

*На правах рукописи*



ШЕМЕЛИНА ОЛЬГА ВЛАДИМИРОВНА

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ МИГРАЦИИ УРАНА  
В НИЗКОРАДИОАКТИВНЫХ ХРАНИЛИЩАХ ОТХОДОВ  
(НА ПРИМЕРЕ АО АЭХК)**

Специальность 25.00.09  
Геохимия, геохимические методы  
поисков полезных ископаемых

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Новосибирск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского Отделения Российской Академии наук, г. Новосибирск

**Научный руководитель:**

**Богуславский Анатолий Евгеньевич**, кандидат геолого- минералогических наук, заведующий лабораторией моделирования динамики эндогенных и техногенных систем № 213 Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

**Официальные оппоненты:**

**Птицын Алексей Борисович**, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник ИПРЭК СО РАН

**Рихванов Леонид Петрович**, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры Геоэкологии и геохимии ТПУ

**Ведущая организация:**

ФГБУН Институт физической химии и электрохимии имени А. Н. Фрумкина РАН (ИФХЭ РАН)

Защита состоится «17» декабря 2019 года в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.067.02, созданного на базе ФГБУН Института геологии и минералогии имени В.С. Соболева СО РАН, в конференц-зале ИГМ СО РАН.

Адрес: 630090 г. Новосибирск, проспект академика Коптюга, д.3.  
факс: (383) 333-21-30; e-mail: [gaskova@igm.nsc.ru](mailto:gaskova@igm.nsc.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (адрес сайта <http://www.igm.nsc.ru>, раздел «Образование»).

Автореферат разослан « 25 » октября 2019 г

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор геолого-минералогических наук



О.Л. Гаськова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследований** Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) в 2014 году выпустило Специальное руководство по безопасности (IAEA Specific Safety Guide). В нем говорится, что всесторонняя характеристика участков размещения радиоактивных отходов (РАО) должна быть обоснована *научными исследованиями* для решения глобальной проблемы устойчивого развития биосферы. Прежде всего, это должно быть описание природной системы и ее значимых особенностей, событий и процессов, связанных с геологией, гидрологией, геохимией, метеорологией и т.д. Не менее важна и оценка пространственной и временной изменчивости участка предполагаемого захоронения РАО.

Именно с этих позиций были проведены комплексные исследования закономерностей миграции урана в хранилищах низкорadioактивных отходов (НРАО) на примере АО Ангарского электролизно-химического комбината (АО АЭХК). Комбинат работает с 1957 года, но первые научные исследования были проведены лишь в 1997 группой исследователей ОИГГМ СО РАН под руководством д.г.-м.н. Ковалева В.П. Основное внимание тогда было уделено хранилищу твердых радиоактивных отходов (ТРАО). Ряд вопросов, связанных с хранилищами пульпы с содержанием урана, оставался нерешенным. После детальных полевых исследований, выполненных исследователями ИГМ СО РАН, в том числе автором, были оценены геохимические свойства вмещающих грунтов и подземных вод с точки зрения формирования условий, в которых естественным образом снижаются миграционные свойства радионуклидов. Кроме этого, исследовались процессы, способные влиять на растворимость и/или сорбцию радионуклидов. Такие данные позволяют обосновать технические усовершенствования и предусматривать меры безопасности при планировании аналогичных сооружений.

В России в целом работами такого рода заняты специалисты разных направлений, в т.ч. экологи и химики. Геологическими аспектами захоронения РАО занимался академик Лаверов Н.П. На протяжении последних двух десятков лет выполняются работы на различных предприятиях топливно-ядерного цикла, направленные на решение как локальных проблем, так и с целью создания и развития фундаментальных основ безопасного хранения и захоронения РАО (Жариков и др., 2013; Бондарева, 2015; Митев и др., 2018; Чернышова и др., 2018; Богуславский, 2016; Леонова и др., 2005; Карпенко и др., 2018; Монич, 2013; Зубков и др., 2007; Самсонова и др., 2008; Александрова, 2008; Кузьменкова и др., 2011; Величкин и др., 2008; Андреев и др., 2013; Мокров и др., 2018 и многие другие)

Законодательно приоритетность таких исследований определена Указом Президента РФ №176 19 апреля 2017 г. В этом документе особое внимание уделено задачам по предотвращению загрязнения поверхностных и

подземных вод, повышения уровня утилизации отходов, в том числе радиоактивных, об активизации фундаментальных и прикладных научных исследований в области охраны окружающей среды и природопользования. Данная диссертация посвящена решению именно такого рода задач.

**Объектом исследования** является техноприродная система, включающая грунты и подземные воды шламового поля АО АЭХК и прилегающих территорий. Шламовое поле представляет собой накопительную площадку с наземными и подземными сооружениями для хранения низкорadioактивных отходов, расположенную в непосредственной близости от комбината.

**Цель исследования** состоит в определении влияния шламохранилищ низкорadioактивных отходов на прилегающие к ним участки с количественной оценкой техногенных воздействий в долгосрочной перспективе, как основы природоохранной деятельности.

Для достижения обозначенной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Определение форм нахождения урана при миграции загрязнений за пределы комплекса хранилищ РАО.
2. Характеристика буферных свойств вмещающей среды: ёмкости вмещающих грунтов, типов возникающих геохимических барьеров и формирующихся на них вторичных геохимических аномалий.
3. Определение направления и обратимости изменений во вмещающих породах, вызванных дренажными потоками от границ хранилища, на основании изучения минерального состава грунтов на микроуровне.
4. Оценка долгосрочного влияния шламохранилищ на грунтовые воды и вмещающие грунты участка и прилегающих территорий.

**Фактический материал и личный вклад автора.** На изучаемом участке во время полевых работ были отобраны материалы из шести скважин глубиной от 6 до 12,5 м. Всего проанализировано порядка сотни образцов грунтов и почв, более трех десятков проб грунтовых вод, образцы шлама. Кроме того, в распоряжении автора были данные мониторинга химического состава грунтовых вод по наблюдательным скважинам за почти 12 лет, предоставленные комбинатом. В общей сложности различными методами выполнено порядка 2000 элементо-определений.

Основная часть работ проводилась при непосредственном участии автора, начиная от планирования места проходки скважин, а также – пробоотбор и пробоподготовка, лабораторные анализы (титриметрический метод) и эксперименты, обработка полученных данных, в том числе методами ГИС, написание статей.

#### **Защищаемые положения.**

1. Состояние подземных вод в зоне влияния шламохранилищ урансодержащих низкорadioактивных отходов АО АЭХК обусловлено наличием

инфильтрационного стока высокоминерализованных щелочных нитратных растворов. Главными компонентами стока являются ионы  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ .

**2.** Инфильтрация высокоминерализованных растворов из шламохранилищ приводит к изменению свойств вмещающих грунтов – загипсованию, а также к преобразованию смектитов и смешаннослойных минералов (СММ) с преобладанием смектитовых пакетов в СММ с преобладанием иллитовых пакетов. Концентрация урана в подстилающих грунтах в некоторых пунктах опробования превышает фон в 2-4 раза и достигает 6-11 г/т. Сорбированный на этих грунтах уран находится преимущественно в подвижной форме (до 50%).

**3.** При консервации хранилища ожидается постепенное исчезновение гидрохимической аномалии в подземных водах участка вследствие разбавления фоновыми грунтовыми водами: сдвиг рН в сторону нейтрального, снижение минерализации, основным ведущими ионами будут  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{Ca}^{2+}$ . В существующих геохимических условиях количество урана (всего около 4 тонн), которое может быть потенциально вынесено стоками из шламохранилищ, сопоставимо с объемами урана, мигрирующего в природе.

**Научная новизна.** На примере шламового поля АО АЭХК впервые проведено комплексное геохимическое изучение техно-природной системы участка хранения низкорadioактивной пульпы с остаточным содержанием урана с целью определения механизмов выноса урана. Дана оценка изменяющихся геохимических параметров на прилегающих территориях после остановки основных производств комбината и долговременной консервации хранилищ РАО. Определены формы нахождения урана при миграции загрязнений за пределы комплекса хранилищ РАО. Отмечены изменения во вмещающих грунтах и охарактеризованы их свойства.

**Практическая значимость.** Полученные данные позволяют проследить ореолы загрязнения, закономерности распределения ионов, концентрации которых превышают ПДК элементов в воде ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ), формы нахождения урана. На основе полученных характеристик участка шламового поля сделан прогноз дальнейших миграционных путей урана, поступающего из хранилища РАО. Подсчитанный объем выноса урана при текущем состоянии хранилищ и при сценариях опасных геологических условий (подтопления) позволяет оценить экологическую опасность последствий современной технологической деятельности.

**Соответствие результатов работы научной специальности.** Работа выполнена по специальности 25.00.09 «геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых», которая предполагает исследования в области знаний о формах нахождения и поведения химических элементов в природных и техногенных процессах, об условиях концентрирования и рассеяния элементов.

**Апробация работы.** Результаты исследований были представлены и обсуждены на научных конференциях: XIII международная конференция «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле», Москва, 2012; XIX национальная конференция по использованию Синхротронного Излучения «СИ-2012», Всероссийская молодежная конференция «Использование синхротронного излучения», Новосибирск, 2012; VII Международная научно-практическая конференция «Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде», Семипалатинск, Казахстан, 2012; IV Международная конференция «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека», Томск, 2013; The 8th International Conference Interfaces Against Pollution (IAP) «Interfaces in Water and Environmental Science», Netherland, 2014; Всероссийская научная конференция с международным участием, посвященная 120-летию со дня рождения члена-корреспондента АН СССР профессора Ф.Н. Шахова «Благородные, редкие и радиоактивные элементы в рудообразующих системах», Новосибирск, 2014; Всероссийский ежегодный семинар по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии ВЕСЭМПГ-2015, Москва, 2015; Всероссийская международная конференция с международным участием «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами», Владивосток, 2015; V Международная конференция «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека», Томск, 2016; 15<sup>th</sup> Water-Rock Interaction International Symposium WRI-15, Evora, Portugal, 2016; Совещание, приуроченное к 60-летию Института геологии и геофизики СО АН СССР «Геология и минерагения Северной Евразии», Новосибирск, 2017; II International Symposium «Clays and Ceramics», Riga, 2018. По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ (статей и тезисов докладов), в том числе 5 статей в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК и/или индексируемых в системе Web of Science.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы (136 наименований), а также содержит 38 рисунков и 18 таблиц, всего 154 страницы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, обозначены объект, цель и задачи исследования, фактический материал и личный вклад автора, а также научная новизна и практическая значимость. Кроме того, сформулированы защищаемые положения и перечислены основные научные мероприятия, на которых были представлены результаты работы. **Первая глава** посвящена обзору литературных данных о геохимических свойствах урана и особенности его поведения в природных и техноприродных системах, относящихся к зоне гипергенеза. Во **второй главе** подробно описан объект исследования. Общее геологическое строение, геоморфологическая и

гидрогеологические характеристики даны по материалам объяснительной записки к геологической карте N-48-XXXII масштаба 1:200000 (1965). Описание сооружений для хранения твердых и жидких радиоактивных отходов, их технические и эксплуатационные характеристики, характер наполнения, качественный и количественный состав содержимого даны по материалам, предоставленным АО АЭХК. В **третьей главе** перечислены методы исследований, а также описаны параметры проведенных экспериментальных работ. **Четвертая глава** посвящена гидрогеохимическим особенностям участка. Рассмотрен состав фоновых грунтовых вод, состав высокоминерализованных растворов, проникающих из хранилищ во внешнюю среду, рассчитаны объемы загрязненных подземных вод. В **пятой главе** описана «твердая» составляющая объекта исследований: твердая фаза низкорadioактивных отходов, вмещающие грунты, их свойства и преобразования под воздействием техногенного влияния. В **шестой главе** предпринята попытка спрогнозировать дальнейшее развитие техноприродной системы на основе моделирования взаимодействия вода-порода на рассматриваемом участке. В **заключении** сформулированы основные результаты проделанной работы.

## **ОБОСНОВАНИЕ ВЫНОСИМЫХ НА ЗАЩИТУ ПОЛОЖЕНИЙ**

**Первое защищаемое положение.** *Состояние подземных вод в зоне влияния шламохранилищ урансодержащих низкорadioактивных отходов АО АЭХК обусловлено наличием инфильтрационного стока высокоминерализованных щелочных нитратных растворов. Главными компонентами стока являются ионы  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Na^+$ .*

Глубина наземных емкостей-шламохранилищ низкорadioактивных отходов составляет от 3 до 4 м от поверхности земли. При этом уровень грунтовых вод (УГВ) на участке, в зависимости от рельефа, изменяется от 1,7 до 5,8 м. Непосредственно под дном шламохранилищ УГВ находится на глубине 5,4-5,8 м. По данным многолетнего мониторинга минимальное расстояние (зона аэрации) от УГВ до дна шламохранилищ составляло 0,77 м, максимальное – 1,38 м. Таким образом непосредственного контакта сооружений с грунтовыми водами не происходит. Однако, несмотря на гидроизоляцию шламохранилищ, в подземный сток все же попадает некоторое количество высокоминерализованных растворов из отходов. В результате инфильтрации этих растворов характеристики грунтовых вод в непосредственной близости от шламохранилищ существенно изменены. Прежде всего, рельеф зеркала грунтовых вод отличается наличием гидродинамического купола растекания, образовавшегося из-за просачивания высокоминерализованных растворов. Уплощенный свод этого купола располагается под отстойниками IV, V, VI хранилища ЖРО (рис. 1). Длинная ось этой гидродинамической структуры ориентирована на северо-запад.

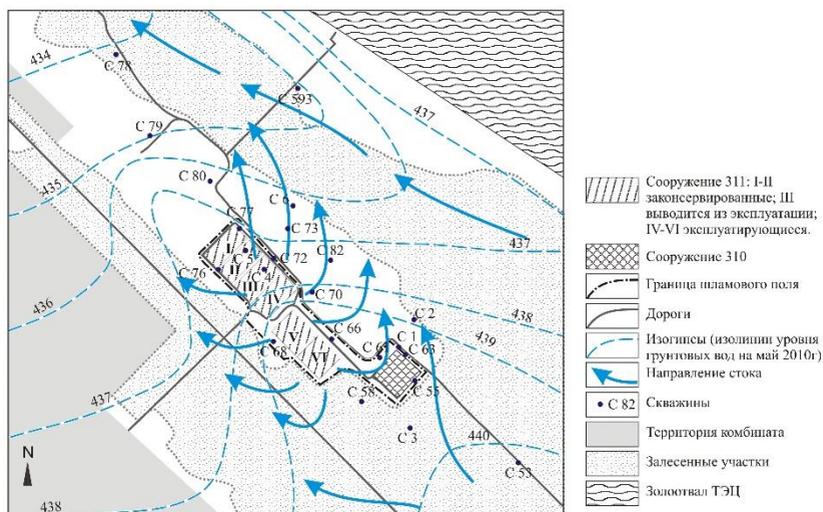


Рис. 1. Направление потоков грунтовых вод на участке

Рассматриваемые фоновые грунтовые воды относятся к первому от поверхности водоносному горизонту, приуроченному к юрским песчаникам и четвертичным песчано-глинистым аллювиальным отложениям. Основное питание осуществляется за счет атмосферных осадков. По химическому составу для района исследования характерны гидрокарбонатные магниевые-кальциевые воды со средней минерализацией 0.3 г/л. Из катионов преобладает кальций, концентрации натрия и калия очень малы. Содержание урана составляет 0.1-1 мкг/л. В поверхностных водах (р. Ангара) содержание урана оценивается в 0.57 мкг/л (отчет ЛИН СО РАН, 2007).

Жидкая фаза содержимого шламохранилищ по химическому составу является щелочным многокомпонентным раствором с высокими значениями рН (до 10-11), минерализацией более 5 г/л, а иногда превышающей значение в 30 г/л. Отличительной чертой является присутствие в составе растворов иона аммония (от сотен мкг/л до первых г/л), одновременно с нитратами и сульфатами. Проникающие в грунты высокоминерализованные растворы достигают грунтовых вод, смешиваются с ними и далее распространяются с потоком. На расстоянии от хранилища ЖРО концентрации загрязняющих элементов постепенно уменьшаются под действием разбавления и сорбции катионов на грунтах, приближаясь к фоновым значениям. В результате в грунтах и водах шламового поля формируются техногенные аномалии, как непосредственно под хранилищем РАО, так и по направлению движения загрязненных грунтовых вод.

### *Основные компоненты-загрязнители.*

*Соединения азота.* Содержание иона аммония  $\text{NH}_4^+$  изменяется от  $<0.05$  до 2450 мг/л. Максимальные концентрации фиксируются в районе действующей карты 311/5. Через 50-100 м аммоний обнаруживается уже в следовых количествах, едва достигая 0.2 мг/л (0.1 ПДК). Неустойчивость концентраций аммония обусловлена химической неустойчивостью иона, который переходит при определенных условиях в нитрат- и нитрит-ионы, кроме того, он хорошо сорбируется. В отличие от иона аммония, нитрит-ион  $\text{NO}_2^-$  присутствует во всех пробах грунтовых вод в небольших количествах. Распространение наибольших значений этого компонента коррелирует с уменьшениями значений Eh и pH. Окисление аммонийного азота приводит к появлению нитритов. Поскольку процесс окисления на этом не останавливается, то в водах появляется еще более устойчивый нитрат-ион  $\text{NO}_3^-$ . Условия для нитрификации вполне благоприятны: практически по всему шламовому полю окислительно-восстановительная обстановка меняется от слабо-восстановительной до окислительной (Eh выше +300 мВ), за исключением единичных отдельных точек с ярко выраженными восстановительными условиями.

*Сульфат-ион.* Среднемноголетние концентрации сульфат-иона изменяются от 10 до 24400 мг/л, при фоновых значениях 10-50 мг/л. Значительная разница в концентрациях иона объясняется неоднородностями фильтрационного поля, а также пересыщением растворов кальцием и сульфат-ионом и, как следствие, образованием гипса.

Основным катионом в химическом составе грунтовых вод является кальций, а в высокоминерализованных растворах - натрий. Одновременно со снижением концентраций кальция снижаются и концентрации карбонат-иона. Это связано с образованием твердой фазы  $\text{CaCO}_3$  и ее выпадением из раствора. Однако непропорциональность концентраций этих компонентов в стоках ( $\text{Ca}^{2+} < \text{CO}_3^{2-}$ ) не может обеспечить полное удаление карбонат-иона. По всей видимости, дополнительный кальций поступает в раствор в результате адсорбционно-обменных реакций вода-порода. При этом уменьшается и содержание в жидкой фазе натрия, который преобладает среди катионов в высокоминерализованных растворах, попадающих в подземный сток. Максимальные концентрации ( $>600$  мг/л) фиксируются в районе действующей карты 311/5. Далее по потоку грунтовых вод в пределах шламового поля содержание натрия довольно быстро снижается до ПДК<sub>В</sub> (200 мг/л) и ниже. Содержание калия в высокоминерализованных растворах достигает 50-140 мг/л. Однако в подземных водах его содержание значительно снижается. Это объясняется сорбционной активностью вмещающих пород. И, наконец, содержание урана в загрязненных водах изменяется от 0,0001 до 0,0079 мг/л, со средним значением 0,001 мг/л.

На основании многолетних данных по химическому составу подземных вод на участке очерчена загрязненная зона, которая в свою очередь разделена на сильно- и слабозагрязненную. Основным разделяющим параметром послужили значения общей минерализации. Поскольку в разные годы в разных скважинах пробоотбор воды осуществлялся от 2 до 6 раз в год, для выделения зон были использованы среднегодовые значения общей минерализации. По градации, принятой автором для моделирования, содержание <1000 мг/л характеризует пресные воды, от 1000 до 2000 мг/л – слабозагрязненные воды, >2000мг/л – сильнозагрязненные воды. Основные параметры этих зон отражены в таблице 1.

Табл. 1. Основные параметры техногенно загрязненной зоны (на 2011 г.)

		<b>Пресные</b>	<b>Слабо загрязненные</b>	<b>Сильно загрязненные</b>
Параметр	ед.изм.	Среднее (макс-мин)/ кол-во значений	среднее (макс-мин)/ кол-во значений	среднее (макс-мин)/ кол-во значений
Общая мин-я	мг/л	297 (10-730) /14	1473 (90-3340) /6	4579 (1870-9050) /11
pH		7.18 (6.31-7.61) /15	7.24 (7.1-7.4) /6	8.47 (7.3-9.90) /11
Eh		350 (19-478) /15	396 (352-460) /6	308 (148-405) /11
NO3	мг/л	27.2 (0.01-225) /15	257 (0.23-1300) /6	5057 (6-18800) /11
CO3	мг/л	61 (48-96) /8	96 (72-120) /3	192 (54-360) /7
HCO3	мг/л	241 (137-357) /15	199 (92-275) /6	124 (67-214) /9
SO4	мг/л	47 (19-151) /15	232 (28-425) /6	361 (267-523) /11
Cl	мг/л	47 (14-108) /15	110 (4-360) /6	315 (57-882) /11
Na	мг/л	9.5 (2.8-45) /15	100 (3.4-172) /6	919 (115-2356) /11
Mg	мг/л	23 (7.5-400) /15	40 (13-57) /6	51 (0.7-127) /11
Ca	мг/л	94 (27-193) /15	191 (44-265) /6	406 (62-687) /11
U	мкг/л	1 (0.1-3.4) /13	1.2 (0.5-1.8) /6	0.6 (0.1-1.3) /11

Наиболее высокие значения pH (9.9) зафиксированы в районе действующих карт, минимумы размещаются в периферийных зонах. Окислительно-восстановительные условия (редокс-обстановка) характеризуются довольно широким диапазоном значений Eh: от 0,019 В до 0,478 В. Такое существенное изменение состояния грунтового потока – от восстановительного до окислительного – делит всю область влияния шламоотстойников на две зоны. Одна из них, восстановительная, занимает внутреннее поле, примыкая непосредственно к источникам загрязнения. Эта зона имеет минимальные значения в скважинах, расположенных с северной стороны карт 311/1-2, 311-5. Самые восстановительные (0.019 В) условия были установлены вблизи сооружения 310 (хранилища ТРО в железобетонных конструкциях). Далее, как и все другие показатели, значения Eh снижаются по направлению движения грунтовых вод (с учетом наличия гидродинамического купола) и редокс-потенциал приходит к уровню естественного фона, в крайнем случае – слабо нарушенного. Грунтовые воды чувствительны не только к техногенным загрязнителям. Они также реагируют и на естественную

инфильтрацию атмосферных осадков, особенно жидких. Так по данным весеннего опробования воды оказались несколько более окислительными, что является следствием разбавления талыми поверхностными стоками в марте месяце, стимулирующими вынос нитратов из карт (при этом увеличения концентраций сульфатов практически не наблюдается).

На основе химического состава грунтовых вод рассчитаны линии равновесия  $UO_2(тв)$  и ведущих карбонатных комплексов шестивалентного урана  $UO_2(CO_3)_2^{2-}$  и  $UO_2(CO_3)_3^{4-}$ , а также азотных форм. Линии представлены на рис.2 в поле устойчивости воды. Значения отобранных проб воды по показателям Eh и pH, вынесенные на диаграмму, показывают, что уран в грунтовых водах района должен мигрировать преимущественно в виде комплексов U(VI).

Сравнение расчетных и измеренных окислительно-восстановительных величин определяет потенциал-задающей парой  $NO_3^- / NO_2^-$  (линия  $NO_3^- / NH_4^+$  располагается ниже даже для точек, где высокие активности аммония). То есть выявленная потенциал-задающая пара нитрат/нитрит оказывает наиболее значимое влияние на окислительно-восстановительную обстановку рассматриваемого участка, повышая окислительный потенциал грунтовых вод. Таким образом, присутствие нитратов способствует подвижности урана, но не за счет образования слабых нитратных комплексов, а потому, что нитраты препятствуют восстановлению U(VI) до U(IV), а значит препятствуют его иммобилизации. При всем разнообразии состава изученных грунтовых вод оказалось, что уран способен мигрировать в них в виде карбонатных комплексов U(VI), практически не участвуя в процессе минералообразования.

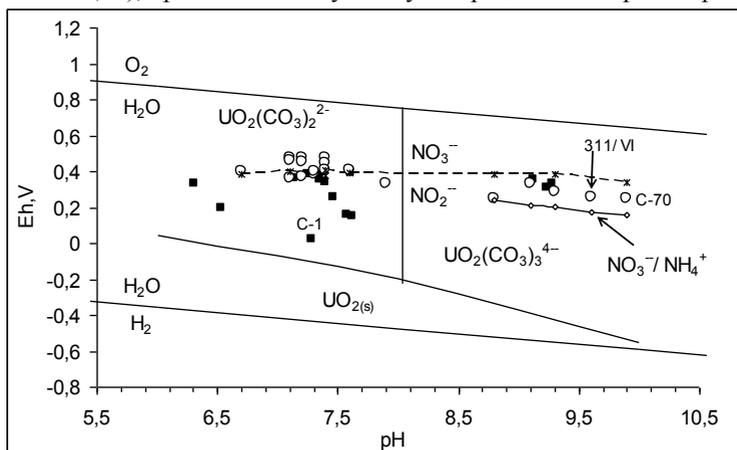


Рис. 2. Eh и pH грунтовых вод (за исключением 311/6) на шламовом поле АЭХК (черные квадраты – зима 2011 г., полые кружки – весна). Подписаны точки, относящиеся к пробам вод: наименее окислительной (С-1) и наиболее щелочной (С-70), а также линии равновесия форм азота и урана в поле устойчивости воды.

**Второе защищаемое положение.** *Инфильтрация высокоминерализованных растворов из шламохранилищ приводит к изменению свойств вмещающих грунтов – загипсованию, а также к преобразованию смектитов и смешаннослойных минералов (ССМ) с преобладанием смектитовых пакетов в ССМ с преобладанием иллитовых пакетов. Концентрация урана в подстилающих грунтах в некоторых пунктах опробования превышает фон в 2-4 раза и достигает 6-11 г/т. Сорбированный на этих грунтах уран находится преимущественно в подвижной форме (до 50%).*

Вмещающие грунты представлены двумя основными литологическими разностями: аллювиальными песками и супесями среднечетвертичного возраста и юрскими песчаниками, выветрелыми и практически разрушенными до состояния суглинка, супеси и пылеватого песка. Аллювиальные пески и супеси мелко- и среднезернистые, с прослоями суглинка. В минеральном составе преобладают кварц, плагиоклаз, КПШ, в меньшем количестве содержатся амфиболы, кальцит, доломит, хлорит, вермикулит, каолинит, апатит, иллит-смектит, хлорит. Глинистая составляющая (пелитовая фракция с размером частиц менее 0,005мм) образует 20-30%. Содержание урана в пелитовой фракции супесей и суглинков составляет 1,3–1,7 г/т. В песчаниках частично сохранена структура материнских пород, а также встречаются линзы и прослои каменного угля. Песчаники слюдястые, сцементированы глинистым материалом. Основными минералами являются кварц, плагиоклаз, КПШ, каолинит, смектит, слюда, иллит-смектит, вермикулит, в следовых количествах хлорит, амфибол. Глинистой составляющей более 20%, иногда более 50% с преобладанием каолинита. Содержание урана в глинистом материале составляет 0,8-1,0 г/т, в углистых прослоях - до 31,5 г/т.

Для оценки емкости поглощения урана вмещающими грунтами были проведены два эксперимента. Динамический эксперимент был призван смоделировать ситуацию промывания грунтов в естественных условиях и оценить емкость поглощения урана при нарастающем соотношении вода : порода. Материалом послужили суглинок и отмытая пелитовая фракция супеси, отобранные на исследуемой площадке вне влияния шламохранилищ. Минеральный состав суглинка представлен кварцем, плагиоклазом, смектитом, кпш, каолинитом, слюдой. Глинистых минералов более 50%, исходное содержание урана 2 г/т. Минеральный состав пелитовой фракции супеси представлен кварцем, плагиоклазом, иллитом, каолинитом, смектитом, иллит-смектитом, кпш, хлоритом. Глинистых минералов более 30%, исходное содержание урана <0.5 г/т. Также были выбраны два типа жидкостей: 1) аналог фоновых вод, дополнительно обогащенный ураном до 50мг/л при общей минерализации 150мг/л; 2) имитация жидкой составляющей пульпы с общей минерализацией 1500 мг/л, дополнительно насыщенная ураном до 50 мг/л. Таким образом было получено четыре комбинации: через два типа грунтов пропущены два типа растворов. Общим результатом для всех четырех

экспериментальных колонок стал вынос Mo, Sr, Cг и накопление U. Для высокоминерализованных растворов отмечен вынос K (14 - 49%) и Na (14 - 16%), и накопление Ni, Cu, Zn, что может свидетельствовать о процессах катионного обмена. Средняя концентрация урана в пелитовой составляющей супеси после насыщения составила 9.2 и 3.4 г/т (для фоновых и высокоминерализованных вод соответственно), в суглинках – 5.8 и 3.8 г/т.

Статический эксперимент был поставлен для определения предела насыщения грунтов ураном. Пелитовую фракцию супеси заливали раствором  $UO_2(NO_3)_2$  на основе дистиллята с концентрациями урана в 1, 5, 50, 500 мкг/л и 1, 5, 50 и 100 мг/л и перемешивали. Максимальное насыщение достигает 2-2.2% при взаимодействии с растворами с концентрацией урана выше 500 мг/л. В диапазоне концентраций до 1 мг/л содержание урана в растворе падает примерно на порядок, соответственно поглощается около 90% урана.

Для оценки ёмкости формирующихся геохимических барьеров можно принять следующие показатели сорбции: 0.3 – 2.5 мкг/кг в динамическом режиме, со скоростями прохождения растворов через грунты до 5 см/сут, 10 мг/кг - в статических условиях.

Также для оценки обратимости сорбции урана были изучены формы нахождения урана в грунтах. Грунты насыщали растворами с концентрацией урана 100 мг/л, а затем последовательно выщелачивали (по схеме Клемта с добавлением водорастворимой формы, выделяемой дистиллятом). Формы урана разделялись на три группы: легкорастворимая (водорастворимая и обменные формы), труднорастворимая (карбонатные формы) и нерастворимые (связанные с оксидами и гидроксидами Fe и Mn, органикой и находящиеся в структуре акцессорных силикатов). Уран, находящийся в грунте в легкорастворимых формах, может снова переходить в раствор даже при существующих физико-химических условиях. Карбонатные формы урана растворяются при изменении физико-химических параметров среды (снижение pH), что возможно при кардинальном изменении климатических условий. Нерастворимые формы могут выноситься только при появлении в водах высоких концентраций сильных неорганических кислот, что в существующих геохимических условиях невозможно. В результате определено, что 50-54% урана, сорбированного на грунтах из раствора с концентрацией U 100 мг/л, содержится в грунте в обменных формах. При последующем взаимодействии пелитовой фракции с раствором уксуснокислого аммония в раствор переходит 26% от исходного содержания урана в насыщенном грунте, что составляет долю его карбонатных форм. Чуть более прочно уран удерживается в суглинке, доля его карбонатных форм составляет около 8% от исходного содержания урана в насыщенном образце. В общей сложности, из пелитовой фракции супеси, предварительно насыщенной ураном, после двухступенчатого выщелачивания в раствор переходит около

80% урана (от исходного содержания в насыщенном образце), из суглинка – около 60%.

Под воздействием растворов, просачивающихся из отстойников, подстилающие грунты характеризуются повышенным содержанием урана (5.6 – 11.0 г/т), а также меняется их структура и минеральный состав. На дифрактограммах (рис. 3) видно, как изменяется форма пиков при анализе образцов от неизменных (фоновых) грунтов к грунтам, подвергшимся многолетнему промыванию высокоминерализованными растворами. В зоне аэрации изменения в грунтах выражены в образовании гипса и различных солей в межзерновом пространстве (обр.5/9).

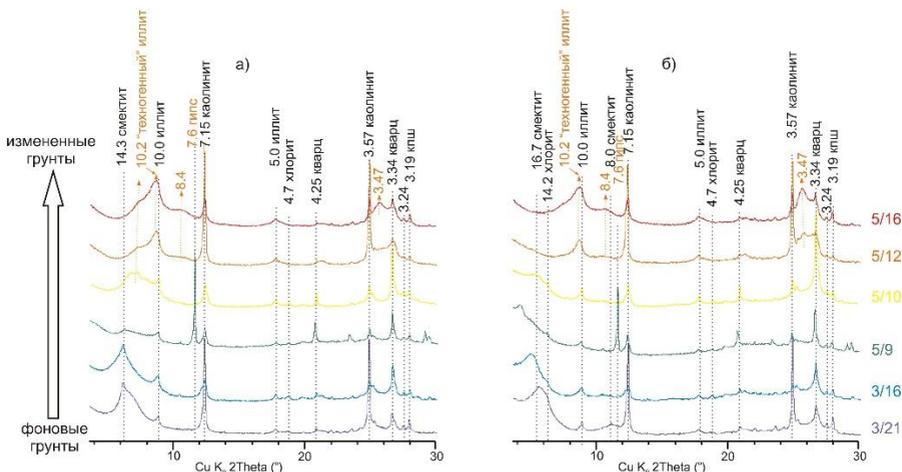


Рис. 3. Фрагменты дифрактограмм ориентированных образцов: а) в сухом состоянии, б) насыщенных этилен-гликолем. Значения приведены в ангстремах.

Что касается глинистых минералов, на дифрактограммах отмечается низкое содержание смектита в грунтах и значительное увеличение доли смешаннослойных минералов (ССМ) — иллит-смектитов. В измененных грунтах отмечается специфический «техногенный иллит», имеющий отличительные рефлексы при 10.2 и 8.4Å, которые не сдвигаются после насыщения этиленгликолем (обр. 5/10, 5/12, 5/16). При этом имеется небольшое количество смектита с модифицированным межслойным комплексом. Влияние высокоминерализованных инфильтратов на подстилающие грунты заключается в выносе значительного количества катионов, что фиксируется в смене качественного состава грунтовых вод: фоновые воды района являются Ca>Mg>Na, тогда как воды шламового поля характеризуются последовательностью Na>Ca>Mg. При этом доля кальция и магния растет за счет реакций ионного обмена и растворения твердых фаз

пород. В минералогическом составе грунтов этой зоны в неизменном виде преобладает каолинит и смектит. Высокие значения pH растворов (9,5-10) способствуют разложению и преобразованию глинистой составляющей. В зоне, подверженной влиянию высокоминерализованных растворов, в глинистой фракции песчаников преобладают каолинит, мусковит, смешанно-слоистые минералы иллит-смектит с преобладанием иллитовых пакетов, смектит (монтмориллонит). Предполагается, что преобразование смектитового материала в иллитовый происходило достаточно быстро, без изменения микроморфологии и взаимодействия частиц между собой. В целом в наблюдаемых смешаннослойных минералах с увеличением глубины (на протяжении всего около 3 м) практически исчезает смектит, преобразуясь в иллит-смектит с преобладанием иллитовых пакетов.

Микростроение грунтов под электронным микроскопом приведено на рис. 4. В неизменных вмещающих грунтах отчетливо видны довольно крупные изометричные частицы и агрегаты плотных глинистых частиц (каолинита, иллита), а также тонкие агрегаты смектита (рис. 4 а,б). Преобразования, вследствие длительного промывания высокоминерализованными растворами выражаются в виде выщелоченных полевых шпатов и появления специфической «ажурной» структуры в измененных глинистых минералах (рис. 4в). Реликтовая «ажурная» структура «техногенного» иллита указывает на достаточно быстрое превращение смектита в иллит без изменения микроморфологии и взаимодействия между частицами. Из других слоистых минералов наблюдается развитие хлоритизации по поверхности плагиоклазовых зерен. А на глубине около 5м под дном хранилища, где pH снижен и приближен к нейтральному, отмечаются новообразования опала (рис. 4г). Поскольку грунты в которых происходят наблюдаемые процессы обеднены кремнеземом вследствие выветривания, предполагаем, что аутигенный опал образован в результате снижения уровня pH и выпадения  $\text{SiO}_2$  из пересыщенного раствора.

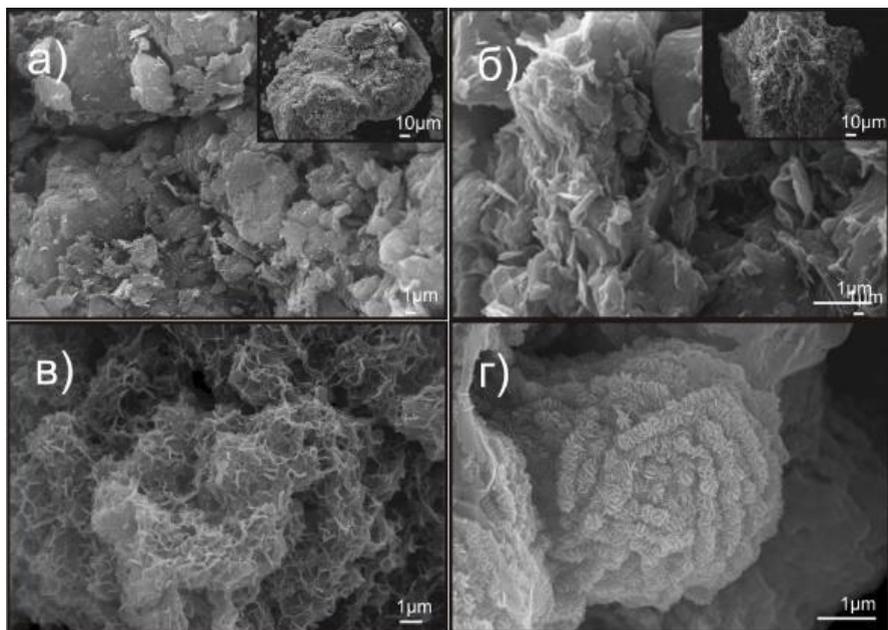


Рис. 4. Микростроение вмещающих грунтов: а, б) фоновых; в, г) измененных под влиянием высокоминерализованных растворов.

**Третье защищаемое положение.** *При консервации хранилища ожидается постепенное исчезновение гидрохимической аномалии в подземных водах участка вследствие разбавления фоновыми грунтовыми водами: сдвиг pH в сторону нейтрального, снижение минерализации, основным ведущими ионами будут  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{Ca}^{2+}$ . В существующих геохимических условиях количество урана (всего около 4 тонн), которое может быть потенциально вынесено стоками из шламохранилищ, сопоставимо с объемами урана, мигрирующего в природе.*

На основании многолетних данных по химическому составу подземных вод на участке рассчитаны объем и распространение загрязненных вод. Эта область разделена на сильно- и слабозагрязненную по значению общей минерализации. Поскольку в распоряжении автора работы имеются данные по химическому составу грунтовых вод участка за несколько последних лет, модели загрязненных участков также были построены по каждому году, по которому есть данные, а именно: 2011, 2013, 2015, 2016. На рисунке 5 приведены контуры загрязненных вод и их изменений со временем.

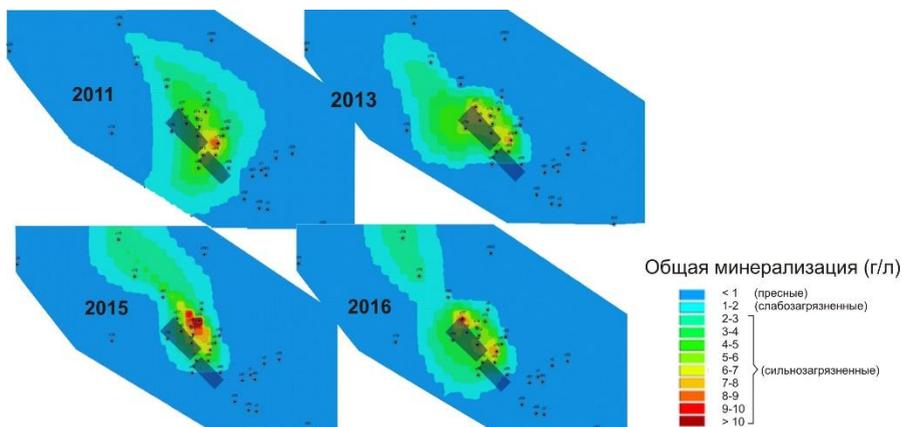


Рис. 5. Модель распространения загрязнения в подземных водах по данным разных лет. Скважины обозначены точками с номерами, темные прямоугольники – места расположения емкостей-хранилищ ЖРО.

Полученные модели свидетельствуют о горизонтальном смещении ареалов загрязнения в северном направлении, совпадающем с направлением движения грунтовых вод. Также в течение рассматриваемого времени (с 2011 по 2016г.) на участке несколько снижается количество загрязненных вод, которые постепенно замещаются фоновыми пресными водами. Происходит перераспределение количества воды по содержанию общей минерализации: уменьшение высоких значений (>2 г/л) и увеличение средних (1-2 г/л) (табл. 2). Такое распределение одновременно со смещением загрязненной зоны в пространстве может свидетельствовать о постепенном «размывании» (разбавлении) гидрохимической аномалии вновь поступающими фоновыми грунтовыми водами.

Табл.2. Относительные объемы загрязненных подземных вод на участке, в %.

	2011	2013	2015	2016
1-2 г/л	44.38	36.77	42.54	47.37
>2 г/л	55.62	63.23	57.46	52.63

В целом, концентрации загрязнений снижаются до фоновых значений на расстоянии порядка 1 км по направлению течения грунтовых вод, т.е. в ССЗ направлении, от источника загрязнения, то есть карт 311/4,5,6. В поперечнике зона высокоминерализованных вод распространена приблизительно на 600м в 2011 году и сокращается до 400м к 2016 году.

Изменения химического состава воды и взаимодействий вода-порода были просчитаны при помощи моделирования по алгоритму GIBBS с использованием встроенного банка термодинамической информации UNITERM пакета программ HCh. На основании химического состава сбрасываемых отходов и грунтовых вод смоделирован состав фаз, способных осаждаться в хранилище при нейтрализации растворов  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и отстаивании пульпы, а также рассчитаны предельные концентрации урана в растворах.

Первая модель основана на гидрохимическом составе осветленного раствора сбрасываемых шламов с минерализацией 31 г/л, Eh ~200 мВ и рН 9.55. Расчет равновесия при 25°C показал, что щелочные растворы сброса в карту пересыщены по отношению к целому ряду (гидр)оксидов и карбонатов. Если расположить фазы в порядке убывания, то это будет выглядеть следующим образом: флюорит  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ , кальцит-доломит,  $\text{FeOOH}$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{Ni}(\text{OH})_{2(\text{тв})}$ , иллит-сметтиты,  $\text{SrCO}_3$  и  $\text{MnCO}_3$ . Серы сульфатной, натрия и хлора в составе модельных твердых фаз не обнаружено. Это означает, что снижению их концентраций, как и  $\text{NO}_3^-$ , должно способствовать разбавление при смешении с грунтовыми водами. Уран остается в растворе в виде  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ , при этом в составе твердой фазы шламов находится в среднем до 20 г/т урана. Это свидетельствует об эффективности применяемой технологии нейтрализации отработанных пульп, предусматривающей образование нерастворимых соединений урана.

Вторая модель построена для предполагаемой ситуации подтопления шламохранилищ в случае катастрофического подъема уровня грунтовых вод. Это вариант смешивания щелочных высокоминерализованных растворов и нейтральных фоновых вод, где по мере разбавления растворы становятся все более нейтральными и обедняются  $\text{Na}^+$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ , также резко снижаются концентрации урана в растворе. Растворы смешения долго остаются натриевыми, нитратно-сульфатными (рис. 6). В результате нейтрализации растворов, т.е. приближения кислотности к рН 7.4, исчезают все минералы кроме гетита и каолинита. Растворы становятся кальций-магний-натриевыми, гидрокарбонатными. Это касается прежде всего распространения фронта загрязнения. Концентрации микрокомпонентов, к которым относится уран и другие актиниды, не будут превышать ПДК, несмотря на то, что их поведение контролируется не осаждением твердых фаз, а только режимом динамического разбавления и сорбцией на грунтах, сквозь которые происходит минерализация вод.

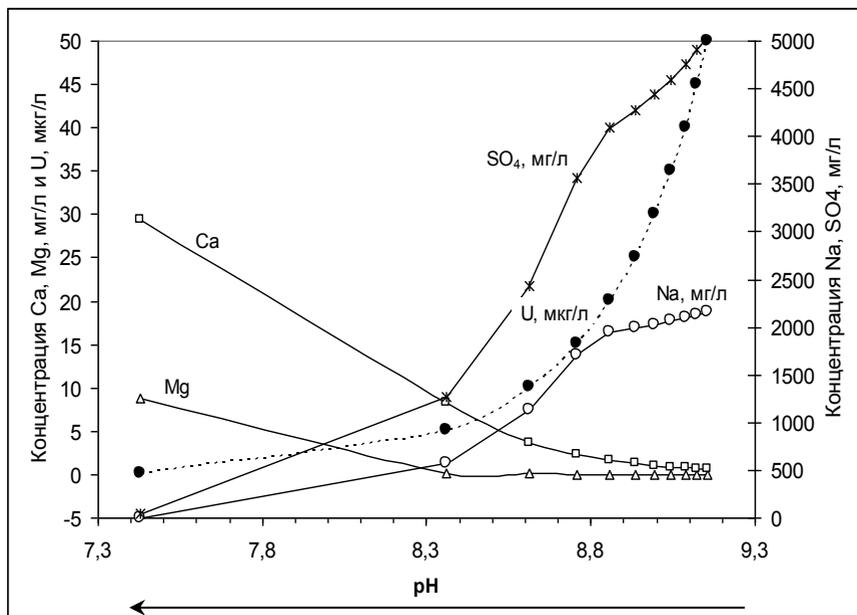


Рис. 6. Модель смешения высокоминерализованных растворов (щелочные растворы с pH ~9.5) и нейтральных (pH ~7.5) фоновых грунтовых вод района. Направление стрелки соответствует распространению фронта загрязнения, а точки на кривых – шагу от 0 до 10 (по Богуславский и др., 2012).

Распространение фронта смешения растворов восстановительной зоны с типичными грунтовыми водами региона при возрастании их количества будет, конечно, создавать более окислительные условия, однако постепенное разбавление также приводит к очищению растворов зоны техногенного влияния от всех нежелательных элементов и их соединений. Таким образом можно предположить, что разбавление растворов всего лишь в десять раз приведет состав грунтовых вод к уровню фоновых концентраций.

Количество подвижного урана в хранилищах оценено на основании средней концентрации урана в твердой фазе шламов (240 г/т) и их общего объема (около 47 тыс. м<sup>3</sup>). Методом ступенчатого выщелачивания установлено, что в твердой фазе пульпы основное место занимает карбонатная фракция (81.5%). Остальное приходится на: водорастворимую 0.6%, обменную 16.1%, оксиды и гидроксиды Fe и Mn 1.1%, органическую 0.6%, нерастворимые силикаты 0.1%. При этом на карбонатную фракцию приходится максимальное содержание урана – 63.7%, в водорастворимой содержится 4.8% урана, в обменной – 2.9%, в форме оксидов и гидроксидов железа и марганца – 13.8%, в органической – 12.6% и в форме нерастворимых

силикатов – 2.2%. Таким образом в существующих геохимических условиях возможен вынос урана, находящегося в водорастворимой и обменной формах. В процессе многократного промывания, имитирующего естественный контакт РАО и грунтовых вод, в течение 80 суток, установлено, что процент выщелачивания образца в целом составил 6,1%, процент выщелачивания собственно урана – 2,4%. То есть общее количество урана, которое может быть вынесено за пределы шламохранилища оценивается в 3,7т, что несоизмеримо с масштабами природной миграции урана (например, только р.Ангара ежегодно переносит 25-35 тонн).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По открытым данным комбината (Экологический отчет АЭХК за 2015год), в настоящее время на территории предприятия находится около 87тыс.м<sup>3</sup> средне- и низкоактивных отходов, накопленных до вступления в силу закона ФЗ-190 «Об обращении с радиоактивными отходами...». Статус накопленного «наследия» определяется как временное и долговременное хранение РАО. В результате выполненного исследования оценено влияние шламохранилища пульпы с остаточным содержанием урана на прилегающие участки, главным образом, на вмещающие грунты и подземные воды.

Определены формы нахождения урана в шламах и при миграции загрязнений за пределы комплекса хранилищ РАО. Твердая фаза низкорadioактивных шламов в минеральном отношении представлены преимущественно флюоритом, гипсом, бруситом, кальцитом. Содержание урана в шламохранилищах оценивается в 22 тонны, из которых 3,7 тонны приходится на растворимые формы. В процентном отношении водорастворимые и обменные формы составляют 16,7%. На формы, связанные с карбонатами и фторидами приходится 81,5%, остальное составляют оксиды и гидроксиды Fe и Mn, органические формы и нерастворимые силикатные формы. При этом концентрации собственно урана в этих соединениях распределены следующим образом: на карбонатную фракцию приходится максимальное содержание урана – 63,7%, в водорастворимой - 4,8%, в обменной - 2,9%, в форме оксидов и гидроксидов Fe и Mn - 13,8%, в органической - 12,6% и в форме нерастворимых силикатов - 2,2%. При этом экспериментально показано, что процент выщелачивания урана из шламов в целом составляет всего 6% при активном промывании водой. Это связано с составом шламов, где первыми начинают растворяться сульфаты. Затем, по мере их вымывания, уран продолжает выноситься в виде уранил-карбонатных комплексов в результате воздействия гидрокарбонат-иона.

Охарактеризованы свойства вмещающих грунтов. Микроэлементы могут содержаться, кроме зерен акцессорных минералов, в пелитовой фракции (размерностью менее 0.005мм), присутствующей в песке. Количество этой фракции изменяется от 13 до 28%. Более 30% ее представлено глинистыми

минералами: каолинитом, смектитом и иллитом. В супесях и суглинках рентгенофазовый анализ устанавливает содержание глинистых минералов до 50%. В результате содержание большинства элементов здесь выше в 2-3.5 раза. Еще более заметное накопление микроэлементов фиксируется в углистых прослоях - концентрация отдельных элементов возрастает до 10 раз, а содержание урана достигает 31.5 г/т, что более чем в тридцать раз выше по сравнению с содержанием во вмещающих песчаниках. Это количество также является фоновым и характеризует воздействие комплексного сорбционно-восстановительного геохимического барьера, где в качестве сорбента и восстановителя выступает органическое углистое вещество. При этом в целом для Прибайкальского региона характерно более высокое содержание урана в разных типах пород, а также почв по сравнению с кларком урана в земной коре и концентрациями элемента в других регионах Сибири. Здесь средние содержания урана составляют: в коренных породах – 1.66 мг/кг, почвах – 2.38–3.60 мг/кг.

Установлено, что наиболее эффективно накопление урана происходит на пелитовой фракции при медленном взаимодействии с протекающим низкоминерализованным раствором. В таких условиях по данным РФА-СИ емкость поглощения достигает 12 мкг/г. Для оценки ёмкости формирующихся геохимических барьеров можно принять следующие показатели сорбции: 0.3 – 2.5 мкг/кг в динамическом режиме, со скоростями прохождения растворов через грунты до 5 см/сут, 10 мг/кг - в статических условиях.

Оценены формы нахождения урана, который осаждается и/или сорбируется на исследуемых грунтах. Легкорастворимые (обменные и водорастворимые) формы составляют около 50%. Доля труднорастворимых (карбонатных) форм составляет 8-27%. Нерастворимые формы, среди которых гидроксидная и органическая, составляют 20-42 %.

Определены изменения в грунтах, подвергшихся воздействию просачивающихся высокоминерализованных вод. Это образование гипса и различных солей в межзерновом пространстве зоны аэрации и преобразование смектита в смешаннослойные минералы (ССМ) иллит-смектиты с явным преобладанием смектитовых пакетов. В зоне грунтовых вод наблюдаются метасоматические изменения во смещающих грунтах в виде появления специфического «техногенного» иллита. В целом отмечено практически полное исчезновение смектита и образование ССМ с явным преобладанием иллитовых пакетов.

Определены ведущие компоненты, выносящиеся из отстойников при контакте с природными водами. Это ионы кальция и сульфаты, остальные анионы и катионы находятся в подчиненном положении.

В сформировавшихся геохимических условиях вынос урана с грунтовыми водами за пределы шламового поля находится на уровне фоновых концентраций, характерных для данной климатической зоны, что меньше

значений ПДК, рекомендованных ВОЗ для питьевых вод (0.015 мг/л). Но установлено растекание гидродинамического купола загрязнений и проникновение щелочных нитратных растворов в подземные горизонты вод вокруг шламохранилищ.

**Благодарности.** Работа выполнена под руководством к.г.-м.н. Богуславского А.Е. в тесном сотрудничестве с д.г.-м.н. Гаськовой О.Л. Выражаю им благодарность за возможность работы с уникальным материалом, постановку задачи исследования, своевременные консультации и обсуждение на всех этапах работы. Кроме того, термодинамическое моделирование, выполненное в соавторстве с О.Л. Гаськовой, позволило существенно дополнить работу и стало основой для прогноза развития техноприродной системы. Благодарю представителей АО «АЭХК», предоставивших возможность работы на площадках комбината: зам.ген.директора по капитальному строительству Шаповалова П.Н.; начальника отдела подготовки производства Бирюка А.Н.; сотрудников отдела по капитальному строительству Кардову А.С. и Беляеву И.А.; начальника отдела ООС Тунину О.А.; инженера отдела ООС Шаповалова С.П.; начальника отдела развития уранового производства Дудкина В.В. (должности сотрудников указаны на 2011 год). Также выражаю благодарность коллегам по лаборатории № 213: д.г.-м.н. Шарапову В.Н., д.г.-м.н. Мазурову М.П., д.г.-м.н. Рябову В.В., к.г.-м.н. Разворотневой Л.И., к.ф.-м.н. Перепечко Ю.В. за терпеливое внимание к докладам по теме диссертации на внутривлабораторных семинарах и конструктивные советы. Автор глубоко признательна сотруднице ИНГГ СО РАН к.г.-м.н. Юркевич Н.В. за неоценимую помощь в проведении экспериментальных работ. Аналитические работы были бы невозможными без участия Колмогорова Ю.П. и Дубовой В.П. Благодарю сотрудников ГИС-центра ИГМ СО РАН и, особенно, к.г.-м.н. Лямину В.А. за помощь и наставничество в освоении методов ГИС и трехмерном моделировании объекта. За неоднократные и подробные консультации в области исследования минерального вещества методами рентгеновской дифрактометрии благодарю к.г.-м.н. Мирошниченко Л.В. Также искреннюю благодарность выражаю коллегам из ИГЕМ РАН: к.г.-м.н. Крупской В.В., д.г.-м.н. Мохову А.В. и Закусину С.В. за теплый прием и совместную работу в исследованиях на качественно новом уровне. Особую благодарность выражаю к.г.-м.н. Лазаревой Е.В., без чьих советов было бы трудно довести работу до финальной стадии. Кроме того, хочется сказать огромное спасибо всем моим родным и друзьям за их поддержку и неизменную веру в мои силы.

Работа выполнена при финансовой поддержке и в рамках НИР № 410-108 и грантов РФФИ № 13-05-00032 А и 17-05-00707 А.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ (статей и тезисов докладов), в том числе 4 статьи в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК и/или индексируемых в системе Web of Science.*

1. Богуславский А.Е., Гаськова О.Л., **Шемелина О.В.** Миграция урана в грунтовых водах района шламохранилища Ангарского электролизного химического комбината // Химия в интересах устойчивого развития. – 2012. – Т. 20. - № 5. – С. 515-529
2. **Шемелина О.В.**, Богуславский А.Е., Колмогоров Ю.П. Определение содержания радиоактивных элементов в шламоотстойниках и вмещающих грунтах // Известия РАН. Серия физическая. - 2013. - Т. 77. - № 2. - С. 220-223.
3. Gaskova OL, Boguslavsky AE, **Shemelina OV** Uranium release from contaminated sludge materials and uptake by subsurface sediments: Experimental study and thermodynamic modeling // Applied geochemistry. - 2015. - V. 55. – P.152-159 DOI: 10.1016/j.apgeochem.2014.12.018
4. Boguslavskii A.E., Gas'kova O.L., **Shemelina O.V.** Geochemical model of the environmental impact of low-level radioactive sludge repositories in the course of their decommissioning // Radiochemistry. – 2016 – V. 58 (3) – P. 279-283 DOI:10.1134/S1066362216030164

*Остальные работы, включая сборники и материалы конференций*

1. Шемелина О.В., Богуславский А.Е., Юркевич Н.В. Определение иммобилизационных характеристик грунтов в районе воздействия предприятий топливно-ядерного цикла на примере шламоотстойников ОАО АЭХК // Материалы VII международной научно-технической конференции «Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде», с. 373-380. Семей, Казахстан, 2012
2. Шемелина О.В., Богуславский А.Е., Гаськова О.Л. Минимизация влияния предприятий ядерного топливного цикла (на примере шламоотстойников АЭХК) // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2013. - Вып. 34. - С. 126-128.
3. Шемелина О.В., Богуславский А.Е. Изучение влияния низкоуровневых хранилищ жидких радиоактивных отходов ОАО «АЭХК» на прилегающие ландшафты // Материалы IV Международной конференции Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека, с. 574-576. Томск, 2013.
4. Богуславский А.Е., Шемелина О.В., Гаськова О.Л. Изучение параметров вторичных геохимических аномалий, образующихся в зоне влияния хранилищ низкоуровневых РАО // Материалы II Всероссийской конференции с международным участием Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами, с.446-449. Владивосток, 2015.

5. Богуславский А.Е., Гаськова О.Л., Шемелина О.В., Кабанник В.Г. Оценка запасов и определение форм нахождения урана в техногенных геохимических аномалиях // Труды всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии (ВЕСЭМПГ-2015), с. 368-373. Москва, 2015.
6. Шемелина О.В., Богуславский А.Е., Крупская В.В. Преобразования в грунтах *in situ* под влиянием высокоминерализованных растворов из хранилищ жидких низкорadioактивных отходов // Материалы V Международной конференции Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека, с. 715-717. Томск, 2016.
7. Шемелина О.В. Эволюция гидрохимической аномалии в зоне влияния шламохранилища низкорadioактивных отходов // Материалы совещания, приуроченного к 60-летию Института геологии и геофизики СО АН СССР Геология и минерагения северной Евразии, с.255-256. Новосибирск, 2017
8. Krupskaya V., Zakusin S., Dorzhieva O., Boguslavskiy A., Shemelina O., Chernov M., Zubkov A. Transformation of clay minerals due to technogenic processes associated with the disposal of radioactive waste // II International Symposium Clays and ceramics, p. 67-68. Riga, Latvia, 2018.