

УДК

На правах рукописи



Дунаева Елена Владимировна

«Научно-методическое обеспечение геоэкологических изысканий для обоснования технических решений при безопасной эксплуатации и рекультивации объектов переработки урановых руд»

Специальность 1.6.21. (25.00.36) - Геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва - 2023

Работа выполнена в АО «Ведущий проектно-исследовательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии»
(АО «ВНИПИпромтехнологии») Государственной корпорации «Росатом» .

Научный руководитель:

Карамушка Владимир Петрович
кандидат технических наук, главный специалист научно-исследовательского отдела технологий, геомеханики и недропользования АО «ВНИПИпромтехнологии», эксперт МАГАТЭ, заслуженный эколог РФ.

Официальные оппоненты:

Горбунова Ольга Анатольевна
доктор технических наук, Советник заместителя генерального директора по капитальному строительству и ремонту Федерального государственного унитарного предприятия «Федеральный экологический оператор» (ФГУП «ФЭО»)

Баринов Александр Сергеевич

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН» (ИБРАЭ РАН)

Ведущая организация:

ФГБУ «Гидроспецгеология»

Защита диссертации состоится «28» декабря 2023 г. в 17.30 на заседании диссертационного совета 24.2.364.02 при ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ) по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.23, зал заседаний диссертационных советов (каб. 4-73).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке МГРИ и на сайте ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ)» по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.23, <https://mgri.ru/>

Автореферат разослан «_____» _____ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор геолого-минералогических наук



Ганова С. Д.

Актуальность темы диссертации.

В России действует ряд Федеральных законов, санитарных норм и правил, которые устанавливают нормативы для создания безопасных условий применения атомной энергии и радиационных источников в различных сферах деятельности человека. Важнейшими задачами Государственной Корпорации «Росатом» являются не только создание новых объектов атомной энергетики, но и рекультивация территорий, загрязненных в период работ по созданию «ядерного щита» бывшего СССР, а также территорий существующих в настоящее время хвостохранилищ, строительство которых обусловлено необходимостью складирования твердых промышленных сильно минерализованных отходов и токсичных сточных вод. Такие хвостохранилища располагаются на больших площадях, измеряемых десятками, а иногда и сотнями гектаров, и являются потенциально опасными объектами, поскольку нарушение процесса эксплуатации или рекультивации может привести к экологической катастрофе – растеканию неконсолидированной массы грунта и воды, и как следствие – загрязнению окружающей территории.

Поэтому ещё на стадии исследования и разработки технологических решений в урановой отрасли требуется обеспечение высокоэффективных мероприятий по обеспечению радиационной безопасности объектов окружающей среды, что является одним из важнейших факторов обеспечения национальной безопасности.

Результаты проведения геоэкологических изысканий и исследований, выполненных в соответствии с методическими положениями, которые представлены в данной диссертационной работе, на действующих хвостохранилищах, а также на хвостохранилищах, выведенных из эксплуатации, позволяют прогнозировать и контролировать состояние таких объектов уранового производства в течение длительного периода времени.

Таким образом, актуальность и важность решаемой в диссертации новой научной задачи определяются обеспечением долгосрочной экологической безопасностью хранения отходов уранового производства.

Значительный вклад в изучение грунтов и решение проблем хвостохранилищ внесли известные советские и российские ученые В.И. Вернадский, Г.К. Бондарик, Е.Н. Камнев, В.П. Карамушка, В.Д. Лонтадзе, В.В. Охотин, В.А. Петров, Р.Е. Кузин, Н.П. Лаверов, Н.К. Шандала и другие.

Ведущими организациями в области исследования хранилищ радиоактивных отходов являются АО «ВНИИПромтехнологии», ФГБУН институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), ФГБУ Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского (ВИМС), Горный институт НИТУ «МИСиС», Санкт-Петербургский горный университет, ФГБУ «Гидроспецгеология», АО «Механобр инжиниринг».

Цель работы – на основе результатов экспериментальных и теоретических исследований физико-механических свойств природных и техногенных грунтов разработать методические положения проведения геоэкологических и инженерных изысканий для принятия технических решений на период эксплуатации, подготовки рекультивационных работ и дальнейшего мониторинга объектов добычи и переработки урановых руд.

Задачи исследования:

1. На основе результатов геоэкологических изысканий сделать системный сравнительный анализ свойств природных и техногенных грунтов, измененных во времени.
2. Сделать сравнительный анализ физико-механических и химических свойств энергетической золы топливно-энергетического производства и золы, образующейся при обогащении ураносодержащих углей.
3. По результатам полевых работ разработать методику исследования влажностного режима в толще хвостовых отложений для безопасной эксплуатации предприятий ядерно-топливного цикла.
4. Научно обосновать методические положения технологии проведения геоэкологических изысканий на хвостохранилищах для принятия технических решений при эксплуатации и рекультивации объектов уранового производства.

Фактический материал и методы исследований.

Фактической основой диссертации послужили результаты полевых, научно-исследовательских и лабораторных работ на объектах уранодобывающего производства, проведенных автором с 2012 по 2020 год. Автором использованы также фондовые материалы инженерно-геологических изысканий и опубликованные данные, полученные за разные годы.

Исследования носят комплексный характер и включают в себя анализ и научное обобщение геологических материалов, полученных в ходе полевых работ: рекогносцировочного исследования, бурения скважин, отбора проб грунта для лабораторных испытаний, геофизические исследования, пенетрация.

Методика исследования.

В основу решения поставленных задач положены данные, полученные непосредственно на площадках хвостохранилищ, теоретические и натурные исследования хвостохранилищ для получения необходимых лабораторных и полевых данных, рассмотрен отечественный и международный опыт.

Методы исследований.

При выполнении исследования применялись такие методы как: системный анализ полученных данных и научно-технической литературы, картографические и лабораторные методы, использование современного программного обеспечения.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Впервые для отечественного минерально-сырьевого кластера ядерной отрасли разработаны технологии совершенствования проведения геоэкологических изысканий на хвостохранилищах массовой переработки радиоактивных руд для обеспечения их долговременной экологической безопасности от окружающей среды.

2. Доказано различие физико-механических и химических свойств энергетической золы топливно-энергетического производства и золы, образующейся при глубокой переработке радиоактивного минерального сырья.

3. Разработан научно-обоснованный прогноз режима интенсивности влажности техногенных грунтов хвостохранилищ уранового производства на основе авторских методических положений инженерно-геологических и геоэкологических изысканий.

Научные положения соответствуют пунктам 7, 9, 14, 17, 23, 24 паспорта специальности 1.6.21 – «Геоэкология».

Научная новизна результатов диссертационных исследований.

1. На основе системного анализа данных, полученных в ходе геоэкологических изысканий, доказано различие природных грунтов от техногенных минеральных образований и выявлены закономерности, характеризующие схожесть намывных грунтов хвостохранилищ с барханскими песками зоны аэрации.

2. Доказано различие физико-механических и химических свойств энергетической золы топливно-энергетического производства и золы, образующейся при глубокой переработке радиоактивного минерального сырья.

3. Впервые представлены методические рекомендации и результаты изучения влажностного режима в теле хвостохранилищ (линз с водой, водонасыщенных зон и островной мерзлоты) на длительный постэксплуатационный период времени территорий «уранового наследия».

4. Впервые для отечественного минерально-сырьевого кластера ядерной отрасли разработаны технологии совершенствования проведения геоэкологических изысканий на хвостохранилищах массовой переработки радиоактивных руд для обеспечения их долговременной экологической безопасности от окружающей среды.

Достоверность и обоснованность научных результатов.

Фактической основой диссертации послужили результаты полевых, лабораторных и научно-исследовательских работ, проведенными автором с 2012 по 2020 гг., на объектах уранодобывающего производства. Используются материалы инженерно-геологических изысканий, находящихся в фондах АО «ВНИПИпромтехнологии», а также данные, опубликованные в открытой печати.

Обоснованность и достоверность проведенных исследований обусловлена репрезентативностью статистической информации, основанной на аттестованных методиках выполнения измерений; научной методологией исследования, опирающейся на применение системного подхода; обобщением научных исследований зарубежных и отечественных специалистов и публикациями по теме диссертации. Все измерения проводились на сертифицированном и поверенном оборудовании. Для обработки результатов использовались современный математический аппарат и лицензионные программы. Достоверность научных выводов, положений и результатов обеспечены удовлетворительной сходимостью теоретических и натурных исследований, положительными результатами от внедрения разработанных автором методических рекомендаций.

Практическая значимость работы.

1. В рамках выполнения Межгосударственной целевой программы «Рекультивация территорий государств-членов ЕврАзЭС, подвергшихся воздействию уранодобывающих производств», утвержденной 05.04.2012 г. № 602 Межгосударственным советом ЕврАзЭС, комплекс разработанных методических положений и рекомендаций был применен на урановых объектах республики Таджикистан и Кыргызской республики.

2. Представлен научный прогноз влажностного режима хвостохранилищ урановых производств и рекомендовано его применение на других производствах.

3. Предложенная технология геоэкологических изысканий позволяет предотвратить радиационно-экологические аварии, исключить необоснованный риск для населения, для персонала, исключить дорогостоящие и небезопасные работы на хвостохранилищах, а также снизить материальные и финансовые затраты.

4. Разработанная инструкция «Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием», которая применяется на действующих хвостохранилищах ПАО «ППГХО», рекомендована к применению на других горно-перерабатывающих производствах.

Апробация работы.

Основные результаты работы были представлены и обсуждались на Международных научно-практических конференциях: «Геотехнологические методы освоения месторождений твердых полезных ископаемых» (Москва, ВИМС, 2015г), «Философия обращения с радиоактивными отходами: плюсы и минус существующих технологий» (Москва, 2016г), «Проблемы и решения в экологии горного дела» (Москва, 2017); на Пятом международном симпозиуме Уран: геология, ресурсы, производство» (Москва, ВИМС, 23-24 ноября 2021г.), а также на технических совещаниях, проводимых на действующих горно-перерабатывающих комбинатах.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 4 статьи в рецензируемых и рекомендованных ВАК изданиях.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из Введения, шести глав, Заключения, списка используемой литературы. Работа представлена на 125 страницах машинописного текста.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю кандидату технических наук В.П. Карамушке, доктору геолого-минералогических наук, профессору Е.Н. Камневу, руководителю отдела инженерных изысканий АО «ВНИПИпромтехнологии» И.И. Папелкову, руководителям и ведущим специалистам ПАО «ППГХО».

Изученность проблемы.

В 1953 г. Е.М. Сергеев одной из основных теоретических задач общего грунтоведения считал «установление зависимости между различными свойствами типичных грунтов и их генезисом». Он считал, что такая зависимость может быть выражена «генетической классификацией грунтов, позволяющей производить предварительную оценку строительных свойств грунтов по их генетическому типу». Последующие исследования показали, что, несмотря на наличие зависимости свойств грунтов от их генезиса, подобная классификация не может учесть всего многообразия проявления инженерно-геологических особенностей грунтов, т. к. генезис не является единственным фактором формирования свойств грунтов. Заслуженный

деятеля науки РСФСР М.М. Филатов в своих работах подчеркивал о необходимости при исследовании свойств грунтов особое внимание уделять наиболее дисперсным компонентам гранулометрического состава.

В 2013 году была представлена статья Мязина В.П. Шекиладзе В.Т. «Разработка природоохранных мероприятий по рекультивации хвостохранилищ с целью снижения загрязнения территории Забайкалья отходами горно-перерабатывающего комплекса», где раскрывалась проблема загрязнения территории Забайкальского края отходами горно-перерабатывающего комплекса, приведена технология рекультивации хвостохранилищ в условиях криолитозоны Забайкалья.

В 2014 году в книге Карамушки В.П., Камнева Е.Н., Кузина Р.Е. были изложены результаты оценок влияния уранодобывающих предприятий на объекты окружающей среды. Основное внимание уделено постэксплуатационному периоду. Рассмотрен зарубежный и отечественный опыт рекультивации территорий, нарушенных при добыче и переработке урановых руд.

Значительное количество работ отечественных и зарубежных авторов, такими геохимиками как Л.П. Рихвановым, С.И. Арбузовым и др., было посвящено исследованиям радиоактивности в углях.

В 2019 году была выпущена статья Иванова Е.А., Шарова Д.А., Демьяненко М.В., Шарафутдинова Р.Б., Курындина А.В., где были рассмотрены аспекты безопасности обращения с промышленными отходами, содержащей техногенные радионуклиды, в рамках, действующих в Российской Федерации, системы обращения с отходами производства и потребления и системы обращения с радиоактивными отходами.

Содержание диссертации.

В первой главе рассмотрены физико-механические и инженерно-геологические особенности техногенных грунтов хвостохранилищ отходов переработки урановых руд.

Вторая глава содержит новые данные о сравнении физико-механических и химических свойств энергетической золы топливно-энергетического производства и золы, образующейся при глубокой переработке радиоактивного минерального сырья на примере золошлакоотвалов «Уртуйский» (ПАО «ППГХО») и «Каджи-Сай».

Третья глава посвящена исследованию влияния климатических условий на геоэкологические особенности состояния хвостохранилищ и изучению вопроса влажностного режима объектов. Приведены геологические особенности исследуемых объектов.

В четвертой главе приведены результаты теоретического моделирования и натурных исследований техногенных грунтов, а также усовершенствованные технологии проведения инженерных изысканий на хвостохранилищах переработки урановых руд.

В пятой главе представлены методические рекомендации для геоэкологических изысканий и комплекс исследований перед рекультивацией хвостохранилищ.

В шестой главе приведен выбор направлений по рекультивации объектов добычи и переработки объектов урановых производств.

Диссертационная работа посвящена вопросам исследования физико-механических и инженерно-геологических особенностей техногенных грунтов хвостохранилищ отходов обогащения урановых руд, разработке методики изучения влажностного режима в теле хвостохранилищ, а также научно-методическому обоснованию геоэкологических изысканий для принятия технических решений при безопасной эксплуатации и рекультивации объектов переработки урановых руд.

Благодарности

Автор благодарен научному руководителю к.т.н. В.П. Карамушке и ученому секретарю д.г-м н. Е.Н. Камневу за помощь, постановку задачи, обсуждению результатов и постоянное внимание к представленной работе. Автор выражает глубокую признательность Т.Ю. Лебедевой за объективные замечания и советы, позволившие повысить качество работы. Автор благодарен руководителям и коллегам из АО «ВНИИПромтехнологии», руководителям и ведущим специалистам ПАО «ППГХО» за бесценный опыт и возможность поработать на ведущем уранодобывающем предприятии России.

Все экспериментальные данные получены автором в результате проведения полевых инженерных изысканий, изучения физико-механических свойств и характеристик техногенных грунтов предприятия ПАО «ППГХО» (г. Краснокаменск, Читинская область), объектов на территории республики Киргизия («Каджи-Сай», «Мин-Куш», «Кара-Балты») и республики Таджикистан («Табашар»).

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

Первое защищаемое положение. Впервые для минерально-сырьевого кластера ядерной отрасли разработана геотехнология опережающих геоэкологических изысканий на большеобъемных хвостохранилищах переработки радиоактивных руд для обеспечения долговременной радиоэкологической безопасности от окружающей среды.

Исследования физико-механических и инженерно-геологических особенностей техногенных грунтов и лежалых хвостов хвостохранилищ обогащения урановых руд, а также научно-методическое обоснование геоэкологических изысканий для обеспечения безопасной эксплуатации и рекультивации объектов переработки урановых руд являются важной научно-практической задачей в свете сохранения устойчивого развития экономики энергетического сектора страны.

Оценивая надежность хвостохранилища переработки урановых руд, как компонент геосреды, стоит отметить, что процесс складирования и хранения радиоактивных отходов на поверхности земли является, радиационно-опасным фактором воздействия на окружающую среду. Основная часть радионуклидов радия (Ra), урана (U) и тория (Th) остается в отходах (хвостах), которые и складированы в хвостохранилище (рис.1). Поэтому на основе изучения техногенных грунтов и лежалых хвостов в инженерно-геологическом аспекте имеется возможность разработки эффективных методов по рекультивации хвостохранилищ.

На рис. 1 изображена блок-схема распределения радионуклидов по основным операциям гидрометаллургической переработки урановой руды.

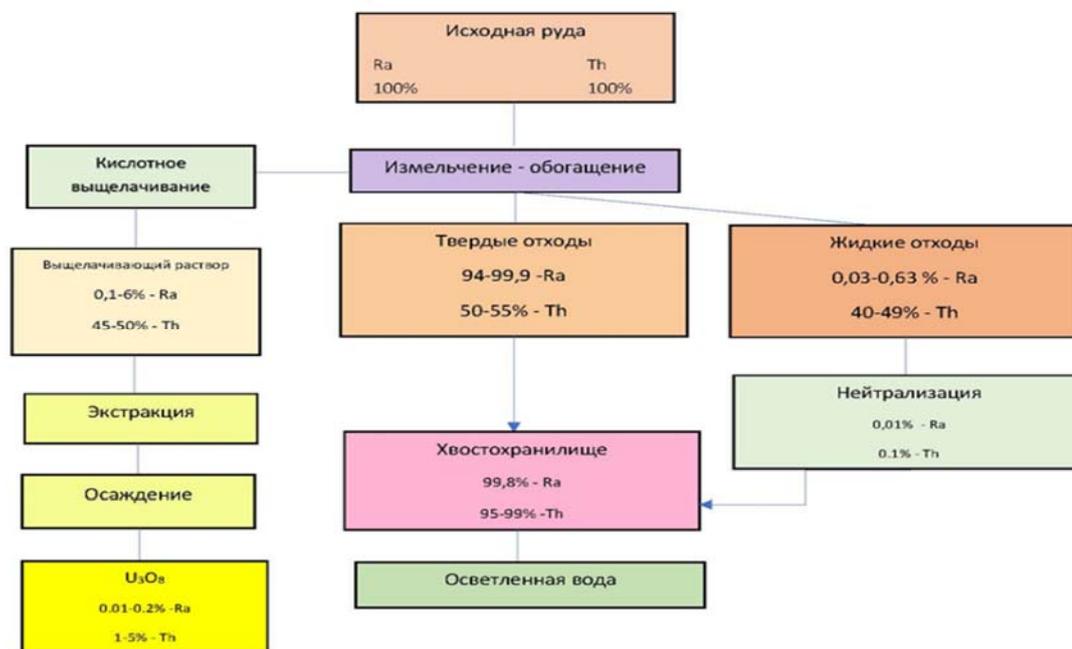


Рис. 1 – Распределение радионуклидов радия (Ra) и (Th) тория по основным операциям гидрометаллургической переработки урановой руды.

Радиорезистентные свойства хвостохранилища, устойчивость к воздействию внешних природных и техногенных факторов определяются наличием физико-геохимических барьеров в массиве хвостохранилища и изоляционных свойств слоя намыва. Оценка устойчивости осадков хвостохранилища снижает риски возникновения экологических катастроф.

Таким образом свойства техногенных грунтов определяются генетически унаследованным составом и структурой грунтов природного сложения, условиями переработки

урановых руд, инженерно-геологическими условиями района работ, конструкцией намывного сооружения (рис. 2), технологией намыва (рис. 3) и режимом эксплуатации объектов.

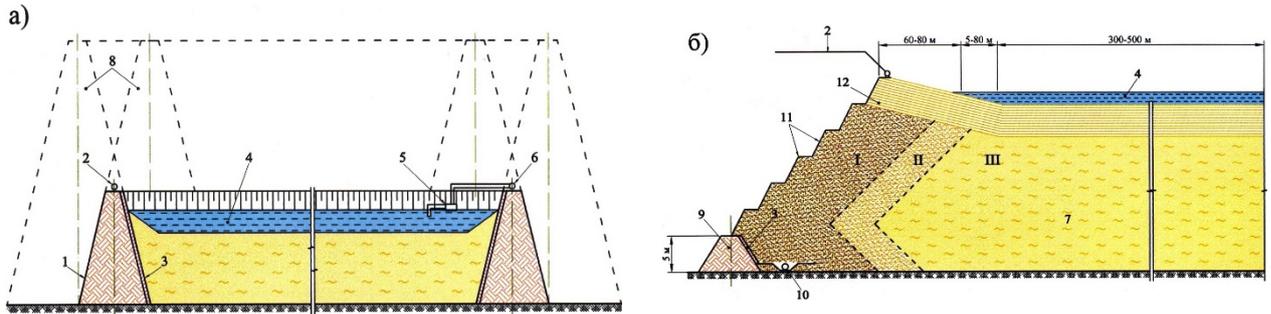


Рис. 2 – Типы хвостохранилищ по способу возведения: а) наливное; б) намывное

I – упорная призма; II – переходная зона; III – центральная зона; 1 – ограждающая дамба; 2 – разводящий пульпопровод; 3 – экран из полимерных материалов или глинистых грунтов; 4 – прудок; 5 – плавучая насосная станция оборотного водоснабжения; 6 – водовод оборотной воды; 7 – отложения хвостового материала; 8 – варианты наращивания ограждающей дамбы; 9 – пионерная дамба из карьерных грунтов; 10 – дренаж; 11 – ярус намыва; 12 – слой намыва.



Рис. 3 – Намывные хвостохранилища «Среднее» и «Верхнее» ПАО «ППГХО»

Свойства техногенных грунтов определяются генетически унаследованным составом и строением грунтов природного сложения, условиями переработки урановых руд, инженерно-геологическими условиями района работ, конструкцией намывного сооружения (рис. 2), технологией намыва и режимом эксплуатации объекта.

Во-первых, отличие техногенных грунтов от исходных природных грунтов в естественном залегании состоит в изменённом гранулометрическом составе. Эти изменения происходят за счёт отмыва части тонкодисперсных фракций, распределения (фракционирования) частиц по крупности, однородности в массиве, выраженной анизотропии свойств, часто в более рыхлом сложении (особенно при намыве под воду). Физико-механические свойства таких грунтов существенно изменяются со временем под влиянием процессов уплотнения и упрочнения. Увеличиваются также плотность сухого грунта, модуль деформации, удельное сцепление, угол внутреннего трения и др. Основным процессом, определяющим формирование техногенных грунтов, является фракционирование в двухфазном потоке (пульпе). Вследствие чего в точке сброса пульпы в хвостохранилище откладываются наиболее крупные фракции, а по мере удаления уменьшается крупность частиц. Перенос точки сброса пульпы будет обуславливать осадконакопление с образованием специфических форм частиц (техногенных текстур грунта), которые в дальнейшем будут служить границей разделения циклов седиментации.

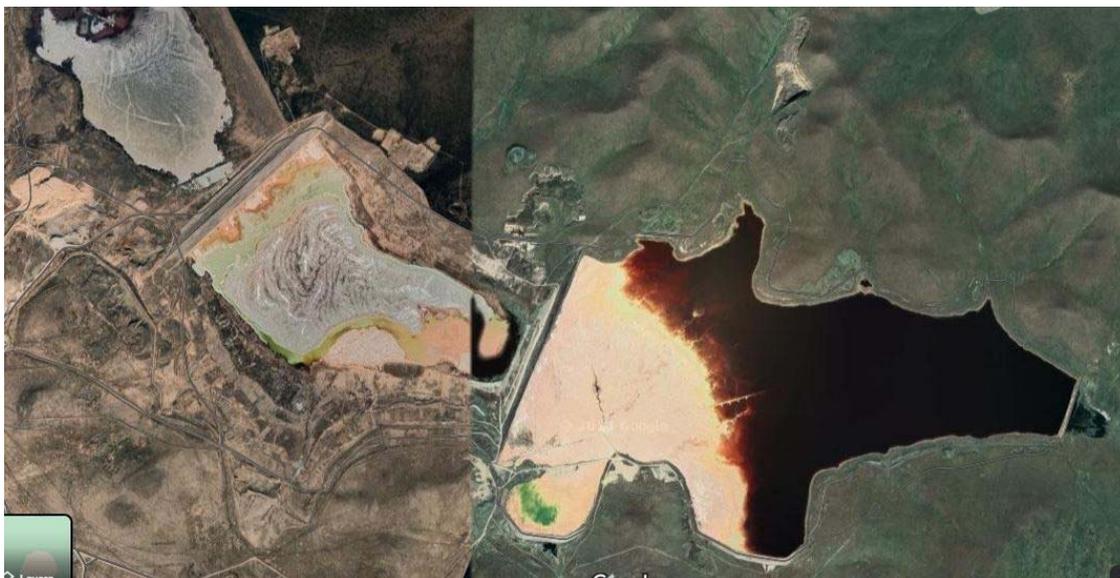


Рис. 4 – План-схема хвостохранилища «Среднее» и «Верхнее» ПАО «ППГХО»

Отличие техногенных грунтов от насыпных грунтов и исходных природных грунтов в естественном залегании состоит в изменённом гранулометрическом составе. Эти изменения происходят за счёт отмыва части тонкодисперсных фракций, распределения (фракционирования) частиц по крупности, однородности в массиве, выраженной анизотропии свойств, часто в более рыхлом сложении (особенно при намыве под воду). Физико-механические свойства таких грунтов существенно изменяются со временем под влиянием процессов уплотнения и упрочнения. Увеличиваются также плотность сухого грунта, модуль деформации, удельное сцепление, угол внутреннего трения и др.

Основным процессом, определяющим формирование техногенных грунтов, является фракционирование в двухфазном потоке (пульпе). Вследствие чего в точке сброса пульпы в хвостохранилище откладываются наиболее крупные фракции, а по мере удаления уменьшается крупность частиц. Перенос точки сброса пульпы будет обуславливать осадконакопление с образованием специфических форм частиц (техногенных текстур грунта), которые в дальнейшем будут служить границей разделения циклов седиментации.

Таблица 1

Содержание основных компонентов химического состава осветленной воды хвостохранилища ГМЗ «Верхнее» и «Среднее»

Компоненты	Размерность	Хвостохранилище ГМЗ «Верхнее»		Хвостохранилище ГМЗ «Среднее»	
		I п/г	II п/г	I п/г	II п/г
Na ⁺	мг/л мг-экв/%	<u>310</u>	<u>625</u>	<u>345</u>	<u>518</u>
Ca ⁺²	мг/л мг-экв/%	<u>301</u>	<u>377</u>	<u>286</u>	<u>417</u>
Mg ⁺²	мг/л мг-экв/%	<u>32</u>	<u>66</u>	<u>69</u>	<u>87</u>
Cl ⁻	мг/л мг-экв/%	<u>29</u>	<u>15</u>	<u>57</u>	<u>25</u>
SO ₄ ⁻²	мг/л мг-экв/%	<u>7540</u>	<u>8060</u>	<u>6960</u>	<u>7500</u>
NO ₃ ⁻	мг/л мг-экв/%	<u>189</u>	<u>418</u>	<u>250</u>	<u>375</u>
HCO ₃ ⁻	мг/л	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>

Компоненты	Размерность	Хвостохранилище ГМЗ «Верхнее»	Хвостохранилище ГМЗ «Среднее»
		I п/г - II п/г	I п/г - II п/г
	мг-экв/%	- -	- -
Минерализация	мг/л	15215 – 14730	13840 – 13770
pH	ед.	2,8 – 2,7	3,00 – 2,70
Жест. общ.	мг-экв/л	17,6 – 24,13	20,0 – 28,12
Fe _{общ}	мг/л	274 – 293	433 – 321
F	мг/л	274 – 290	214 – 192
Mo	мг/л	4,65 – <0,5	3,98 – 2,92
Mn	мг/л	442 – 500	332 – 396
Cu	мг/л	0,85 – 0,61	0,67 – 0,57
Zn	мг/л	5,50 – 3,45	4,19 – 3,39
Pb	мг/л	<0,1 – <0,1	0,24 – <0,1
U	мг/л	1,7 – 4,7	1,1 – 2,20

Происходит также изменение физико-химических свойств намывных грунтов, так как в процессе обогащения руды используются различные химически активные вещества, применение которых зависит от метода обогащения, т.е. в зависимости от конечного вида продукта – диоксида урана, или урана металлического, или тетрафторида урана – выбирается и технологическая схема переработки урановых руд. Наличие химических связей между частицами грунта влечет за собой образование новых техногенных минералов, которые ещё мало изучены.



Фото 1. Новообразованные гипергенные минералы урана хвостохранилища Табошары

Грунты, которые складываются в хвостах проходят процесс дробления и имеют более мелкие фракции и по морфологическим признакам отличаются от естественных грунтов. Поэтому в нашем случае лучше применять классификацию грунтов В.В. Охотина: песчаные $d > 0,05$ мм, пылеватые $d = 0,05$ мм, глинистые $d < 0,005$ мм.

В соответствии с методологическими положениями инженерно-геологических изысканий по Е.М. Сергееву основой для исследования природно-технических систем является выявление закономерностей их формирования и эволюции, масштаба и интенсивности взаимодействия с геологической средой. Но эти положения применимы только для природных грунтов в соответствии с потребностями различных видов строительства, и в них не учтены и не изучены техногенные грунты хвостохранилищ обогащения урановых руд, а существенным отличием техногенных грунтов от грунтов природного генезиса является фаза мобилизации и переноса

(распределение) частиц по хвостохранилищу. И это распределение проходит при непосредственном участии и контроле человека.

Второе защищаемое положение.

Доказано различие физико-механических и химических свойств энергетической золы ТЭК и золы, образующейся при переработки радиоактивного минерального сырья уран-угольных месторождений, что требует оценки наличия в золе попутных компонентов и негативного воздействия радиоактивной золы на окружающую среду.

Сравнительный анализ физико-механических и химических свойств **энергетической золы (отходов) топливно-энергетического производства и золы (отходов), образующейся при обогащении ураносодержащих углей**, проводился на основе результатов исследования техногенных грунтов золошлакоотвалов месторождений «Уртуйское» (ПАО «ППГХО» г. Краснокаменск) и «Каджи – Сай» (Киргизия). На этих объектах уран добывали из природных углей, и сооруженные в ходе эксплуатации золошлакохранилища подлежат рекультивации, поэтому изучение свойств золы необходимо для принятия технологических и технических решений.

Техногенные грунты пруда-накопителя **месторождения «Уртуйское»**, представленные шлаком и золой, характеризуются высокой степенью неоднородности гранулометрического состава и свойств, причем, зола имеет более низкие значения физико-механических характеристик, проявляя при этом тиксотропные свойства и склонность к значительной потере прочности и деформационных характеристик при динамическом воздействии.

Зола по гранулометрическому составу представлена как песок мелкий и пылеватый с содержанием пылевато-глинистой фракции от 51 до 82%, насыщенной водой; по плотности сложения – рыхлая.

Шлаки по гранулометрическому составу классифицируются как пески гравелистые, крупные и средней крупности.

Чашу и нижний бьеф золошлакоотвала слагают делювиальные светло-коричневые полутвердые, туго-мягкопластичные суглинки, реже текучепластичной консистенции, участками опесчаненные, с линзами песка мелкого, глины полутвердой, с гравием до 10%, местами суглинков гравелистый с единичным щебнем.

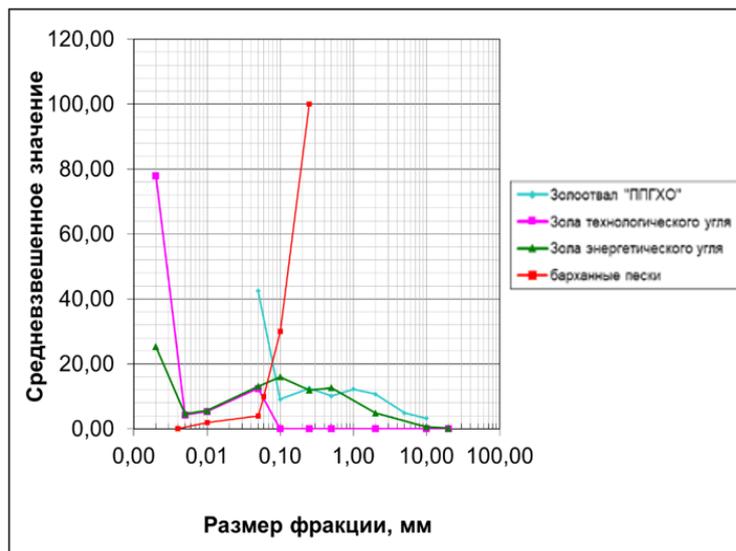
В геологическом строении площадки **золохранилища «Каджи-Сай»** принимают участие насыпные крупнообломочные грунты защитного противоэрозионного слоя золоотвала, насыпные искусственные грунты (отходы производств), флювиогляциально-пролювиальные отложения среднечетвертичного возраста, делювиально-пролювиальные отложения современного возраста и осадки верхнего подотдела олигоцен-миоцена.

Насыпные грунты и отходы производств подразделяются на энергетические и технологические золы.

Энергетические золы от светло-серого до темно-серого цвета, от маловлажных до влажных и водонасыщенных распространены на поверхности золоотвала. По гранулометрическому составу и пластичности, в основном, относятся к пылеватым пескам, реже, в зависимости от вмещающих пород, – к супесям и глинам.

Зола технологического угля представлена глинами от текучепластичной до твердой консистенции, от серого до темно-серого цвета и отмечена в южной части площадки – на участке аварийного прорыва хвостов, естественная влажность которого составляет 70%.

Рис. 4 – Кривые гранулометрического состава техногенных грунтов золошлакоотвала «Уртуйское», «Каджи-Сай» и барханных песков.



Зола хвостохранилищ с отходами разработки уран-угольных месторождений содержит в тонкой фракции ценные микроэлементы, извлечение которых в процессе рекультивационных мероприятий рентабельно. Установлены закономерности пространственного их размещения в массиве хвостохранилища.

По результатам исследований при инженерно-геологических изысканиях было доказано, что ГОСТ 25100-20 «Грунты классификация» не может быть применен по отношению к грунтам хвостохранилищ и золошлакоотвалам из-за отсутствия классификации по гранулометрическому составу. В соответствии с методологическими положениями инженерно-геологических изысканий по Е.М. Сергееву основой для исследования природно-технических систем является выявление закономерностей их формирования и эволюции, масштаба и интенсивности взаимодействия с геологической средой. Но эти положения применимы только для природных грунтов в соответствии с потребностями различных видов строительства, и в них не учтены и не изучены техногенные грунты хвостохранилищ обогащения урановых руд, а существенным отличием техногенных грунтов от грунтов природного генезиса является фаза мобилизации и переноса (распределение) частиц по хвостохранилищу. И это распределение проходит при непосредственном участии и контроле человека.

В ходе исследования установлено, что к специфическим грунтам хвостохранилищ относятся намывные суглинки и супеси с показателем пластичности $I_p > 2,9- 5,1$ и насыпные супесчаные грунты, слагающие тело дамб. Намывные суглинки и супеси обладают высокими гидрофильными свойствами (способностью притягивать и удерживать воду). Они высокопористые ($e = 0,819-1,211$), имеют высокую природную влажность (36,6- 59,2%), превышающую влажность на границе раскатывания. Характеризуются сильной сжимаемостью, медленным протеканием осадков во времени (коэффициент консолидации менее $0,1 \times 10^{-7}$ см²/год), низкими прочностными характеристиками.

Насыпные супеси, содержащие дресву и щебень до 20% залегают в нижних откосах дамб на локальных участках. Плотность в сухом состоянии (скелета) 1,52- 1,57 т/м³. Максимальная плотность грунта при оптимальной влажности 13,9% составила 1,82- 1,88 т/м³. При коэффициенте уплотнения, равном 0,95 (95-ти % обеспеченности максимальной плотности) плотность грунта в сухом состоянии (скелета) составила 1,76 т/м³. Насыпные супеси просадочные при водонасыщении от дополнительных нагрузок. Начальное просадочное давление составляет 0,7-1,3 кгс/см² (70-130 кПа). Тип грунтовых условий по просадочности – I (первый). Мощность просадочных супесей не превышает 2,5м.

Таким образом, при инженерно-геологических изысканиях было доказано, что к грунтам и золошлакоотвалам не разработана научная классификации по гранулометрическому составу. Так пески по крупности классифицируются по диаметру от 2 до 0,1мм, а все, что меньше 0,1 мм, относится к глинистым и пылеватым частицам. Но грунты, которые складываются в хвостах проходят процесс дробления и имеют более мелкие фракции и по морфологическим признакам отличаются от естественных грунтов. Поэтому при инженерно-геологических изысканиях следует применять классификацию грунтов В.В. Охотина: песчаные $d > 0,05$ мм, пылеватые $d = 0,05 < 0,005$ мм, глинистые $< 0,005$ мм.

Таким образом, радиорезистентные свойства осадков хранилища, особенности геохимии радионуклидов определяются гранулометрическим составом хвостов, плотностью, влажностью и формами нахождения радиоактивных изотопов урана и радия. Это составляет содержание второго защищаемого положения.

Третье защищаемое положение.

Разработан научно-обоснованный прогноз режима интенсивности влажности техногенных грунтов хвостохранилищ уранового производства на основе авторских методических положений инженерно-геологических и геоэкологических изысканий. Для наиболее точного и долговременного прогнозирования безопасного состояния хвостохранилищ необходимо изучение **влажностного режима** объекта.

В 1977 году ЮНЕСКО представило карту распределения степени аридности территорий, где были выделены четыре биоклиматических зоны.

На рис. 4 изображено расположение исследуемых в диссертации объектов, находящихся

в этих аридных биоклиматических зонах.

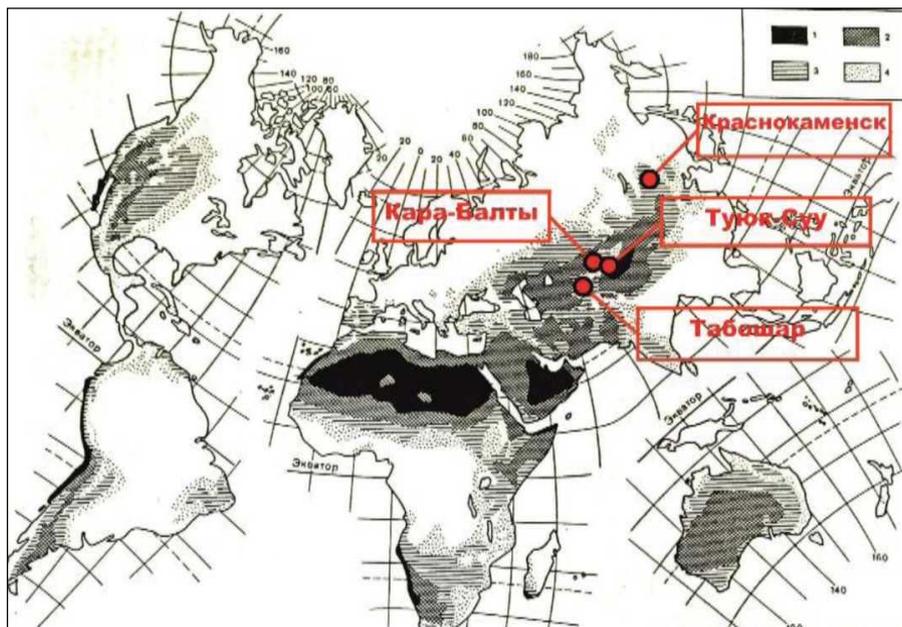


Рис. 5 - Карта распределения степени аридности территорий объектов исследования

Условные обозначения:

- 1 – Экстрааридная зона.** Годовая норма осадков – менее 100 мм.
- 2 – Аридная зона.** Годовая сумма осадков – 100-200 мм. Индекс аридности – $<0,03$.
- 3 – Семиаридная зона.** Годовая сумма осадков – 200-400 мм. Индекс аридности – 0,2-0,5.
- 4 – Зона недостаточного увлажнения.** Годовая сумма осадков – 400-800 мм. Индекс аридности – 0,5-0,75.

Основное отличие аридной зоны от зон континентального и резкоконтинентального климата состоит в особом влажностном режиме. Применительно к хвостохранилищам, находящимся на этих климатических территориях, возможно образование водонасыщенной зоны, отрезанной от поверхности слоем мульчи, препятствующим испарительным процессам, т.е. формирование линз воды в толще хвостовых отложений. Проведенные исследования показали, что механизм этого процесса в какой-то степени, соответствует режиму питания грунтовых вод пустыни через зону аэрации.

По данной классификации исследуемые объекты, а именно предприятие ПАО «ППГХО» (г. Краснокаменск, Читинская область), объекты на территории республики Киргизия («Каджи-Сай», «Мин-Куш», «Кара-Балты») и республики Таджикистан («Табашар») относятся к семиаридной и аридной зоне.

Рассмотрим геологические особенности этих объектов.

Хвостохранилища «Верхнее», «Среднее» и золошлакоохранилище (объекты ПАО «ППГХО»).

Объекты, находящиеся в Забайкалье, сложены палеозойскими магматическими породами, представленными гранитами и диоритами; верхнеюрскими эффузивными породами, представленными фельзитами; мезо-кайнозойскими элювиальными образованиями, представленными выветрелой частью горных пород, а также глинистыми разностями, элювий диорита может также быть представлен песком; четвертичными делювиальными и делювиально-пролювиальными обложениями, представленными суглинками, глинами, местами супесью, гравийным и галечниковым грунтом, на бортах пади возможно встретить дресвяные и щербенистые грунты, техногенными образованиями.

Техногенные грунты, накопленные в хвостохранилищах, представлены песком пылеватым, супесью и суглинком. Эти три разновидности грунтов в пределах 50-метровой полосы вдоль дамбы часто образуют сложные переслаивания в разрезе и фациальные переходы в горизонтальной плоскости. В этих техногенных отложениях образуется и погребённая многолетняя мерзлота. Это связано с эксплуатацией хвостохранилища в зимнее время, когда происходит постоянное намораживание слоя осадков, и образовавшийся слой мерзлоты не успевает протаять за летний период, особенно если год был холодным.

Хвостохранилища объектов «Каджи-Сай», «Мин-Куш», «Туяк-Суу» и «Кара-Балты». Эти объекты исследовались в рамках Межгосударственной целевой программы «Рекультивация территорий государств-членов ЕвразЭС».

В ходе обследования было установлено, что к специфическим грунтам площадок хвостохранилищ относятся намывные суглинки и супеси с показателем пластичности $I_p > 2,9$ -

5,1 и насыпные супесчаные грунты, слагающие тело дамб. Намывные суглинки и супеси обладают высокими гидрофильными свойствами (способностью притягивать и удерживать воду). Они высокопористые ($e = 0,819-1,211$), имеют высокую природную влажность (36,6-59,2%), превышающую влажность на границе раскатывания. Характеризуются сильной сжимаемостью, медленным протеканием осадков во времени (коэффициент консолидации менее $0,1 \times 10^7 \text{ см}^2/\text{год}$), низкими прочностными характеристиками.

Насыпные супеси, содержащие дресву и щебень до 20% залегают в нижних откосах верхней и пионерной дамб на локальных участках. Плотность в сухом состоянии (скелета) $1,52-1,57 \text{ т/м}^3$. Максимальная плотность грунта при оптимальной влажности 13,9% составила $1,82-1,88 \text{ т/м}^3$. При коэффициенте уплотнения, равном 0,95 (95-ти % обеспеченности максимальной плотности) плотность грунта в сухом состоянии (скелета) составила $1,76 \text{ т/м}^3$. Насыпные супеси просадочные при водонасыщении от дополнительных нагрузок. Начальное просадочное давление составляет $0,7-1,3 \text{ кгс/см}^2$ (70-130 кПа). Тип грунтовых условий по просадочности – I (первый). Мощность просадочных супесей не превышает 2,5 м.

В геологическом строении площади хвостохранилища «Кара-Балты» общим объемом 34,5 млн. м^3 и площадью 2576,5 тыс. м^2 . принимают участия континентальные отложения четвертичного возраста, являющиеся отложениями конуса-выноса реки Кара-Балты и покровные суглинки незначительной мощности.

На площади занимаемой хвостохранилищем в разрезе зоны аэрации и водоносных пород преобладают чередующиеся между собой галечники от мелких до крупных с песчано-гравийным, реже песчано-суглинистым заполнителем. Мощность прослоев заполнителя изменяется от 2 до 37 м. Галечники имеют большую водопроницаемость (коэффициент фильтрации достигает 150 м/сутки). По всей площади участка, занимаемого хвостохранилищем, галечные отложения перекрываются маломощным (0,7-1,0 м) чехлом суглинков с коэффициентом фильтрации от 0,09 до 0,2 м/сут. в радиусе 1 км от хвостохранилища.

Намытые грунты по отношению к естественным имеют свои специфические особенности, в данном случае – илы и пылеватые пески, которые залегают в частом прослаивании, находящиеся на границе перехода из одной разновидности в другую. Для таких грунтов характерны большие колебания значений влажности, пластичности, коэффициента пористости.

Влажностной режим любого хвостохранилища зависит от гранулометрического состава техногенных грунтов, который в свою очередь является одним из показателей, характеризующих крупность намытого материала. В результате фракционирования при намыве хвостохранилищ происходит распределение по средневзвешенному диаметру: в упорной призме – 0,33-0,05 мм, в переходной зоне – 0,1-0,02 мм и в центральной зоне – менее 0,02 мм.

Для примера проведем сравнительный анализ данных по техногенным грунтам объекта «Кара-Балты» с данными по барханам в зоне аэрации, исследованием которых занимался Б.Н. Чубаров.

Климат этого района умеренно континентальный с высокими летними, умеренными зимними температурами и небольшим количеством атмосферных осадков (среднегодовое количество 380 мм). Наибольшее их количество выпадает в виде дождя и приходится на весну и осень, минимальное – на август и сентябрь. Атмосферные осадки и талые воды на площади предгорной части равнины и склона инфильтруются в рыхлообломочный материал, пополняя запасы подземных вод. Максимальное значение относительной влажности (76-78%) наблюдается зимой, минимальное (55-56%) летом.

На площади занимаемой хвостохранилищем Кара-Балты в разрезе зоны аэрации и водоносных пород преобладают чередующиеся между собой галечники от мелких до крупных с песчано-гравийным заполнителем. Мощность прослоев заполнителя изменяется от 2 до 37 м. Галечники имеют большую водопроницаемость (коэффициент фильтрации достигает 150 м/сутки). По всей площади участка, занимаемого хвостохранилищем, галечные отложения перекрываются маломощным (0,7-1,0 м) чехлом суглинков с коэффициентом фильтрации от 0,09 до 0,2 м/сут. в радиусе 1 км от хвостохранилища.

Твердые отходы от переработки уранового сырья в виде песков и илов доставляются на

хвостохранилище гидротранспортом. Илы отлагаются на дне хвостохранилища, а пески используются для сооружения тела дамбы.

Для сравнения рассмотрим территорию, которая находится в пустыни и характеризуется малым количеством осадков, выпадающих преимущественно в холодную часть года в виде дождя, продолжительным сухим и жарким летом и большими величинами годовых и суточных амплитуд температур воздуха.

По гранулометрическому составу барханные пески можно разбить на следующие фракции <0,005; 0,005-0,01; 0,01-0,05; 0,1-0,05; 0,1-0,25. При этом допускается, что частицы могут иметь форму шара. Так как эти пески имеют в своем составе более 90% фракций размером 0,05-0,25мм и по классификационным параметрам сравнимы с песками мелкими.

Построив кривые гранулометрического состава техногенных грунтов рассматриваемых объектов и барханных песков, легко определить эффективный действующий диаметр частиц и коэффициент неоднородности – параметры, которые в дальнейшем используем для вычисления коэффициента фильтрации по эмпирическим формулам Хазена и Слихтера.

Такое же сравнение можно провести, рассматривая гранулометрический состав техногенных грунтов золошлакоотвалов «Уртуйское» и «Каджи-Сай».

На рис. 4 и 6 приведены кривые гранулометрического состава техногенных грунтов хвостохранилищ, золошлакоотвалов и барханных песков.

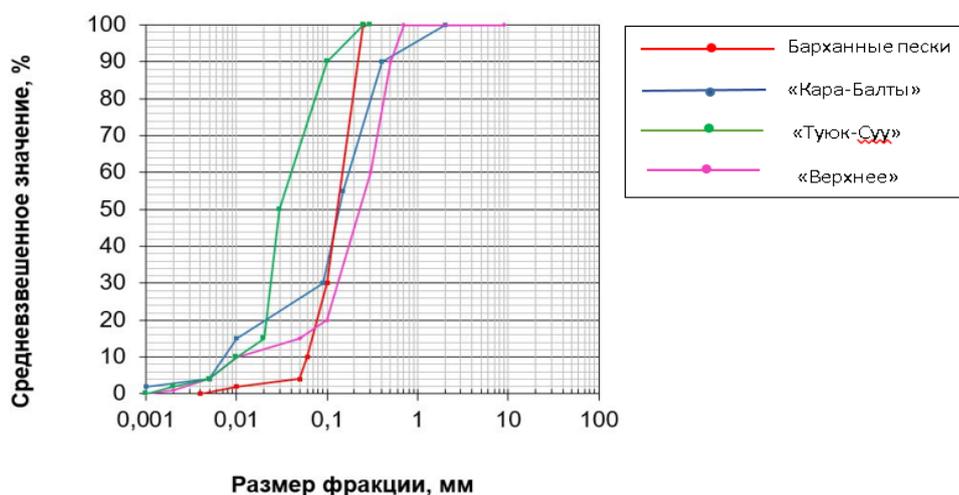


Рис. 6 – Кривые сравнения гранулометрического состава техногенных грунтов хвостохранилищ «Кара-Балты», «Туюк-Суу», «Верхнее» и барханных песков.

Сравнивая приведенные кривые, можно сделать вывод, что природные пески пустыни (барханные пески) и техногенный грунт хвостохранилищ и золошлакоотвалов практически одинаковы по гранулометрическому составу, но они отличаются по происхождению, морфологии и химией поровых вод.

Поэтому в дальнейшем можно рассматривать влагоперенос в хвостохранилищах по аналогии с влагопереносом в условиях песчаной пустыни.

Одним из важных элементов комплексных контрольных наблюдений за состоянием хвостохранилищ является изучение **гидрогеологических условий** во времени и пространстве – процесса изменения уровня подземных вод, расхода, температуры, химического состава и пр.

Наблюдения осуществляется посредством отбора проб из пробуренных по определенной сетке скважин, проходка которых осуществляется до грунтов водоупора. Скважины первого пояса направлению источников потребления подземных вод.

Капиллярная вода при однородном строении зоны аэрации бывает тесно связана с уровнем грунтовых вод, а при неоднородном строении, обусловленном наличием в разрезе глинистых линз и прослоев, эта связь может отсутствовать или носить весьма сложный характер.

В связных грунтах высота поднятия капиллярных вод может достигать несколько метров. Это зависит от гранулометрического и минералогического состава грунта зоны аэрации, формы частиц, степени окатанности частиц, структуры, плотности, однородности их сложения,

удельного веса, температуры, и многих других условий.

В песчано-глинистых породах высота капиллярного поднятия H_k приближенно может быть определена по формуле известного австрийского ученого Йозефа Козени:

$$H_k = 0,446 \cdot \frac{1-n}{n} \cdot \frac{1}{d_e}$$

Где:

n – коэффициент пористости, доли единицы;

d_e – действующий диаметр, см.

В таблице 1 приведены значения предельной высоты капиллярного поднятия

Таблица 2

Значения предельной высоты капиллярного поднятия

Породы	Значение H_k , см
Песок крупнокристаллический	2,0–3,5
Песок среднекристаллический	12,0–35,0
Песок мелкокристаллический	35,0–120,0
Супесь	120,0–350,0
Суглинок	350–650
Глина легкая	650–1200

Чтобы спрогнозировать линзу воды в теле хвостохранилища, был произведен расчет коэффициента увлажнения K_y – отношение годового количества осадков к годовой величине испаряемости для данного ландшафта. Коэффициент увлажнения является показателем соотношения тепла и влаги.

$$K_y = \frac{R}{E}$$

Где: R – среднегодовое количество осадков, мм.

E – величина испаряемости (количество влаги, которое может испариться с водной поверхности при данной температуре), мм.

Величина этого показателя, разумеется, будет напрямую зависеть от температурного режима на конкретной территории, а также от количества атмосферных осадков, выпадающих за год.

Количество осадков зависит от типа почвы, температуры в данном регионе в конкретный период времени и других факторов. Поэтому, несмотря на кажущуюся простоту приведенной формулы, расчет коэффициента увлажнения требует проведения большого количества предварительных измерений с помощью точных приборов и может быть осуществлен только специалистами-метеорологами.

Исследование влажностного режима района расположения объектов необходимо для выявления возможного образования линз воды в теле хвостовых отложений.

С этой целью был изучен баланс подземных вод хвостохранилищ «Туюк-Суу», «Табашар» и «Верхнее».

Гидрографическая сеть района «Туюк-Суу» представлена одноименной рекой и временно действующими водотоками (логами). По количеству выпадающих осадков изучаемый район относится к зоне с избыточным увлажнением, т.е. величина испарения с подстилающей поверхности существенно меньше количества выпадающих осадков, среднегодовые значения которых в исследуемой местности увеличиваются с высотой. Над водоемами наблюдается уменьшение осадков, что обусловлено их термическими свойствами и меньшей, по сравнению с сушей, шероховатостью. $K_y = 2,084$.

Западная часть хвостохранилища находится у подножия обрывистого горного склона, спускающегося непосредственно к его чаше. На склоне отмечается плоскостной смыв продуктов выветривания коренных пород и легко размываемых крупнообломочных глинистых отложений, а также струйчатая эрозия (промоины глубиной до 2м). Указанные процессы проявляются во время дождей и таяния снежного покрова. Наиболее интенсивно они протекают во время выпадения ливневых осадков.

В ходе инженерных изысканий было выявлено, что через тело верхней грунтовой дамбы фильтрация подземных вод происходит только в галечниковом основании мостового перехода и его примыканиях. Питание хвостовых вод осуществляется также за счёт фильтрационных потерь в разрушающемся железобетонном водоотводном канале. Расход воды в водопропускных трубах за последние 5 лет увеличился в 3 раза и составляет около 60 л/с. Пионерная грунтовая дамба частично размываема поверхностным стоком. Движение фильтрационных вод осуществляется через тело и основание дамбы.

В районе расположения хвостохранилища «**Табошар**» выделяется два водоносных комплекса: в верхнечетвертичных-современных и плиоцен-нижнечетвертичных отложениях.

Величина нормы годового испарения с водной поверхности хвостохранилища примерно в пять раз выше количества выпадающих осадков, а испарение с поверхности суши не на много превышает количество осадков. Такое соотношение выпадающих осадков и испарения в целом характерно для данного района, находящегося в зоне недостаточного увлажнения. $K_y = 0,96$

Количество осадков еще не дает полного представления об обеспеченности территории влагой, так как часть атмосферных осадков испаряется с поверхности, а другая часть просачивается в почву.

По количеству осадков район хвостохранилища «**Верхнее**» относится к степной зоне с недостаточным увлажнением. Среднегодовая норма осадков около 300мм. $K_y = 1,112$.

В тёплое время за счёт оживления циклонической деятельности выпадает более 90% от годовой суммы осадков. Весной и летом наиболее часто наблюдаются сильные ветры. Преобладают ветры северо-западных и северо-восточных румбов. В этом районе практически все выпадающие в течение года на водосборную площадь осадки уходят на испарение и только небольшая часть, около 10%, идет на формирование поверхностного стока и пополнение подземных запасов воды.

При: $K_y > 1$ – увлажнение избыточное;

$K_y \approx 1$ – увлажнение достаточное;

$0,3 < K_y < 1$ – увлажнение недостаточное;

$K_y < 0,3$ – скудное увлажнение.

Рассмотрим **Вариант** влагопереноса, когда питание хвостохранилища грунтовыми водами отсутствует (происходит питание только за счет инфильтрации атмосферных осадков) рассматривается для **намывных хвостохранилищ**.

Капиллярная и пленочная влага сосуществуют и обладают одинаковыми свойствами, что и «вода в объеме», т.е. свободная вода. Аномальными свойствами обладает только влага, соответствующая слою воды в несколько молекулярных слоев, которая по своим свойствам напоминает лед.

Для расчета примем $q = 0$. Это означает, что поток влаги через какую-либо пористую среду отсутствует. Получаем уравнение следующего вида:

$$\frac{\partial \psi}{\partial h} = -\frac{\partial \varphi}{\partial h}$$

Учитывая, что при полном водонасыщении $h = 0$, капиллярно-пленочный потенциал $\varphi = 0$ и $\psi = 0$, получаем:

$$\psi = -\varphi$$

(капиллярно-пленочный потенциал и гравитационный потенциал в любом сечении).

Так получаем, что потенциал поля тяжести:

$$\varphi = g \cdot h = \frac{\rho \cdot g \cdot h}{\rho} = \frac{P}{\rho}$$

Где: g – ускорение силы тяжести

ρ – плотность воды,

P – давление столба воды высотой h .

Если мы выразим давление через высоту водного столба и примем для воды $\rho = 1$, получаем, что численно $\varphi = h$. Тогда:

$$\psi = -h$$

Для каждого изучаемого объекта:

1. «Туюк-Суу» $\psi = -573\text{мм}$ или $-0,6\text{м}$
2. «Табошар» $\psi = -355\text{мм}$ или $-0,36\text{м}$
3. «Верхнее» $\psi = -338\text{мм}$ или $-0,34\text{м}$

В хвостохранилище «Кара-Балты» отмечался несколько повышенный коэффициент фильтрации для илов. Это можно объяснить тем, что для илов, намытых в тело карты, характерно наличие трещин усыхания, также частое переслаивание песчаных грунтов и илов.

Проведенные исследования (более 1000 определений) в период эксплуатации хвостохранилищ уранодобывающей отрасли показали, что влажность хвостов зависит от их вида (гранулометрическая классификация и др. признаки), а также определяется периодами между намывами и глубиной залегания отложений. Хвосты ниже кривой депрессии и в центральной зоне хвостохранилищ характеризуются влажностью, соответствующей полному водонасыщению.

В период формирования отложений поверхностного слоя (мощность $0,3 - 0,5\text{ м}$) они также находятся в водонасыщенном состоянии. После прекращения намыва влажность отложений уменьшается и характеризуется при длительности «отдыха» месяц и более следующими показателями:

мелкий песок – $3-8\%$; песок пылеватый и супесь – $5-12\%$;
супесь пылеватая – $8-16\%$; суглинок – $10-15\%$.

Влажность хвостов, расположенных между поверхностным слоем и кривой депрессии в период отдыха, близка к значениям молекулярной влагоемкости, которая в среднем характеризуется следующими величинами:

мелкий песок – 12% ; песок пылеватый и супесь – 14% ;
супесь пылеватая – 16% .

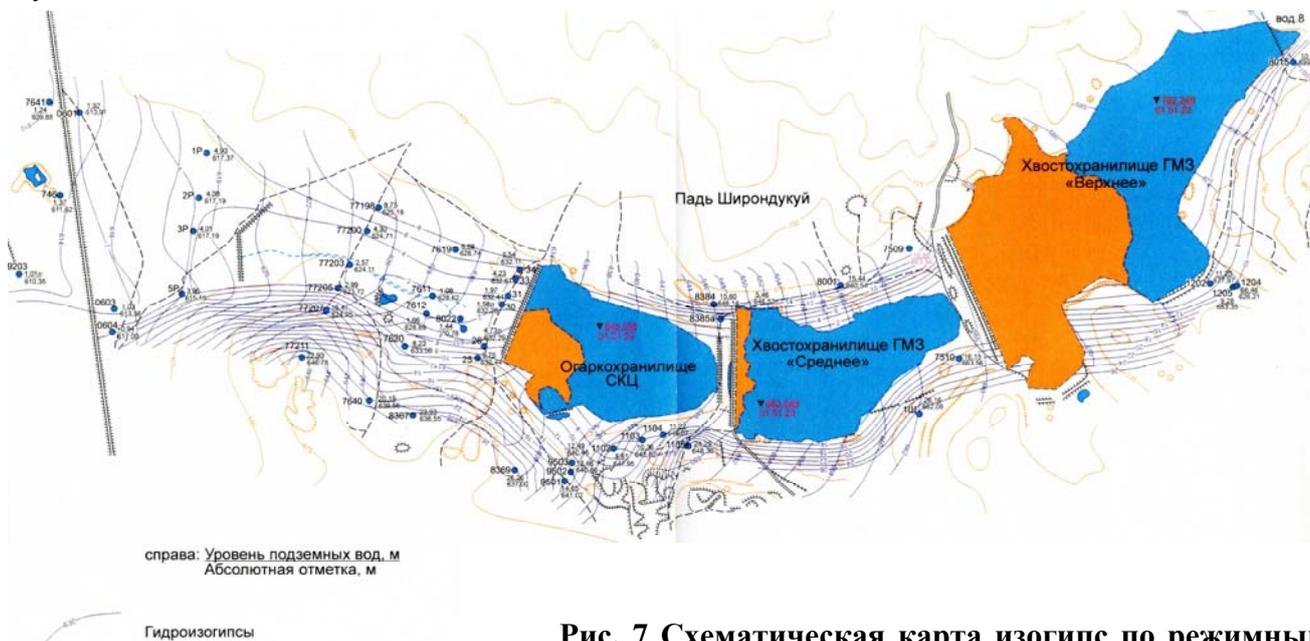


Рис. 7 Схематическая карта изогипс по режимным наблюдениям за уровнем и химическим составом воды

Полученные результаты послужили базой для разработки **расчетной методики**, позволяющей прогнозировать постэксплуатационные этапы хвостохранилища, расположенного в аридной зоне. Предлагаемая методика позволяет принимать технические решения по снижению возможных влияний на устойчивость хвостохранилища (дренаж низового откоса, искусственное осушение поверхности и др.), исключая выход кривой депрессии на низовой откос намывного хвостохранилища, так как при прекращении эксплуатации хвостохранилища процесс инфильтрации продолжается с одновременным интенсивным испарением воды из прудка отстойника и поверхности пляжей. Происходит также подсушка отложений до полного исчезновения открытой водной поверхности, консолидация отложений с образованием трещин, а сформировавшийся в эксплуатационный период под хвостохранилищем купол, лишенный подпитки, может

сместиться вплоть до отрыва от основания ложа хвостохранилищ. Это может привести к вымыванию грунта и, в свою очередь к прорыву пионерной дамбы, то есть к экологической катастрофе.

В соответствии с нормативными документами, которые действуют на территории РФ, для исследования всех грунтов используется ГОСТ 25100-2020, в котором приведены нормативные и расчетные характеристики для природных грунтов. Необходимо провести корректировку нормативных документов, так как техногенные грунты, находящиеся в хвостохранилищах, существенно отличаются от природных и содержат 99% радионуклиды Ra (радия) и Th (тория).

Четвертое защищаемое положение. Для исследования техногенных грунтов хвостохранилищ и изучения их физико-механических характеристик, к которым относятся объемный и удельный вес, коэффициент фильтрации, угол внутреннего трения и коэффициент уплотнения, а также для изучения гидрогеологических условий **предлагается использовать комплекс инженерно-геофизических и инженерно-геологических изысканий.**

С помощью бурения скважин, проходки шурфов, отбора проб нарушенного и ненарушенного сложения, пенетрации (динамического и статического зондирования) и лабораторного анализа отобранных проб можно определить физико-механические характеристики техногенных грунтов.

Существенно ускоряют и повышают качество и точность инженерно-геологической съемки геофизические методы исследования.

Основным методом изучения условий залегания горных пород, оценки минерализации подземных вод и особенностей их фильтрации является электроразведка, так как основным параметр геологического разреза – это его удельное электрическое сопротивление. Результат получается в виде геоэлектрического разреза, который имеет прямую связь с геологическим.

В связи с тем, что инженерно-геологическая зона (объект исследований) непрерывно изменяет своё состояние с течением времени, то есть происходят изменения физико-механических свойств грунтов и материалов, нарушается динамика и химизм подземных вод, меняются их электрические и термические поля, необходимо фиксировать эти изменения. С этой целью проводятся режимные геофизические наблюдения, при которых соблюдается неизменность точек, а промежутки времени между наблюдениями и циклами наблюдений выбираются в зависимости от скорости протекания изучаемого процесса. На основании корреляции получаем сведения, необходимые для прогнозирования физико-геологических, инженерно-геологических и гидрогеологических процессов.

Геофизические исследования выполняются на всех стадиях (этапах) инженерно-геологических изысканий в сочетании с другими видами инженерно-геологических работ. С помощью геофизических методов устанавливается состав и мощность рыхлых четвертичных отложений, выявляются литологическое строение массива горных пород, тектонические нарушения и зоны повышенной трещиноватости и обводненности. Определяются глубины залегания уровней подземных вод, водоупоров и направления движения потоков подземных вод, гидравлические параметры грунтов и водоносных горизонтов, состав, состояние и свойства грунтов в массиве и их изменения, изучаются геологические и инженерно-геологические процессы, проводится мониторинг опасных геологических и инженерно-геологических процессов, сейсмическое микрорайонирование территории.

Чтобы уменьшить количество буровых выработок и получить сведения о физико-механических свойствах грунтов без лабораторных испытаний предусматривается испытание намывных грунтов динамическим зондированием или пенетрацию, с помощью которой можно определить объемную массу скелета хвостохранилища, коэффициент пористости, модуль деформации, сцепление, угол внутреннего трения, коэффициент сжимаемости, для илов – консистенцию, для песков – степень плотности и динамическую устойчивость.

Объем геофизических работ, а именно количество и система размещения геофизических профилей и точек, определяется в зависимости от характера решаемых задач (с учётом сложности инженерно-геологических условий).

На обследованной территории после выполнения геофизических работ при обнаружении изменения влажностных характеристик и обнаружении аномальных сопротивлений грунта,

необходимо выполнить бурение скважин, из которых будут отобраны пробы воды на химический анализ и пробы грунта для определения гранулометрического состава. Затем методом пенетрации получаем физико-механические характеристики грунтов по инструкции «Методы полевых испытаний...», и производим расчет зависимости изменения плотности искусственных техногенных грунтов, которые отличаются от грунтов естественного сложения, от крупности частиц по эмпирическим формулам:

$$P_d^H = 0,4 \cdot P_{\text{ч}} \sqrt{d/d'}$$

$$P_d^K = 0,45 \cdot P_{\text{ч}} \left(\frac{d}{d'}\right) \cdot 0,19$$

где: $P_{\text{ч}}$ – плотность частицы, г/см³ (пределы 2,5-2,8 г/см³);

d – средневзвешенная крупность хвостов (пределы 0,02-0,33 мм);

d' – контрольная крупность хвостов, равная 0,074 мм.

Применение методов пенетрационных испытаний – статического и динамического зондирования – позволяет определить характер залегания грунтов различного литологического состава, положение границ между слоями, включая оценку степени однородности грунтов и степени плотности песчаных грунтов, а также физические и механические характеристики грунтов – показатель текучести, коэффициент пористости, модуль деформации, угол внутреннего трения и удельное сцепление.

На территории хвостохранилища «Верхнее» (рис. 8) были проведены инженерно-геологические изыскания, которые включали в себя бурение скважин, отбор проб грунта и воды, а также статическое зондирование в чаше хвостохранилища для определения природной плотности песчаных грунтов, находящихся в рыхлом состоянии или ниже уровня подземных вод. Поскольку трудно установить природную плотность этих грунтов прямыми методами, приходится использовать косвенные, один из которых называется зондированием грунтов.

Если применять усовершенствованные технологии проведения изысканий, то можно исключить негативное воздействие на сотрудников, которые обслуживают хвостохранилище, уменьшить стоимость изыскательских работ и снизить экономический риск.

В ходе бурения скважин были вскрыты такие техногенные грунты: песок пылеватый многолетнемерзлый, льдистый, местами талый; супесь пластичной и текучей консистенций, редко супесь твердая пылеватая с прослоями песка пылеватого и суглинка; суглинок тугопластичной и мягкопластичной консистенций, пылеватый легкий с прослоями песка пылеватого и супеси; грунт талый, прослоями мерзлый, льдистый и слабольдистый, массивной, слоистой и сетчатой криотекстуры.

Также в чаше хвостохранилища «Верхнее» была обнаружена островная мерзлота, образование которой можно объяснить только способом укладки хвостов. Кровля прослоев погребённых многолетнемерзлых грунтов в техногенных отложениях может служить поверхностью скольжения, что создаёт опасность выпирания. При этом погребённая мерзлота высокотемпературная и может быстро деградировать, что сильно увеличит сжимаемость слоя грунтов.

При разработке проектов рекультивации хвостохранилищ требуется значительный объем данных, характеризующих физико-механические показатели хвостовых отложений. Поэтому ниже предлагается рассмотреть методические рекомендации по изучению хвостохранилищ урановых производств для принятия оптимальных технических решений как на период эксплуатации, так и при разработке рекультивационных мероприятий.

В результате многолетних инженерно-геологических обследований, включающих в себя проходку шурфов, скважин и динамическое зондирование хвостохранилищ ГМЗ переработки урановых руд, установлены основные характеристики намывных отложений.

В настоящее время при исследовании грунтов используется сочетание лабораторных и полевых методов определения их прочностных характеристик. Однако, как лабораторные определения прочностных свойств по образцам, отобраным в скважинах и шурфах, так и полевые испытания штампами и плоскостными срезами в грунтах, исследование крыльчаткой в скважинах, позволяют получить характеристику грунтов с перерывами по глубине. В первом

случае это объясняется невозможностью отобрать образцы ненарушенной структуры непрерывно по всей глубине, во втором – сложностью и длительностью измерений.

Особенностью предлагаемого в диссертации комплекса геоэкологических изысканий является то, что геологические, гидрогеологические, геофизические исследования, проводились непосредственно в скважинах, пробуренных как в чаше хвостохранилищ, так и в бортах, а также в приконтурных зонах. Это обеспечивает необходимую полноту и достоверность полученных результатов.

Комплекс включает в себя:

- геологические работы, включающие буровые работы, документацию керна;
- геофизические исследования (вертикальное электрическое зондирование, скважинная геофизика), проведение гамма и термокаротажа;
- гидрогеологические исследования – определение динамических и статистических уровней воды, определение коэффициентов фильтрации.

При бурении скважин, глубины которых определяются их местом расположения, предусматривается поинтервальное проведение гидрогеологических опытов и отбор проб грунта на лабораторные работы. Геологические исследования включают в себя документацию керна, который проходит послойное описание с точным указанием глубины, при этом фиксируются провалы инструмента, потеря жидкости и другие отклонения, что косвенным образом указывает на монолитность или пористость грунта.

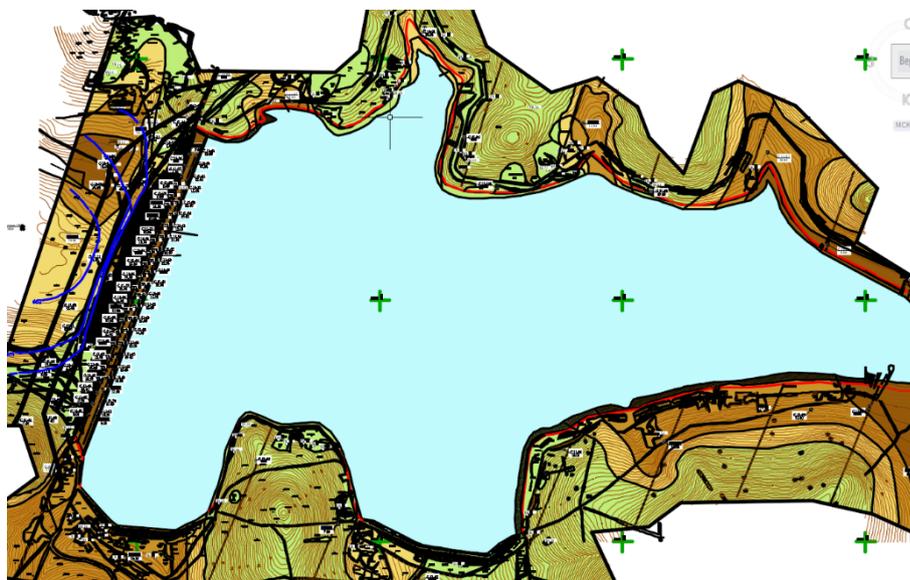


Рис. 8 – План-схема хвостохранилища «Верхнее» с местами отбора проб, положения скважин и полевыми опытными работами

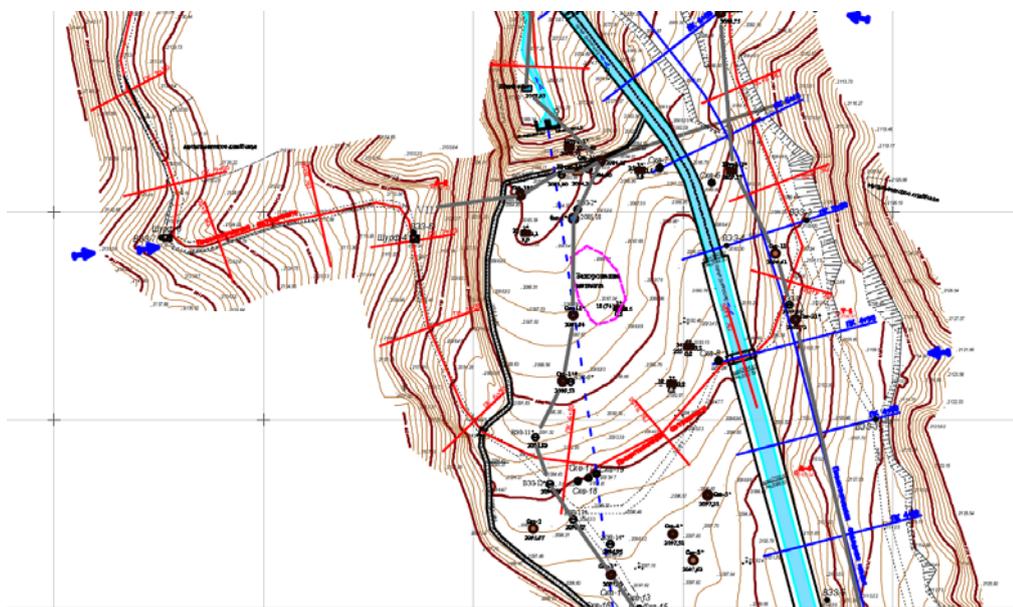


Рис. 9 – План-схема хвостохранилища «Туюк-Суу» с местами отбора проб, положения скважин и полевыми опытными работами

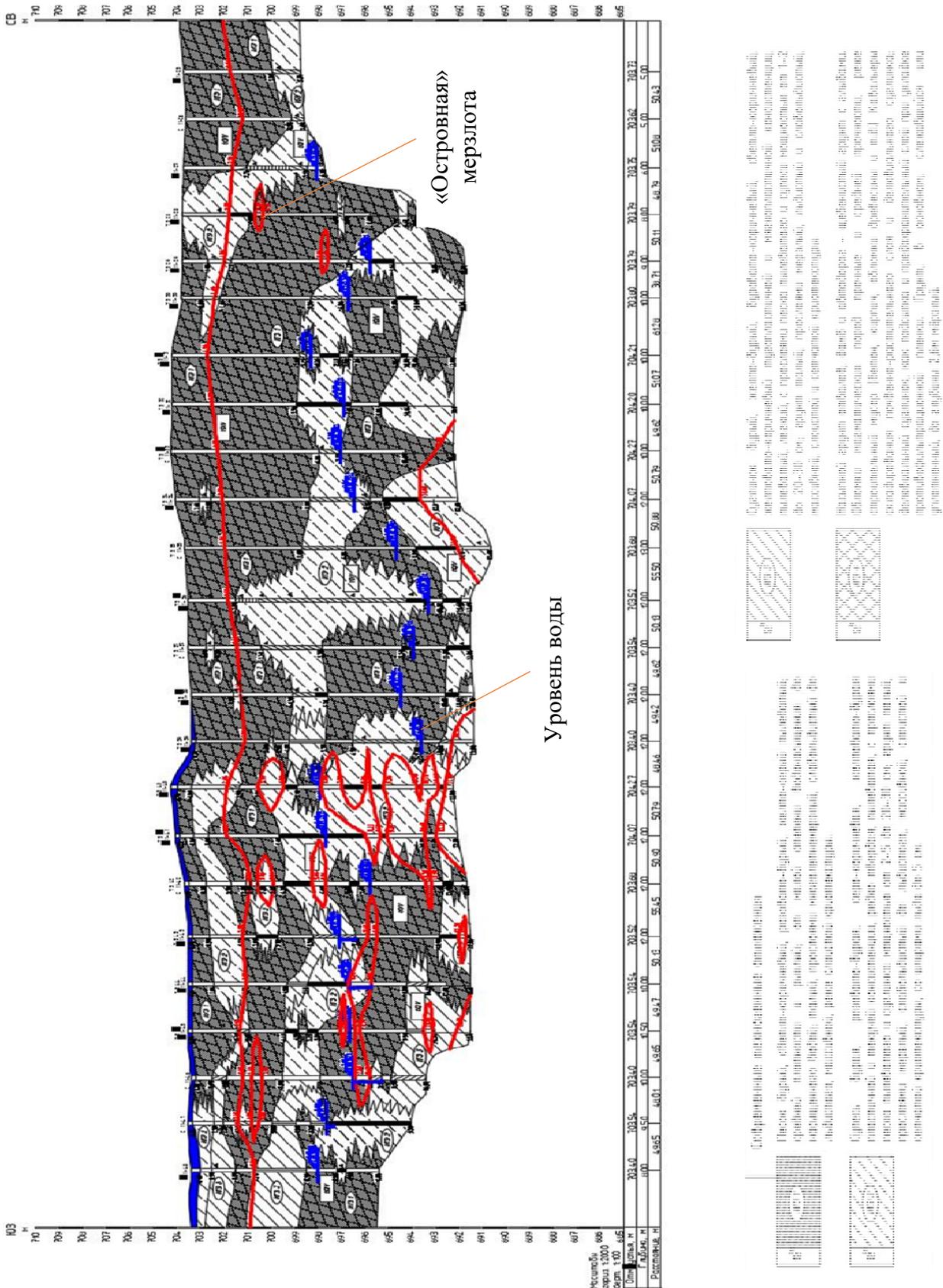


Рис. 9 – Инженерно-геологический разрез по чаше хвостохранилища «Верхнее»

Нужно иметь в виду, что применение строительной классификации с подразделением хвостов на «глинистые» или «песчаные» следует считать весьма условным из-за формы частиц хвостов, существенно отличающихся от формы глинистых или песчаных грунтов естественного происхождения. Кроме того, фракции хвостов крупностью менее 0,005 мм не всегда представлены типично глинистыми материалами, а могут являться результатом механического дробления в виде обломков рудного материала различной формы и отличаются

острогранностью и высокой степенью шероховатости. По обобщенному показателю морфологии, равному 0,296, хвосты классифицируются как необработанный материал.

После выполнения геофизических работ при обнаружении изменения влажностных характеристик и обнаружении аномальных сопротивлений грунта, выполняется бурение скважин, из которых будут отобраны пробы воды на химический анализ и пробы грунта для определения гранулометрического состава.

Затем по инструкции «Методы полевых испытаний грунта статическим и динамическим зондированием», которая была разработана в 2013 году с участием автора, проводятся исследования техногенных грунтов хвостохранилищ. Принципиальной особенностью этого метода (пенетрации) является возможность непрерывного погружения зонда на глубины с одновременным определением зависимости между сопротивлением грунтов зондированию и их физико-механическими свойствами.

Применение методов пенетрационных испытаний – статического и динамического зондирования – позволяет определить характер залегания грунтов различного литологического состава, положение границ между слоями, включая оценку степени однородности грунтов и степени плотности песчаных грунтов, а также физические и механические характеристики грунтов – показатель текучести, коэффициент пористости, модуль деформации, угол внутреннего трения и удельное сцепление.

Основные характеристики намывных хвостов зависят от их гранулометрического состава и глубины залегания. Материалы отложений ниже кривой депрессии и в центральной зоне хвостохранилищ в период эксплуатации характеризуются влажностью, соответствующей полному водонасыщению. Отложения поверхностного слоя в период их формирования также находятся в водонасыщенном состоянии.

Для разработки проектов изыскательских работ на рекультивируемых хвостохранилищах за минимальную плотность сухих хвостов P_d^H принимаются значения поверхностного слоя мощностью 0,10 – 0,50 м, конечную плотность отложений P_d^K с учетом гранулометрического состава по данным таблицы 2:

Таблица 2

Плотность частиц грунтов рассматриваемого объекта («Верхнее»)

№№ пп	Характеристики	Виды хвостов			
		Пески мелкие	Пески пылеватые, супеси	Супеси пылеватые	Суглинки пылеватые
1.	P_d^K г/см ³	1.49	1.29 (1.19)	1.15 (1.025)	1.04 (0.88)
2.	P_d^H ,	(1.42)			
3.	$P(P^H)$, г/см ³	1.1 (1.3)	1.2 (1.5)	0.8 (1.0)	1.0 (1.3)

где: $P(P^H)$ – нормативные значения;

P – установленные при 95% обеспеченности.

Изменение плотности от крупности характеризуется установленными по результатам проведенных на действующих и законченных эксплуатацией хвостохранилищ многочисленных определений эмпирическими формулами:

$$P_d^H = 0,4 P_{ч} \sqrt{d / d'}$$

$$P_d^K = 0,45 P_{ч} (d/d')^{0.19}$$

где: $P_{ч}$ - плотность частицы, г/см³ (пределы 2,5-2,8 г/см³);

d - средневзвешенная крупность хвостов (пределы 0,02-0,33 мм);

d' - контрольная крупность хвостов, равная 0,074 мм.

Величина коэффициента относительной пористости I_a от поверхности до зон полной стабилизации значений плотности составляет 0,20-0,47 - для песков мелких и 0,11-0,31 – для

песков пылеватых, что свидетельствует о рыхлом сложении материала.

Статистическая обработка результатов динамического зондирования и соответствующих им показателей позволили выявить наличие прямой и тесной связи между результатами зондирования и характеристиками хвостов:

$$\gamma_c = 970 + 40P_d$$

$$\operatorname{tg}\varphi = 0,25 + 0,04P_d,$$

где: γ_c - плотность сухих «хвостов»;

$\operatorname{tg}\varphi$ - тангенс угла внутреннего трения;

P_d - условное динамическое сопротивление, кгс/см².

Геофизические исследования

Геофизический комплекс включал в себя вертикальное электрическое зондирование и проведение гамма-термокаротажа с целью выявления возможного выхода загрязнения через нарушенную конструкцию хвостохранилища, определение возможных границ утечек.

При гамма-каротаже скважин оценивается глубина и мощность загрязненных пластов. Гамма-каротаж проводится при подъеме блока со скоростью, не превышающей 2м/м, время замера на точке – не менее 10 с, количество замеров – не менее трех, расстояние между точками замера в нормальном поле – 0,25м.

Если встречается диапазон с повышенной активностью необходимо проводить детальный каротаж с точной регистрацией через 0,1-0,15м. Результаты гамма-каротажа представляются в виде графиков: по оси абсцисс – глубина скважины в масштабе 1:100 или 1:50, по оси ординат – значение мощности дозы в соответствующих единицах в удобном масштабе, рядом с осью ординат строится литологический разрез.

Целью исследования температурного режима в наблюдательных скважинах, расположенных в теле хвостохранилищ и в массиве вмещающих пород, является распределение температур по глубине в течение определенного интервала времени. По данным термокаротажа строятся графики распределения температур по глубине скважины. На основе анализа этих данных определяется глубина промерзания среды.

В качестве нового метода для изучения прямого определения содержания урана в хвостохранилищах предложен каротаж нейтронов деления. Данный метод выполняется по двухзондовой методике с использованием каротажного комплекса.

Из приведенной выше характеристики аппаратного комплекса следует, что он позволяет проводить одновременную регистрацию сигналов мгновенных нейтроном деления и гамма-излучения.

Каротаж скважин необходимо проводить в режиме непрерывной записи с одновременной регистрацией плотности потока нейтронов и мощности дозы гамма-излучения. Скорость подъема скважинного прибора должна быть не более 30 км/час. В этом режиме аппаратурой реализуется вывод информации с шагом квантования 10-20см. Через каждые 20-30 мин необходимо делать 15 минутные технические перерывы, обусловленные работой аппаратуры.

Данный метод позволяет провести расчет остаточного содержания урана, если выявляется повышенное содержание, то необходимо отработать хвостохранилище повторно с целью извлечения полезных компонентов. Технология обогащения должна обеспечивать наиболее полную индивидуализацию по составу, что обеспечит наиболее эффективный процесс обогащения.

Гидрогеологические исследования

Гидрогеологические исследования включают в себя:

- проведение пробных одиночных наливов воды в скважины или откачки из скважин;
- определение статических и динамических уровней воды;
- отбор проб воды для проведения химического и радиометрического анализов;
- определение коэффициента фильтрации.

Таким образом, выявление особенностей хвостохранилищ как техногенных месторождений и геоэкологическая оценка состояния хвостохранилищ как чаши, так и

бортовой зоны, а также массива вмещающих пород должна проводиться на основе результатов проведения комплекса геофизических, геологических, гидрогеологических исследований.

Конечной целью проведенных изысканий и исследований является снижение радиоактивного загрязнения от уранодобывающих предприятий до уровня, обеспечивающего максимальную защиту населения и восстановления элементов геосистемы таких как вода и почва до существующих нормативов.

5. Результаты проведения комплекса геофизических, геологических, гидрогеологических исследований ложатся в основу разработки проектов **рекультивации хвостохранилищ.**

Существует несколько вариантов рекультивации территорий предприятий уранового «комплекса», закончивших эксплуатацию. На их выбор влияет экономические возможности страны. В случае недостатка финансирования принимается минимальный уровень приемлемой безопасности на определенный период.

В руководстве МАГАТЭ сформулированы категории состояния территорий после проведения рекультивационных мероприятий:

1. *Возможно неограниченное использование территории.* Данный процесс должен включать в себя мероприятия по изъятию загрязнения с территории, достаточные для ведения новой деятельности.

2. *Возможно использование территории с ограничениями и с необходимостью проведения контроля.* Все обоснованные меры не обеспечивают достаточную безопасность населению. Не предусматривается непосредственное изъятие загрязнения, и требуется введение специальных ограничений.

3. *Территория остается зоной ограниченного доступа.* В случае серьезного загрязнения территории требуется обеспечение ограниченного доступа на территорию.

Также можно применять подходы к приведению территорий бывшего уранового производства в экологически безопасное состояние (концепция «зеленой» и «коричневой» лужайки). В идеальном случае – ещё при проектировании уранового предприятия необходимо делать расчет жизнедеятельности производства на всех этапах – от строительства до рекультивации – учитывая, что территория должна быть переведена в состояние, пригодное для последующего неограниченного использования (без необходимости регулирующего контроля).

После мероприятий по рекультивации хвостохранилищ необходимо предусматривать долговременное наблюдение и обслуживание объектов, которое должно учитывать: влияние эрозии почвы; функционирование дренажа и фильтрационных коллекторов; изменение качества фильтрационных вод и потоков, и сбросов из дрен; периодическую проверку работы сооружений очистки вод; контроль состояния инженерных сооружений (каналов, насыпей, дрен, растительного покрова и состоянием установок); радиационный контроль.

Рассматривая принципы и критерии безопасности при захоронении радиоактивных отходов, следует отметить, что основной целью деятельности в области обращения с радиоактивными отходами является надежное социально эффективное обеспечение радиационной безопасности живущего сейчас населения и будущего поколения от опасного радиационного воздействия, а также защита среды обитания человека от загрязнений на весь срок существования опасности и при экстремальных чрезвычайных ситуациях.

Заключение

По результатам выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Впервые для минерально-сырьевого кластера ядерной отрасли разработана геотехнология опережающих геоэкологических изысканий на большеобъемных хвостохранилищах переработки радиоактивных руд для обеспечения долговременной радиэкологической безопасности от окружающей среды.
2. Доказано различие физико-механических и химических свойств энергетической золы ТЭК и золы, образующейся при переработки радиоактивного минерального сырья уран-угольных месторождений, что требует оценки наличия в золе

попутных компонентов и негативного воздействия радиоактивной золы на окружающую среду.

3. Разработан научно-обоснованный прогноз режима интенсивности влажности техногенных грунтов хвостохранилищ уранового производства на основе авторских методических положений инженерно-геологических и геоэкологических изысканий

Основные результаты диссертации

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основе теоретических и экспериментальных исследований представлено научно-методическое обоснование проведения геоэкологических изысканий для принятия технических решений при эксплуатации и рекультивации хвостохранилищ, внедрение в практику которых внесет значительный вклад в повышение экологической безопасности урановых объектов, экономическое развитие и обороноспособность страны.

Впервые для отечественного минерально-сырьевого кластера ядерной отрасли разработан комплекс проведения геоэкологических изысканий на хвостохранилищах переработки радиоактивных руд.

Доказано различие природных грунтов от техногенных минеральных образований и выявлены закономерности, характеризующие схожесть техногенных грунтов хвостохранилищ с барханными песками зоны аэрации.

Доказано различие физико-механических и химических свойств энергетической золы топливно-энергетического производства и золы, образующейся при глубокой переработке радиоактивного минерального сырья.

Представлены результаты и авторская методика изучения влажностного режима в теле хвостохранилищ (линз с водой, водонасыщенных зон и «островной» мерзлоты») на длительный постэксплуатационный период времени территорий «уранового наследия».

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Дунаева Е.В., Карамушка В.П., Сизова А.О., Иванов В.Г. Совершенствование технологии проведения инженерных изысканий на хвостохранилищах переработки урановых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень, № 5, Москва. 2014. С. 370-376.
2. Бунин Ж.В., Качур Л.Н., Сизова А.О., Карамушка В.П., Дунаева Е.В., Самородова Т.С. Исследование экологической обстановки в предпроектный период освоения уранового месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень, № 5, Москва. 2014. С. 392-406.
3. Карамушка В.П., Камнев Е.Н., Дунаева Е.В. Экономическая оценка ущерба от радиационно-загрязненных отходов горных предприятий // Вестник Российской Академии Естественных Наук, Москва. 2017/2, том 17, С. 35-39.
4. Карамушка В.П., Камнев Е.Н., Дунаева Е.В., Титаренко В.С. Опыт перепрофилирования и рекультивации объектов добычи и обогащения урановых руд на примере Бештаугорского и Быкогорского месторождений // Горный журнал № 8. 2021. Москва. С. 67-71.

Другие публикации

1. Карамушка В.П., Дунаева Е.В., Камнев Е.Н. Методическое обеспечение экономической оценки экологического ущерба от воздействия, загрязненных природными радионуклидами, отходов горных производств и обоснование экономической эффективности планируемых рекультивационных работ // сборник докладов Проблемы рационального использования отходов в горно-металлургической отрасли. Москва, 2015 г.
2. Карамушка В.П., Камнев Е.Н., Дунаева Е.В. Разработка атласа природных сорбционных свойств пород на территории России для объектов скважинного подземного выщелачивания урана Москва // сборник докладов Научно-практической конференции с международным участием «Геотехнологические методы освоения месторождений твердых

полезных ископаемых», ФГУП «ВИМС». 2015. ISBN 978-5-9908343-0-9

3. Карамушка В.П., Камнев Е.Н., **Дунаева Е.В.** Экономическая оценка ущерба от радиационно-загрязненных отходов горных предприятий // сборник докладов Международной научно-технической конференции «Философия обращения с радиоактивными отходами: плюсы и минусы существующих и новых технологий». Москва 23-24 марта 2016 г. С. 39-46. ISBN 978-5-9908229-1-7.

4. **Дунаева Е.В.**, Карамушка В.П. Анализ и прогнозирование гидрогеологического режима в техногенных грунтах (хвостохранилищах) уранового «наследия», расположенных в аридной зоне // сборник докладов Международной научно-технической конференции «Проблемы и решения в экологии горного дела». Москва. 28-29 марта 2017г. с 172-180. ISBN 978-5-9908229-2-4.

5. **Дунаева Е.В.**, Карамушка В.П., Титаренко В.С. Опыт снятия с эксплуатации объектов добычи и переработки урановых руд и рекультивация нарушенных земель // сборник докладов Пятого международного симпозиума. «Уран: геология, ресурсы, производство». Москва, 23-24 ноября 2021 г., ISBN: 978-5-901837-92-4