuclide partitioning in Yenisei river sediments downstream from mining-and-chemical combine Rosatom / L. Bondareva, S. Artamonova // Natural Science. – 2011. – Vol. 3, № 7. – P. 517–529.
3. Артамонова, С.Ю. Геоэкологическая модель района мирного подземного ядерного взрыва "Кратон-3" (Сибирская платформа) / С.Ю. Артамонова, Н.О. Кожевников, Е.Ю. Антонов, В.Е. Ушницкий // Вестник НЯЦ РК: научн.-техн. журнал Национального ядерного центра Республики Казахстан. – 2012. – № 2(50). – С. 121–133.
4. Artamonova, S.Yu. Technogenic radionuclides of peaceful underground nuclear explosion Kraton-3 area / S.Yu. Artamonova // Вестник НЯЦ РК: научн.-техн. журнал Национального ядерного центра Республики Казахстан. – 2012. – № 2(50). – P. 134–142.
5. Artamonova, S.Yu. Geotechnogenic system of Crystall peaceful underground nuclear explosion / S.Yu. Artamonova, V.E. Ushnitskiy, E.Yu. Antonov, N.O. Kojevnikov // Вестник НЯЦ РК: научн.-техн. журнал Национального ядерного центра Республики Казахстан. – 2012. – № 2(50). – P. 115–120.

В научных сборниках и трудах конференций

1. Artamonova, S., Geocological model of Crystall peaceful underground nuclear explosion (Siberian plate) / S. Artamonova, E. Antonov, N. Kojevnikov // SGEM: Proceedings of 11th International Multidisciplinary Scientific

- GeoConference, Bulgaria. – Albena, 2011. –V.3. – P.381–388. – режим доступа: [http:// www.sgem.org](http://www.sgem.org)
2. Артамонова, С.Ю. Экологические последствия мирных подземных ядерных взрывов на примере объектов «Кристалл» и «Кратон-3» / С.Ю. Артамонова, Л.И. Разворотнева, Л.Г. Бондарева, П.И. Собакин, Н.О. Кожевников, Е.Ю. Антонов, С.Н. Олесов // Радиохимия-2009: Матер. VI-й Российской конф. г. Москва, 12-16 октября, 2009. – Москва: STT, 2009. – С.313.
 3. Разворотнева, Л.И. Методы экобезопасной геоконсервации жидких радиоактивных отходов / Л.И. Разворотнева, С.Ю. Артамонова // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Матер. III Международной конференции, г. Томск, 23-27 июня 2009 г. – Томск: STT, 2009. – С. 484-487.
 4. Артамонова, С.Ю. Пути решения радиоэкологических проблем в районе аварийного мирного подземного ядерного взрыва «Кратон-3» / С.Ю. Артамонова // Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия): Матер. III республ. науч.-практ. конф. (г. Якутск, 18-20 октября 2011 г.). – Якутск: [б.и], 2012. – С. 193-210.
 5. Аргунова, Т.В. Радиоэкологическая обстановка на территории Средне-Ботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения / Т.В. Аргунова, С.Ю. Артамонова // Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия): Матер. III республ. науч.-практ. конф. (г. Якутск, 18-20 октября 2011 г.). – Якутск: [б.и], 2012. – С. 253-268.
 6. Артамонова, С.Ю. Тритий в природных водах платформенной части Якутии / С.Ю. Артамонова, Л.Г. Бондарева // Радиохимия-2012: Матер. VII Российской конф., г. Димитровград, 15-19 октября 2012 г. – Димитровград: ВДВ ПАК, 2012. – С. 310.
 7. Аргунова, Т.В. Радиоэкологическая обстановка на территории Средне-Ботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения (Западная Якутия) / В.Е. Ушницкий, С.Ю. Артамонова // Геолого-геохимические проблемы экологии: Тез. докл. Всероссийской научно-практ. конференции (Москва, 26-27 апреля 2012 г.). – М.: ИМГРЭ, 2012. – С. 79–80.
 8. Артамонова, С.Ю. Геоэкологическая обстановка в районе кимберлитовой трубки "Удачная" (Западная Якутия) / С.Ю. Артамонова, Е.Ю. Антонов, Н.О. Кожевников // Геолого-геохимические проблемы экологии: Тез. докл. Всероссийской научно-практ. конференции (Москва, 26-27 апреля 2012 г.). – М.: ИМГРЭ, 2012. – С. 92–93.
 9. Артамонова, С.Ю. Геоэкологическая модель района мирного подземного ядерного взрыва «Кратон-3» (Сибирская платформа) / С.Ю. Артамонова, Н.О. Кожевников, Е.Ю. Антонов, В.Е. Ушницкий // Мониторинг ядерных испытаний и их последствий: Тез. докл. VII Междунар. конф. (Курчатов, Казахстан, 6-10 августа 2012 г.). – Курчатов: Изд-во НЯЦ РК, 2012. – С. 90.
 10. Артамонова, С.Ю. Геотехногенные системы мирных подземных ядерных взрывов как источники радиоактивного загрязнения геологической среды / С.Ю. Артамонова // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Матер. IV Международной конференции, г. Томск, 4-8 июня 2013 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. –С. 63-68.