

На правах рукописи



Субботин Сергей Борисович

**ВЛИЯНИЕ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД
НА РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКУЮ ОБСТАНОВКУ БЫВШЕГО
СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА**

Специальность: 25.00.36- геозкология

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в Филиале «Институт радиационной безопасности и экологии»
Республиканского Государственного предприятия «Национальный ядерный центр
Республики Казахстан»

Научный руководитель:

доктор химических наук
Дубасов Юрий Васильевич

Официальные оппоненты:

Вакуловский Сергей Мстиславович
доктор технических наук, профессор,
Государственное учреждение «Научно-
производственное объединение «Тайфун»
Институт проблем мониторинга
окружающей среды, главный научный
сотрудник

Голубов Борис Николаевич
кандидат геолого-минералогических
наук, Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки Институт
динамики геосфер Российской академии
наук, старший научный сотрудник

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Ордена Ленина и
Ордена Октябрьской Революции
Институт геохимии и аналитической
химии им. В.И. Вернадского Российской
академии наук (ГЕОХИ РАН)

Защита состоится «22» апреля 2015 г. в 15-30 ч. на заседании
диссертационного совета Д 002.048.01 при Федеральном государственном
бюджетном учреждении науки Институте геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ
РАН) по адресу: 109004, Москва, ул. Николаямская, д. 51.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального
государственного бюджетного учреждения науки Институте геоэкологии им. Е.М.
Сергеева РАН по адресу: 101000, Москва, Уланский пер., д. 13, стр. 2.

Автореферат разослан « » _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



кандидат геолого-минералогических наук
Батрак Глеб Игоревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Миграция радиоактивных продуктов подземных ядерных взрывов (ПЯВ) с подземными водами за пределы испытательных площадок является одним из ключевых вопросов радиационной безопасности территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона (СИП). Характер радиоактивного загрязнения подземных вод и условия дальнейшей миграции техногенных радионуклидов с подземными потоками обуславливаются особенностями геологического строения и гидрогеологическими условиями площадок. После прекращения ядерных испытаний на СИП подразделениями НЯЦ РК в разные годы проводились полевые и лабораторные исследования по изучению гидрогеологических условий и характера радиоактивного загрязнения подземных вод на испытательных площадках. Одной из основных задач исследований являлось определение возможных путей миграции загрязненных техногенными радионуклидами подземных вод за границы площадок.

Для решения проблемы максимального уменьшения воздействия техногенного влияния на окружающую среду СИП и прилегающих территорий требуется разработка и реализация целого комплекса мероприятий. Важное место здесь занимает мониторинг подземных вод, представляющий централизованную систему наблюдений за состоянием подземных вод, оценке и регулярном прогнозировании возможных изменений количественного и качественного состояния подземной гидросферы. Для правильной организации такой системы необходимо установление общих закономерностей формирования и распространения ореолов радиоактивного загрязнения в пределах технических площадок и за их границами.

Проблема возможного поступления загрязненных подземных вод за границы испытательных площадок СИП приобрела особую актуальность в настоящее время при проведении комплексных исследований с целью передачи части территорий СИП в хозяйственный оборот. Для достоверной оценки безопасности передаваемых территорий необходимо предусмотреть выполнение прогнозных оценок миграции радионуклидов за пределы участков проведения ПЯВ.

Цель исследования: Провести оценку воздействия подземных ядерных взрывов на процесс развития радиоэкологической обстановки СИП в связи с миграцией оставшихся радионуклидов с подземными водами.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Анализ современного состояния подземной гидросферы на испытательных площадках бывшего СИП «Дегелен» и «Балапан», в связи с проведенными ПЯВ на этих площадках.

2. Провести экспериментальные исследования распространения радионуклидов ^3H , ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ и их динамики в подземных водах на испытательных площадках «Дегелен» и «Балапан».

3. Оценить значение природных и искусственных сорбционных систем для процессов миграции техногенных радионуклидов с подземными водами площадок «Дегелен» и «Балапан».

4. Оценить влияние миграции техногенных радионуклидов с подземными водами за пределы испытательных площадок на формирование радиоэкологической обстановки СИП.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты последствий воздействия ПЯВ на состояние подземных вод на территории СИП.

2. Разработанные схемы и результаты подсчета запасов ^{137}Cs и ^{90}Sr , адсорбированных грунтами из подземных вод на площадках «Дегелен» и «Балапан».

3. Результаты прогнозной оценки возможного развития радиэкологической обстановки на территории СИП, связанного с миграцией техногенных радионуклидов с подземными водами.

Объекты и материалы исследований. *Объектами* исследования являются горные породы и подземные воды основных испытательных площадок СИП – «Дегелен» и «Балапан». *Материалами* для настоящих исследований служили подземные трещинные воды регионального бассейна, а также штольневые и родниковые воды. Пробы подземных вод отбирались из гидрогеологических скважин. Штольневые и родниковые воды отбирались в точках выхода воды на дневную поверхность.

Научная новизна работы. Для основных технических площадок СИП, где проводились подземные ядерные взрывы, изучен характер миграции техногенных радионуклидов с подземными водами с использованием смежных областей знаний физических, математических, химических и геологических наук, позволивший решить некоторые комплексные задачи по оценке дальнейшего развития радиэкологической обстановки на СИП, связанной с радиоактивным загрязнением подземных вод.

Практическая значимость.

1. Результаты прогнозной оценки распространения радиоактивных загрязнений в блоках пород, вмещающих центральные зоны ПЯВ, позволяют провести более верный выбор точек долгосрочного мониторинга.

2. Результаты диссертации могут быть также использованы при ликвидации последствий в регионах, пострадавших от испытаний ядерного оружия, воздействия предприятий атомной промышленности и ядерно-энергетических комплексов.

3. Для научных организаций, занимающихся обращением с радиоактивными отходами, есть возможность использовать результаты исследований, проведенных в естественных условиях, при изучении миграции техногенных радионуклидов с подземными водами

Достоверность результатов. Достоверность полученных результатов основывается на достаточном объеме материала с применением современного оборудования и измерительной базы, имеющейся в подразделениях НЯЦ РК. За время исследований отобрано и проанализировано более 300 проб на площадке «Балапан» и более 250 проб подземных вод на площадке «Дегелен».

Личный вклад диссертанта в работу. Соискатель принимал непосредственное участие в выполнении полевых работ по отбору проб подземных вод, в подготовке проб к спектрометрическим и радиохимическим анализам, в проведении измерений содержания радионуклидов в исследуемых образцах, обработке и интерпретации результатов анализа. Автором сформулированы основные положения и выводы. Автор диссертации являлся руководителем международного проекта МНТЦ К-893 «Организация системы мониторинга подземных вод на территории бывшего СИП».

Апробация и реализация результатов диссертации. Основные положения и результаты исследований докладывались и обсуждались на семинаре «Радионуклидное загрязнение водных ресурсов» (Алматы, 2001); V международной конференции «Ядерная и радиационная физика» (Алматы, 2005); семинаре НАТО «Радиологические риски в Центральной Азии» (Алматы, 2006); VI международной конференции «Ядерная и радиационная физика» (Алматы, 2007); IV международной научно-практической конференции «Экология. Радиация. Здоровье» (Семипалатинск, 2007); III международной конференции «Радиационное наследие и проблемы нераспространения» (Курчатов, 2008); VII международной конференции «Ядерная и радиационная физика» (Алматы, 2009); Всероссийская научная конференция с международным участием «Проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и геоэкологии» (Томск, 2010); VIII международной конференции «Ядерная и радиационная физика» (Алматы, 2011).

Публикации. По теме диссертации лично и в соавторстве было опубликовано 3 статьи в рецензируемых журналах из перечня, рекомендованного ВАК Минобрнауки РФ, 2 статьи в иностранных журналах, 3 статьи в журналах и 10 статей в сборниках конференций.

Структура и состав работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и выводов, изложенных на 161 страницах, иллюстрированных 60 рисунками и 20 таблицами. Список литературы содержит 81 наименование, из них 36 иностранных источников.

Работа выполнена в рамках программы исследований Института радиационной безопасности и экологии НЯЦ РК и является итогом многолетней (с 1979 г) работы автора.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, ставятся цель и задачи, обсуждается их научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

В **первой главе** дается обзор литературы, который включает анализ результатов исследований миграции радионуклидов в водной среде и сорбционных свойств горных пород, а также обзор публикаций по Семипалатинскому полигону.

В публикациях по СИП часто даются необоснованные прогнозы масштабного загрязнения подземных вод с угрозой опасности для прилегающих территорий. В связи с этим, одной из основных задач данной работы является обоснованная оценка современной радиоэкологической обстановки на территории СИП на основе данных лабораторных исследований, прогнозных расчетов и долгосрочных наблюдений за состоянием подземных вод.

Во **второй главе** приводится описание методик отбора и подготовки проб подземных вод и анализа. Рассмотрены особенности геологического строения и гидрогеологических условий, факторы и механизмы формирования радиационной обстановки объектов исследований – площадок «Дегелен» и «Балапан».

Третья глава посвящена анализу современного состояния подземных вод как на территории площадок, так и за пределами их границ. Многочисленные данные лабораторных исследований радионуклидного состояния подземных вод позволили выявить особенности пространственного распространения и характера изменения содержания ^3H , ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ в подземных водах на испытательных площадках «Дегелен» и «Балапан».

Площадка «Дегелен»

Площадка «Дегелен» является одной из основных испытательных площадок СИП, где проводились ПЯВ мощностью до 150 кт в горизонтальных горных выработках – штольнях. Всего за период с 1961 по 1989 гг в горном массиве была пройдена 181 штольня, где было испытано 295 ядерных устройств.

Горный массив Дегелен представляет из себя вулcano-плутоническую структуру с радиусом около 10 км, центральная часть которой прорвана верхне-пермским гранитным массивом. В горах Дегелен берут начало поверхностные водные системы, имеющие сток в различных направлениях. В периоды выпадения атмосферных осадков и весеннего снеготаяния часть воды транспортируется поверхностным водотоком за пределы горного массива, а часть просачивается по системам открытых трещин. Уровень подземных вод находится на глубинах до 12 м.

В результате ПЯВ в геологической среде формируется ряд зон необратимых деформаций, различающихся по степени разрушенности горных пород: полость, зоны смятия, дробления, наведенной трещиноватости, откола и столб обрушения (рис. 1).

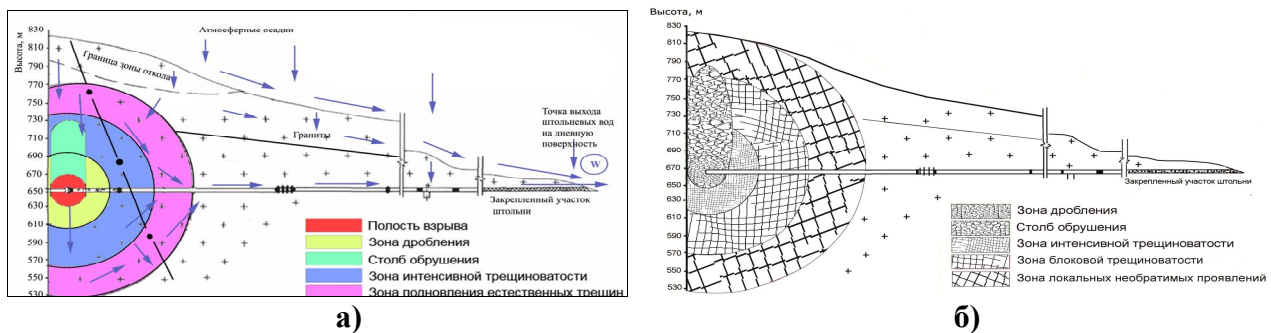


Рис.1. Схема зон необратимых деформаций

В зонах необратимых деформаций образуются две основные зоны локализации радионуклидов. Первая – это радиоактивная стекло-шлакообразная порода, содержащая до 80 % всех продуктов деления и весь плутоний. Основная масса расплавленной породы остается в пределах полости взрыва. Второй источник – это радиоактивная аэрозольно-пылевая компонента, локализованная на поверхностях дробленой породы и на плоскостях петрогенетических и техногенных трещин. Такое распределение обусловлено тем, что ^{90}Sr и ^{137}Cs являются дочерними продуктами радиоактивного распада газообразных предшественников криптона-90 и ксенона-137, которые при ПЯВ по трещинам способны распространяться на значительное расстояние.

В результате поступления атмосферных осадков в зоны необратимых деформаций, происходит переход радионуклидов в грунтовые штольневые воды. Перемещаясь по системам трещин и полости штольни, загрязнённые радионуклидами воды пополняют бассейн подземных вод или выходят на дневную поверхность в районе порталов штолен.

Весь фронт подземных вод, выходящих за пределы гор Дегелен, распределяется на отдельные потоки в соответствии с их принадлежностью к локальным водосборным бассейнам, где питание, транзит и разгрузка происходят в пределах бассейнов, имеющих протяженность до 20 км (рис 2а). Поэтому миграция радионуклидов с подземными водами за пределы площадки «Дегелен» ограничена максимальным расстоянием 20 км.

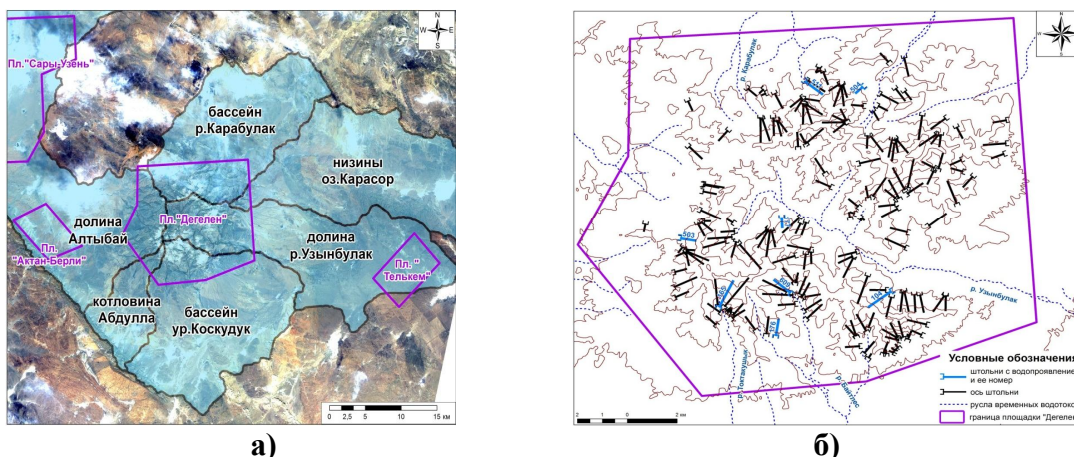


Рис.2. Горный массив Дегелен: а) схема расположения локальных водосборных бассейнов; б) схема расположения штолен

После закрытия всех водоносных штолен вода продолжала выходить на дневную поверхность в районе порталов 8 штолен (рис. 2б). Установлено, что дебит штольневых потоков зависит от количества выпадающих атмосферных осадков. На рисунке можно четко проследить расхождение во времени пиков максимального количества выпавших осадков и максимального суммарного дебита воды, поступающего из штолен. Пик дебита водотоков отстоит от пика интенсивности атмосферных осадков почти на 2 месяца. Этот период можно принять за время инфильтрации атмосферных осадков через трещинную систему в горах Дегелен (рис. 3а).

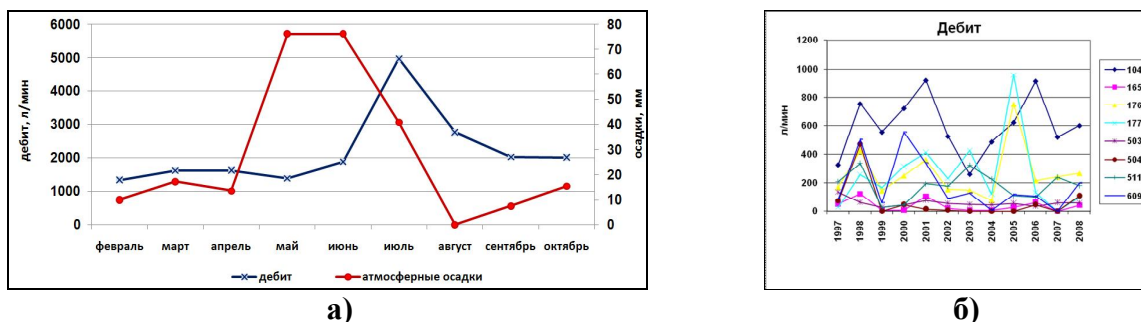


Рис. 3. Площадка Дегелен: а) пики дебита и атмосферных осадков; б) дебит водотоков из штолен

На рисунке (рис.3б) видно, что для большинства штольневых водотоков наблюдался переменный характер истечения. Суммарный расход достигал 5 000 л/мин.

Результаты многолетнего мониторинга штольневых вод показали, что удельная активность радионуклидов в каждом потоке длительное время остается относительно стабильной. Она варьирует в небольших пределах при различных количествах дебита потоков (рис.4).

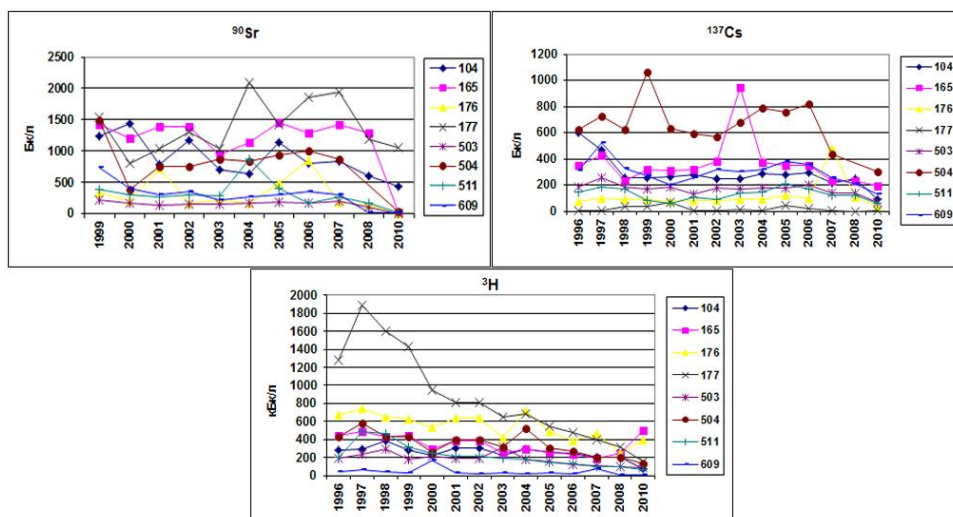


Рис. 4. Площадка «Дегелен». Мониторинг штольневых вод

Наибольшая удельная активность ^3H сохраняется в течение всего периода наблюдений (начиная с 1996 г.) в штольне № 177, и максимальная концентрация отмечена в 1997 г – 1900 кБк/кг. Аналогичная картина наблюдается и для ^{137}Cs , наибольшая удельная активность которого наблюдалась в штольне № 504 в 1999 г – 1100 Бк/кг. Максимальная концентрация ^{90}Sr (2100 Бк/кг) была зафиксирована в воде из штольни № 177 в 2004 г (рис. 4).

Более наглядно динамику выноса радионуклидов со штольневыми водами можно увидеть на данных квартального и годового выноса. На рисунке 5 прослеживаются сезонные колебания, максимумы которых приходятся на вторые кварталы каждого года, а минимальные значения – на первые и четвертые.

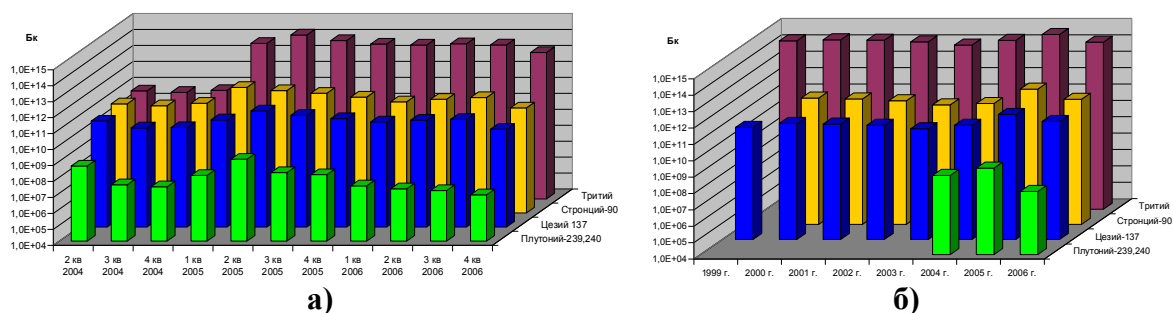


Рис. 5. Результаты: а) квартального; б) годового мониторинга штольневых вод

При сравнении квартальных и годовых данных можно отметить, что годовые колебания выноса гораздо меньше квартальных – из года в год вынос радионуклидов остается стабильным. Каждый год выносятся в среднем $6 \cdot 10^{11}$ Бк – ^{137}Cs ; $5 \cdot 10^{11}$ Бк – ^{90}Sr и $2 \cdot 10^{11}$ кБк – ^3H . Анализ данных показывает, что колебания выноса по годам определяются климатическим фактором – в годы с большим количеством осадков вынос радионуклидов также возрастает.

Распространение техногенных радионуклидов с потоками подземных вод, выходящими за пределы горного массива Дегелен, имеет неоднозначный характер (рис.6).

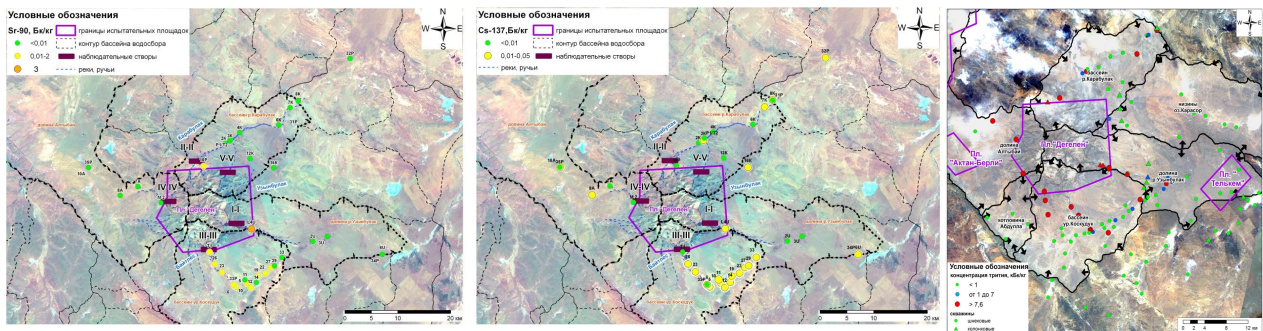


Рис. 6. Миграция радионуклидов за границы гор Дегелен

За границами горного массива Дегелен уровни концентрации техногенных радионуклидов (кроме ^3H) снижаются до уровней минимально-детектируемой концентрации (МДК). Концентрация ^3H в воде при выходе за пределы массива Дегелен достигает 300 кБк/кг. При удалении от гор на 10 км - снижается до 30 кБк/кг. При удалении от гор на 15-20 км концентрация трития на основных направлениях не превышает 1,0 кБк/кг, что в 7,7 раза ниже уровня вмешательства (УВ) при поступлении с водой и пищей, установленного Гигиеническими нормативами «Санитарно-эпидемиологические требования к обеспечению радиационной безопасности» (ГН СЭТОРБ).

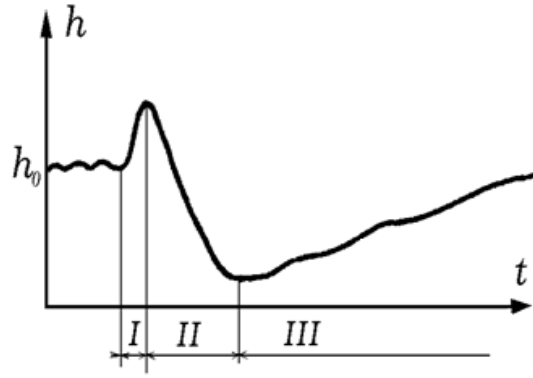
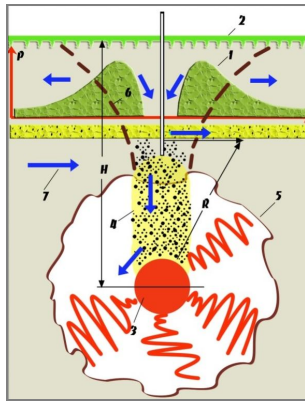
Площадка «Балапан»

На испытательной площадке «Балапан», расположенной в восточной части СИП, в период с 1965 по 1989 гг было проведено 106 ПЯВ мощностью до 165 кт в вертикальных скважинах.

Площадка «Балапан» представляет собой котловину диаметром около 20 км, обрамленную мелкосопочником. На значительной части территории подземные воды имеют напорный характер с величиной напора до 73 метров (рис.7б). Движение подземных вод осуществляется при достаточно малых величинах гидравлического уклона и низких скоростях фильтрации. На большей части территории площадки расходы потоков подземных вод близки к своим средним и достаточно низким значениям – менее 1 м³/сут. Максимальные величины расходов – до 2 м³/сут – наблюдаются в южной части площадки, где локализуется область питания подземных вод. Региональный фильтрационный поток направлен от области питания к области разгрузки, представленной долиной р. Иртыш.

В отличие от ПЯВ в горизонтальных штольнях, образовавшиеся полости после ядерных взрывов в скважинах расположены значительно ниже уровня подземных вод. Повышенные температуры в полости могут сохраняться долго в связи с наличием толщи перекрывающих пород. Наличие высоких температур способствует образованию тепловой конвекции. Достигнув полости, вода разогревается, растворяет химические элементы и радионуклиды и может медленно возвращаться вместе с ними в верхние горизонты.

Основные особенности гидродинамических процессов, вызываемых подземным взрывом, прослеживаются при следующей схематизации явления (рис.7).



- 1 – распределение давления подземных вод при формировании столба обрушения;
 2 – дневная поверхность; 3 – камуфлетная полость, 4 – столб обрушения,
 5 – зона наведенной трещиноватости, 6 – область приповерхностного разуплотнения;
 7 – направление движения подземных вод

Рис. 7. Гидродинамические эффекты в блоках горных пород при проведении ПЯВ

Соответствующие взрыву волновые процессы вызывают деформацию окружающей среды, причем состояние пласта-коллектора изменяется в большей степени в отличие от вмещающих относительно монолитных пород. Динамическое сжатие коллектора приводит к повышению давления жидкости в некоторой области, что способствует подъему уровня подземных вод.

Этот процесс сопровождается инъекцией воды в порово-трещинное пространство массива горных пород в ранее существовавшие и вновь образованные в результате взрыва трещины. Момент завершения формирования камуфлетной полости определяет продолжительность возмущения водонасыщенного пласта-коллектора. Последующее образование столба обрушения вызывает центральную депрессию в образовавшемся куполе подземных вод.

Для оценки характера радиоактивного загрязнения подземных вод на площадке «Балапан» проводилось опробование более 100 ранее пробуренных гидрогеологических скважин. На ряде участков выполнены дополнительные исследования, включающие буровые, геофизические и опытно-фильтрационные работы (рис. 8а).

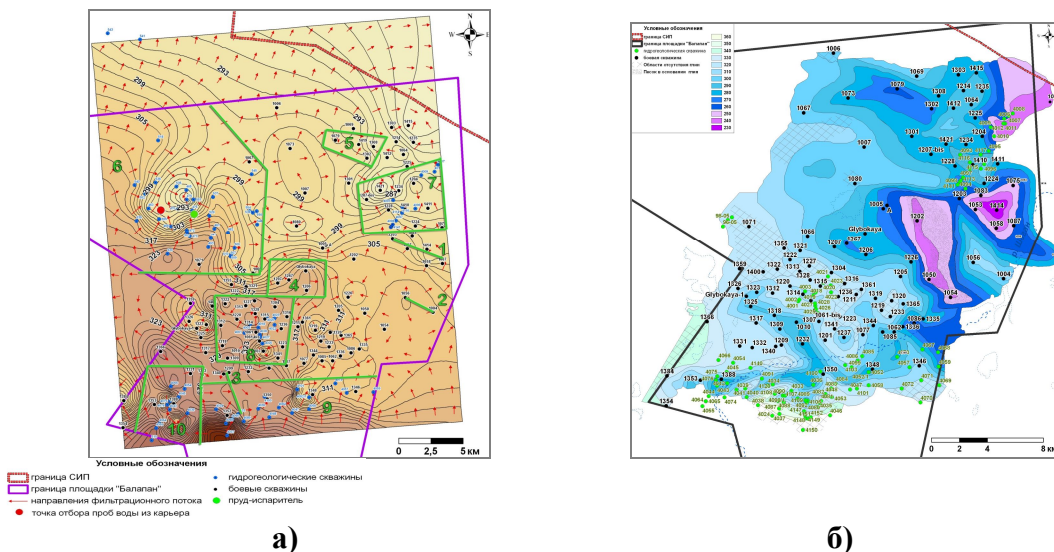


Рис. 8. Площадка «Балапан»: а) схема расположения «боевых» и наблюдательных скважин; б) карта глубин залегания кровли водовмещающих пород

Распространение техногенных радионуклидов в подземных водах имеет следующие особенности:

- ^{137}Cs . Во всех исследуемых пробах воды концентрация ^{137}Cs не превысила допустимых значений для питьевой воды. Самая большая концентрация ^{137}Cs (4 Бк/кг) была обнаружена в гидрогеологической скважине, расположенной в 50 м от “боевой” скважины 1056.

- ^{90}Sr . На большей части территории площадки значения концентрации ^{90}Sr в подземных водах не превышают 1,0 Бк/кг. Наибольшая концентрация ^{90}Sr , 1240 Бк/кг, была найдена в скважине, расположенной в 50 м от “боевой” скважины 1056. При удалении от “боевых” скважин на первые сотни метров содержание этого радионуклида снижается до уровней порядка мБк/кг.

Таким образом, ^{137}Cs и ^{90}Sr не распространился на расстояния более 50 м от боевых скважин.

- $^{239+240}\text{Pu}$. Содержание $^{239+240}\text{Pu}$ в подземных водах на исследованных участках не превышает МДУА, равной 0,002 Бк/кг.

- ^3H . Концентрация ^3H в подземных водах изменяется в широком диапазоне значений от минимально-детектируемой концентрации до 4800 кБк/кг.

Из вышесказанного следует **первое защищаемое положение:** *«Результаты последствий воздействия ПЯВ на состояние подземных вод на территории СИП»*. Установлено, что в результате проведенных ПЯВ радиоактивное загрязнение подземных вод долгоживущими техногенными радионуклидами ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и тритием продолжается и имеет относительно стабильный характер.

В четвертой главе приводятся результаты оценки влияния процессов выноса техногенных радионуклидов с подземными водами за пределы площадок «Дегелен» и «Балапан» на радиоэкологическую обстановку СИП.

Лабораторные исследования по изучению сорбционных свойств горных пород, распространенных на СИП

Так как подземные воды регионального бассейна перемещаются по системам петрогенетических и техногенных трещин, то для разработки модели миграции радионуклидов с подземными водами в лабораторных условиях проводилось изучение сорбции радионуклидов на плоскостях трещин вмещающих горных пород. Опыты проводились с использованием реальной грунтовой воды, вытекающей из центральной зоны одного из ПЯВ и содержащей такие радионуклиды, как ^{137}Cs и ^{90}Sr . При проведении исследований решались следующие задачи:

1. Изучение сорбционных свойств различных горных пород массива Дегелен при контакте с реальной грунтовой радиоактивной водой.
2. Оценка сорбции-десорбции радионуклидов на крупнообломочных образцах горных пород, имитирующих сорбцию на плоскостях в трещинах горных пород.

В лабораторных условиях изучались параметры типичных образцов гранита с бывшего Семипалатинского полигона, взятых из штольни 133, альбитизированного гранита (штольня 511), кварцевого порфира (штольни 110 и Е-2), обуславливающие удерживающую способность пород относительно радионуклидов.

Изучение сорбционной способности гранитов и кварцевых порфиров относительно радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr проводилось в статических условиях. Гранитная порода, слагающая горный массив Дегелен, содержит 45-55% калиевого полевого шпата, 25-30% кварца, 10% плагиоклазов, 5-7% темноцветных рудных минералов и слюд. Диорит состоит из таких минералов как плагиоклаз (андезин, олигоклаз) до 70%, роговая обманка – 20% и биотит – 10%. В эксперименте использовалась содержащая, в основном, ^{137}Cs и ^{90}Sr вода, отобранная из ручья, вытекающего из портала штольни 504 (взрыв 29 октября 1968 г, горный массив Дегелен). Химический состав воды (мг/л) следующий: $\text{Ca}^{2+} = 107 \pm 20$; $\text{Mg}^{2+} = 109 \pm 7$; $\text{Na}^+ = 49 \pm 3$, $\text{K}^+ = 57 \pm 3$ $\text{Cl}^- = 12,8 \pm 0,8$; $\text{SO}_4^{-2} = 763 \pm 60$; $\text{CO}_3^{-2} \leq 0,6$; $\text{HCO}_3^{-1} = 2,3 \pm 1,8$; $\text{pH} = 5,5$. Обломки гранита и диорита размером по 3-5 см с геометрически измеренной поверхностью $\sim 0,1 \text{ м}^2$, массой $\sim 1 \text{ кг}$ заливались водой из штольни 504, объемом 10 л, с удельной активностью ^{137}Cs 440 Бк/л, ^{90}Sr ~ 60 Бк/л. Периодически отбиралась проба воды и определялось содержание ^{137}Cs методом γ -спектрометрического анализа. Эксперимент продолжался до наступления квазиравновесия (постоянства удельной активности в растворе) в течение 5 суток.

Затем были проведены эксперименты большей продолжительности. В зависимости от концентрации ^{137}Cs и состава раствора были приготовлены три раствора: раствор 1 – вода из штольни 504 объемом 20 л, раствор 2 состоял из 10 л пробы воды штольни 504 и 10 л дистиллированной воды, раствор 3 приготовили из 5 л пробы воды штольни 504 и 15 л дистиллированной воды, соотношение Т:Ж=1:20. Эксперимент проводился в течение 70 суток до полного постоянства концентрации ^{137}Cs в растворе. Необходимо отметить, что удельная активность ^{137}Cs в ручье из штольни в течение сезона не была постоянной и во второй серии экспериментов удельная активность ^{137}Cs составляла 565 Бк/л.

Погрешность измерения ^{137}Cs при экспозиции 1 час составляла не более 10 %, содержание ^{90}Sr не определялось. Измерения проводились в соответствии с методикой выполнения измерений на гамма-спектрометре №5.06.001.98 РК.

При исследовании сорбционной способности диорита в растворах с различным составом и удельной активностью ^{137}Cs через 10-15 суток после снижения концентрации ^{137}Cs в жидкой фазе отмечалось повышение, что отражается на графиках (рис.9) для растворов 1 (реальная вода) и раствора 2 (вода из штольни +дистиллированная вода =1:1).

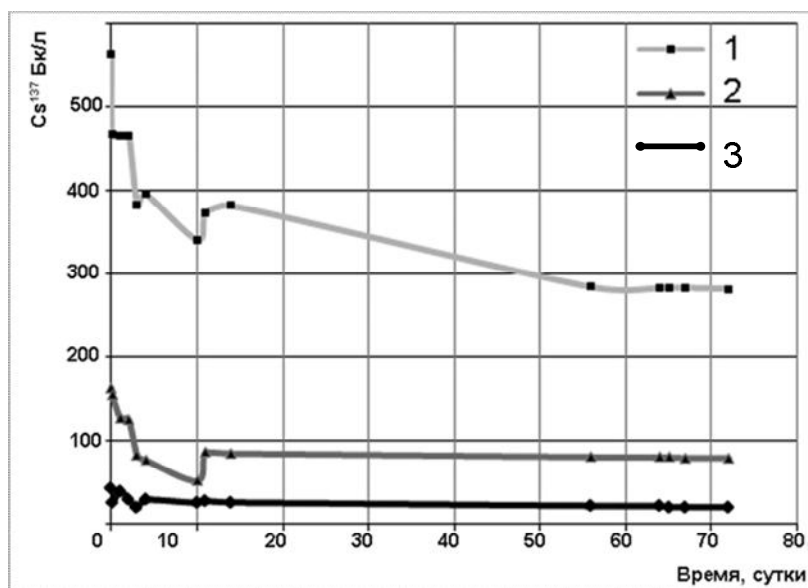


Рис. 9. Изменения концентрации ^{137}Cs в жидкой фазе в зависимости от состава и времени контакта фаз (диорит-вода из ручья штольни 504)

Вероятно, это является следствием десорбции ^{137}Cs с породы. При дальнейшем продолжении эксперимента (до 72 суток) квазиравновесие сорбция-десорбция сдвигалось в направлении сорбции и полученные данные можно считать более достоверными для расчетов накопления ^{137}Cs породой в реальных условиях.

На основании полученных данных была рассчитана сорбция ^{137}Cs на диорите из воды ручья штольни 504, составившая 65 кБк/м².

Для изучения десорбции ^{137}Cs были взяты образцы гранита и диорита, использовавшиеся в предыдущих опытах по сорбции. Они последовательно обрабатывались следующими реагентами: дистиллированной водой для определения водорастворимой формы ^{137}Cs , 1М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ (удаляет обменную форму ^{137}Cs), 1М HCl (подвижная форма ^{137}Cs), 6М HCl (фиксированная форма ^{137}Cs). Объем десорбирующих растворов - 2 л, общая активность ^{137}Cs на образцах гранита после сорбции из воды штольни 504 равнялась 3,4 кБк, а диорита 3,7кБк.

Исследования показали, что доля ^{137}Cs , сорбировавшегося на граните в виде доступной формы (водорастворимая+обменная+подвижная), составила 77,8%, фиксированной формы – 21,8%, прочно связанной формы составила 0,4%. Доля ^{137}Cs , сорбировавшегося на диорите в виде доступной формы, составила 21%, а фиксированной формы – 79%.

Сравнение полученных данных показывает, что основная доля ^{137}Cs , сорбированного диоритом, в отличие от гранита, находится в виде фиксированной формы, что обусловлено его минералогическим составом. В образцах диорита кварц практически отсутствует и присутствуют такие минералы, как роговая обманка и пироксены, имеющие слоистую (пластинчатую) структуру и близкие по сорбционным свойствам к биотиту.

Оценка возможного развития радиэкологической обстановки на территории СИП, связанного с миграцией техногенных радионуклидов с подземными водами

Площадка «Дегелен». Результаты исследований показали, что на площадке «Дегелен» по степени радиоактивного загрязнения и распространения радионуклидов выделяются два типа подземных вод. К первому типу отнесены штольневые воды с высокой концентрацией ^{137}Cs , ^{90}Sr и плутония. Ко второму типу отнесены поровые и трещинные воды. Эти воды характеризуются высокой концентрацией трития, при этом концентрация остальных радионуклидов в большинстве случаев находятся ниже значений МДК.

На площадке «Дегелен» выделены две основные геологические сорбционные системы – это скальные горные породы зон необратимых деформаций и рыхлые отложения межгорных равнин (рис. 10).

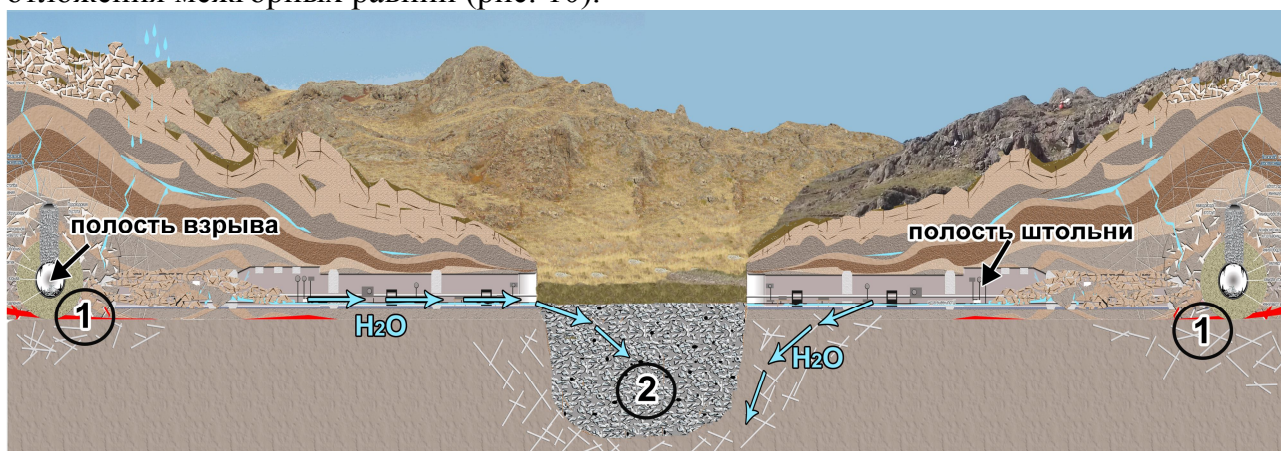


Рис. 10. Геологические сорбционные системы горного массива Дегелен: 1 - скальные горные породы; 2 – рыхлые отложения

В данном случае схематизация сорбционной системы массива скальных горных пород, вмещающих зоны необратимых деформаций, выглядит следующим образом. Существенно неоднородное деформирование реальной геологической среды не позволяет в деталях проанализировать и учесть характер распространения радионуклидов при каждом подземном ядерном взрыве. В связи с этим, для оценки сорбционной эффективности данной системы создана обобщенная модель, учитывающая наиболее общие для всех объектов закономерности. Исходя из того, что в горном массиве Дегелен ядерные взрывы проведены в штольнях, из которых 124 пройдены в гранитах и 45 в породах среднего и основного составов, сорбционные расчеты проведены с учетом различных типов пород.

Для проведения расчета были приняты следующие условия и допущения:

1. Основным источником радионуклидов являются зоны необратимых деформаций, где радионуклиды находятся в аэрозольно-пылевой форме.

2. Для расчетов рассмотрен взрыв ядерного заряда на основе ^{239}Pu мощностью 20 кт. В результате взрыва наработано радионуклидов ^{90}Sr – $0,5 \cdot 10^{14}$ Бк и ^{137}Cs – $1,3 \cdot 10^{14}$ Бк. Исходя из того, что в аэрозольно-пылевой форме может содержаться до 30 % ^{90}Sr и ^{137}Cs , то окончательно в аэрозольно-пылевой форме находится ^{90}Sr – $1,5 \cdot 10^{13}$ Бк и ^{137}Cs – $4,0 \cdot 10^{13}$ Бк.

3. Сорбционная емкость гранита по ^{137}Cs равна $3,4 \text{ кБк/м}^2$, по ^{90}Sr – $0,3 \text{ кБк/м}^2$. Сорбционная емкость диорита к ^{137}Cs – 37 кБк/м^2 , к ^{90}Sr – $3,2 \text{ кБк/м}^2$.

В результате адсорбции:

- ^{137}Cs сорбируется в фиксированной форме на граните 22 %, а на диоритах до 80 %;
- ^{90}Sr сорбируется в фиксированной форме на граните 12 %, а на диоритах до 33 %.

В сорбционную систему входят две объемно-пространственные области.

Область №1 охватывает столб обрушения и зону дробления. В границах данной зоны горные породы разрушены до уровня отдельных обломков (рис.1б). Суммарная сорбционная поверхность обрушенной горной породы определена из расчета того, что средний размер одного обломка породы равен ~40 см (средние диаметры образцов составили ~60 см для опыта Хардхэт и около 20 см для опытов Хэндкар).

В пределах *области №2* сорбционным элементом являются плоскости петрогенетических и техногенных трещин. Область включает в себя зону интенсивной трещиноватости, зону блоковой трещиноватости и зону локальных необратимых проявлений.

Из практики работ на горном массиве Дегелен известно, что количество трещин в монолитных блоках горных пород ненарушенных техногенным воздействием меняется в широком диапазоне значений от 4-6 до 20 трещин на м^2 , а в зонах влияния тектонических нарушений их количество может превышать 100 трещин на м^2 .

С учетом деформации массива ПЯВ для создания расчетной системы принимаем для зон:

- интенсивной трещиноватости – 80 трещин на м^2 (160 м^2 на 1 м^3);
- блоковой трещиноватости – 30 трещин на м^2 (60 м^2 на 1 м^3);
- локальных необратимых проявлений – 20 трещин на м^2 (40 м^2 на 1 м^3).

Для расчета объемов зон необратимых деформаций использованы формулы:

$$R_i = K_i W^{\frac{1}{3}}$$

где R_i – расстояние, м;

W – мощность взрыва, кг;

K_i – коэффициент по данным работы принят:

- зона дробления – $K=7$;
- зона интенсивной трещиноватости – $K=10$;
- зона блоковой трещиноватости – $K=26$;
- зона локальных необратимых проявлений – $K=35$

$$V_b = (\pi K - 4,2) C \frac{W}{(\rho h) l / \gamma}$$

где V_b – общий объем разрушенных пород;

C – коэффициент определяемый эмпирически;

ρ – плотность вышележащих слоев породы;

h – глубина заложения заряда;

γ – удельная теплоемкость испарившейся породы.

В таблице 1 представлены результаты расчетов значений площади сорбционной поверхности для каждой зоны и количество радионуклидов, адсорбированных в каждой зоне.

Таблица 1

Результаты расчета зон и количества адсорбированных радионуклидов в г.м. Дегелен

Наименование зоны, площадь	Активность радионуклидов, адсорбированных в гранитах		Активность радионуклидов, адсорбированных в диоритах	
	¹³⁷ Cs, Бк	⁹⁰ Sr, Бк	¹³⁷ Cs, Бк	⁹⁰ Sr, Бк
Зоны дробления и столба обрушения, $2,9 \cdot 10^6 \text{ м}^2$	$0,2 \cdot 10^{10}$	$0,01 \cdot 10^{10}$	$8,6 \cdot 10^{10}$	$0,3 \cdot 10^{10}$
Зона интенсивной трещиноватости, $1,5 \cdot 10^7 \text{ м}^2$	$1,1 \cdot 10^{10}$	$0,05 \cdot 10^{10}$	$44,4 \cdot 10^{10}$	$1,6 \cdot 10^{10}$
Зона блоковой трещиноватости, $9,7 \cdot 10^7 \text{ м}^2$	$7,2 \cdot 10^{10}$	$0,3 \cdot 10^{10}$	$287 \cdot 10^{10}$	$10,2 \cdot 10^{10}$
Зона локальных необратимых проявлений, $1,6 \cdot 10^8 \text{ м}^2$	$12,0 \cdot 10^{10}$	$0,6 \cdot 10^{10}$	$474 \cdot 10^{10}$	$16,9 \cdot 10^{10}$
Всего площадь зон: $2,7 \cdot 10^8 \text{ м}^2$	$20,5 \cdot 10^{10}$	$1,0 \cdot 10^{10}$	$814 \cdot 10^{10}$	$29,0 \cdot 10^{10}$
ВСЕГО наработано	$4,0 \cdot 10^{13}$	$1,5 \cdot 10^{13}$	$4,0 \cdot 10^{13}$	$1,5 \cdot 10^{13}$

По результатам расчетов в штольне, пройденной в граните, активность адсорбированных радионуклидов составляет для ¹³⁷Cs – $9,18 \cdot 10^{11}$ Бк, из них $20,5 \cdot 10^{10}$ Бк в фиксированной форме и по ⁹⁰Sr – $0,81 \cdot 10^{11}$ Бк, из них всего $1,0 \cdot 10^{10}$ Бк в фиксированной форме. В штольнях, пройденных в горных породах среднего и основного составов, количество адсорбированных радионуклидов для ¹³⁷Cs равно $99,9 \cdot 10^{11}$ Бк, из них $814 \cdot 10^{10}$ Бк в фиксированной форме, для ⁹⁰Sr – $8,64 \cdot 10^{11}$ Бк, из них $29,0 \cdot 10^{10}$ Бк в фиксированной форме.

Эффективность сорбционной системы становится очевидной при сопоставлении значений ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr, рассредоточенных в зонах необратимых деформаций и полученных значений адсорбированных радионуклидов в фиксированной форме.

Для прогноза выноса радионуклидов из центральных зон подземных ядерных взрывов специалистами Радиевого института имени В.Г. Хлопина проведено математическое моделирование данного процесса. В оценке характера выноса радионуклидов за пределы центральных зон учитывались оба источника: расплав горных пород и аэрозольно-пылевой источник.

Расчеты показали, что в подземных водах горного массива Дегелен, выходящих за пределы центральных зон ПЯВ, в отсутствии резких изменений будет происходить медленное уменьшение концентрации ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs и слабое увеличение в течение 100 лет концентрации ²³⁹⁺²⁴⁰Pu. Максимальная концентрация ²³⁹⁺²⁴⁰Pu, будет наблюдаться через 80 -100 лет, но она превысит настоящую всего лишь в 2 раза. Таким образом, результатами расчетов данной модели было установлено что, не смотря на то, что в расплаве содержится до 70% ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs, повышения концентрации этих радионуклидов в штольневых водах не ожидается. Стоит учитывать, что со временем активность ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs будет существенно уменьшаться, а альфа-активность плутония еще очень долго не изменится. С учетом того, что радиотоксичность плутония почти на два порядка выше, чем ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs, и период полураспада в почти в 1000 раз больше, можно думать, что в будущем вынос плутония в рыхлые отложения

межгорных долин будет являться актуальной проблемой, требующей определенного внимания.

Результаты исследований показывают, что в результате «вымывания» радионуклидов штольневыми водами происходит постепенное перераспределение радионуклидов из центральных зон ПЯВ в речные долины. Понижение концентрации радионуклидов в водных потоках подземных вод свидетельствует о наличии сорбционной системы рыхлых отложений и высокой ее эффективности.

Поступление штольневых вод в рыхлые отложения обусловлено тем, что центральные зоны ПЯВ находятся выше межгорных долин с разницей абсолютных отметок от 10 до 50 м. В данном случае основная часть потока движется через рыхлые грунты, что способствует более эффективному очищению воды от радионуклидов.

Для оценки эффективности сорбционной системы в рыхлых отложениях проведены расчеты с использованием следующих данных:

1. Объем рыхлых отложений речных долин в пределах границ горного массива Дегелен равен $3,4 \cdot 10^7$ м³ или $5,8 \cdot 10^{10}$ кг.
2. Сорбционная емкость рыхлых отложений по отношению к ¹³⁷Cs равна 5200 Бк/кг, к ⁹⁰Sr – 385 Бк/кг

В таком случае рыхлые отложения горного массива Дегелен способны адсорбировать ¹³⁷Cs $3,2 \cdot 10^{14}$ Бк и ⁹⁰Sr $2,7 \cdot 10^{13}$ Бк.

Таким образом, сопоставление данных таблицы 2 и вышеприведенного расчета показывает, что сорбционная система рыхлых отложений межгорных долин значительно эффективнее, чем система зон необратимых деформаций: по ¹³⁷Cs в $1,0 \cdot 10^5$ раз и в $1,4 \cdot 10^5$ раз по ⁹⁰Sr, чем граниты; а для диоритов в $2,0 \cdot 10^3$ раз эффективнее по ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr.

На основании проведенных расчетов, можно говорить о том, что с учетом радиоактивного распада, весь наработанный в результате взрывов ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr будут адсорбированы из штольневых вод рыхлыми отложениями речных долин в пределах границ горного массива Дегелен (рис. 11).

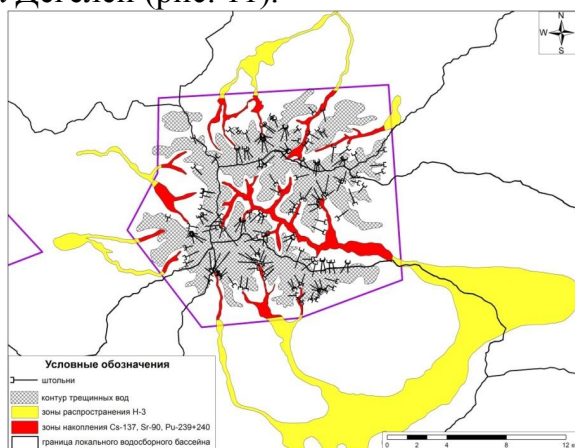


Рис. 11. Горный массив Дегелен. Распределение ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr в рыхлых отложениях

Подтверждением наличия сорбционной системы рыхлых отложений межгорных долин послужили результаты исследований, проведенные в пределах основной водной артерии горного массива Дегелен русла ручья Узынбулак (рис. 12).

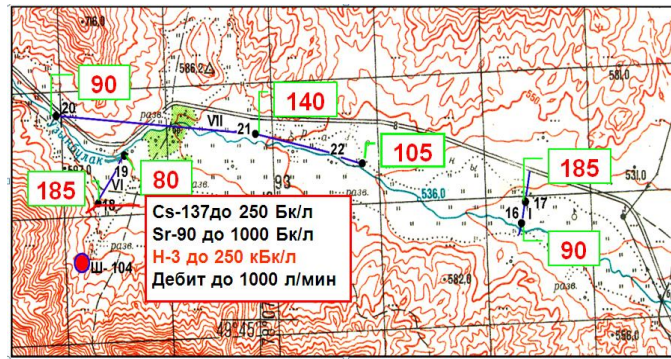


Рис. 12. Долина ручья Узынбулак

Результаты опробования буровых скважин показали, что в потоке подземных вод остался только тритий. Значения концентраций ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ в подземных водах на данном участке не превышали МДК. Подобная картина характерна, в целом, для штольневых и подземных вод, распространенных в пределах горного массива Дегелен.

Полученные данные свидетельствуют о достаточно высокой сорбционной емкости рыхлых отложений, заполняющих речные долины массива Дегелен, понижающих концентрацию стронция-90 и цезия-137 в 100 раз.

Итак, результаты оценки работоспособности сорбционных систем показали крайне низкую эффективность системы блоков горных пород в зонах необратимых деформаций. В связи с этим, будет происходить постепенное перераспределение радиоактивных продуктов из центральных зон в речные долины горного массива Дегелен, где они будут фиксироваться вследствие высоких сорбционных свойств рыхлых горных пород.

В результате данного процесса выноса радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ с подземными водами за границы площадки «Дегелен» не происходит. За пределами горного массива Дегелен основным радионуклидом в подземных водах в настоящее время и в ближайшем будущем будет являться тритий. Миграция трития с потоками подземных вод происходит по всем направлениям на максимальное расстояние до 20 км от границ гор Дегелен. Заметное снижение концентрации трития за пределами гор объясняется благоприятными условиями инфильтрации. Т.е. в связи с отсутствием сплошного покрова рыхлых слабопроницаемых отложений, происходит постоянное поступление в подземные воды атмосферных осадков, что приводит к регулярному и повсеместному разубоживанию концентрации трития, вплоть до безопасных уровней для питьевой воды. Т.е. в данном случае все запасы трития вместе с подземными водами расходуются на испарение и транспирацию растениями на расстоянии не более 20 км от массива Дегелен (рис. 6). Таким образом, на расстоянии более 20 км от границ гор Дегелен процесс выноса с подземными водами техногенных радионуклидов радиационной опасности не представляет и влияния на ухудшение радиологической обстановки не оказывает.

Площадка «Балапан». В результате проведения ПЯВ на площадке «Балапан» предположительно наработано ^{90}Sr $1,5 \times 10^{16}$ и ^{137}Cs $1,9 \times 10^{16}$ Бк. С другой стороны, данные многолетнего радионуклидного мониторинга подземных вод на площадке «Балапан» показали, что на большей части территории площадки концентрации ^{90}Sr и ^{137}Cs не превышают допустимых значений для питьевой воды. В связи с этим, встает законный вопрос, где сосредоточены основные запасы этих радионуклидов и какое их

распространение ожидается в обозримом будущем. Одним из объяснений данного вопроса является наличие в блоках горных пород, вмещающих центральные зоны ПЯВ, высоко эффективной природно-техногенной сорбционной системы. Объясним механизм её работы.

При проведении серии подземных ядерных взрывов в результате воздействия ударной волны на массив горных пород образуется слияние зон различных по степени деформаций. На площадке «Балапан» точки расположения ядерных зарядов расположены хаотически относительно геологических структур, и волны разрушения к ним подходили с разных направлений, что позволяет рассматривать данную геологическую среду, в среднем, однородной.

С учетом данных геолого-геофизических исследований, построено пространственное поле наведенной пористости. Поле суммарной пустотности горных пород получено в результате сложения полей исходной пористости и техногенной трещиноватости горных пород (рис. 13).

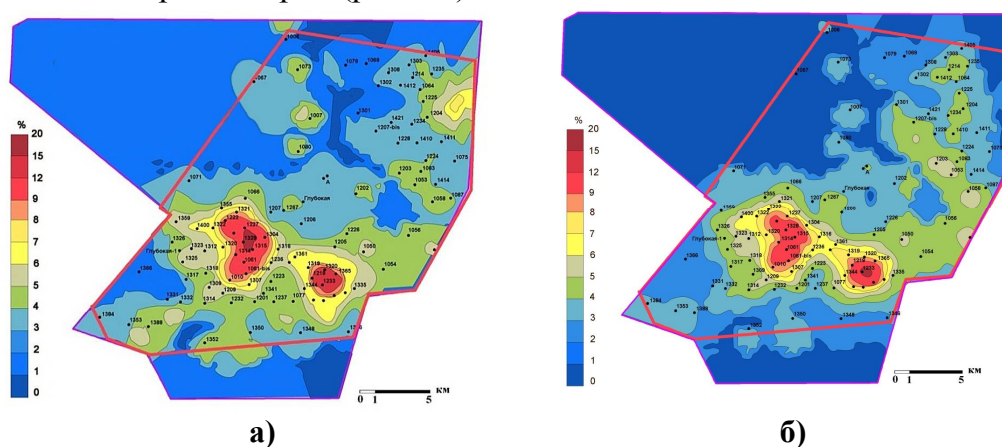
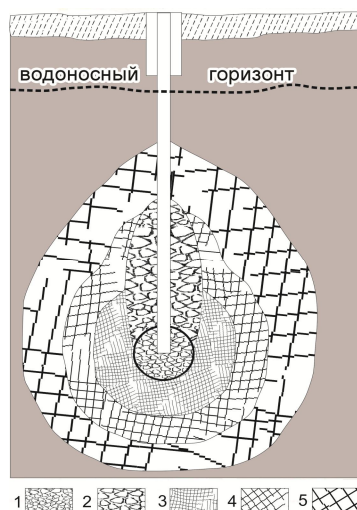


Рис. 13. Суммарная пустотность горных пород: а) горизонт 100 м; б) горизонт 400 -500 м

Результаты вычислений визуализированы в виде серии погоризонтных планов от 0 до 100 и от 400 до 500 м (рис.13). По результатам расчетов было установлено, что наибольшая суммарная пустотность горных пород проявляется в ее средней части. В относительно меньшей степени она проявляется в северо-западной части участка. С увеличением глубины суммарная пустотность горных пород сначала растет вплоть до глубин 400 – 500 м, а затем уменьшается. Максимальное значение пустотности в аномальных зонах деструкции горных пород составляет 20 %, минимальная 1-2 %.

В рамках данной системы приняты следующие условия. Так же, как на площадке «Дегелен», рассчитываемая сорбционная система включает две отдельные области, выделенные по характеру разрушения горных пород (рис.14).



1 – зона дробления; 2 – столб обрушения; 3 – интенсивной трещиноватости;
4 – блоковой трещиноватости; 5 – локальных необратимых проявлений

Рис. 14. Схематизация природно-техногенной сорбционной системы

В область №1 входит столб обрушения и зона дробления. В границах данной зоны горные породы разрушены до уровня отдельных обломков.

В пределах области № 2 деформация массива горных пород выражена в образовании различных по размеру трещинно-разломных систем. Она включает: зону интенсивной трещиноватости, зону блоковой трещиноватости и зону локальных необратимых проявлений.

Общие пространственные границы расчетной области определены с учетом особенностей фильтрационного потока, а также пространственного расположения «боевых» скважин.

Область № 1. Объем горных пород в столбах обрушения и зонах дробления определялся аналогичным образом, как это проводилось на площадке «Дегелен». Расчеты проведены для каждого ПЯВ и затем полученные значения суммировались.

Область № 2. С учетом того, что в результате серии ПЯВ происходит слияния зон, для проведения расчетов сорбционной поверхности трещинно-разломных систем приняты следующие соотношения:

- от 7 до 20 % соответствуют зоне интенсивной трещиноватости;
- от 3 до 7 % соответствуют зоне блоковой трещиноватости;
- от 0 до 3 % соответствуют зоне локальных необратимых проявлений.

По результатам данных соотношений построены погоризонтные планы (рис. 15).

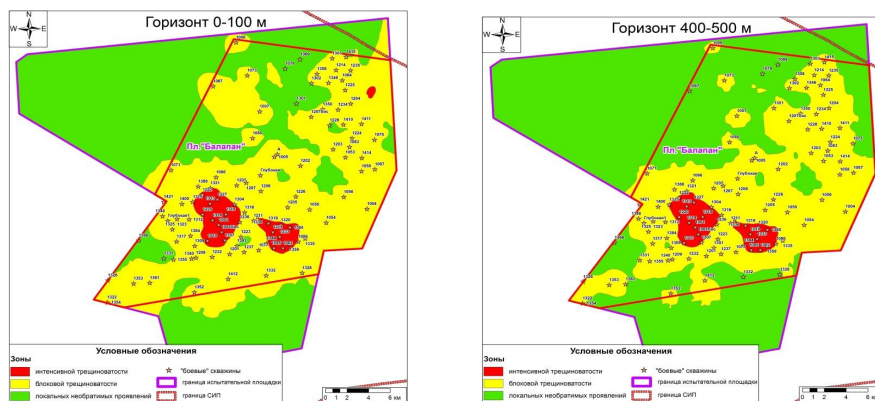


Рис. 15. Площадка «Балапан». Схема зон природно-техногенной сорбционной системы

Расчет суммарной площади сорбционной системы проводился так же, как для площадки «Дегелен». Результаты расчета зон и количества адсорбированных радионуклидов представлены в таблице 2.

Таблица 2

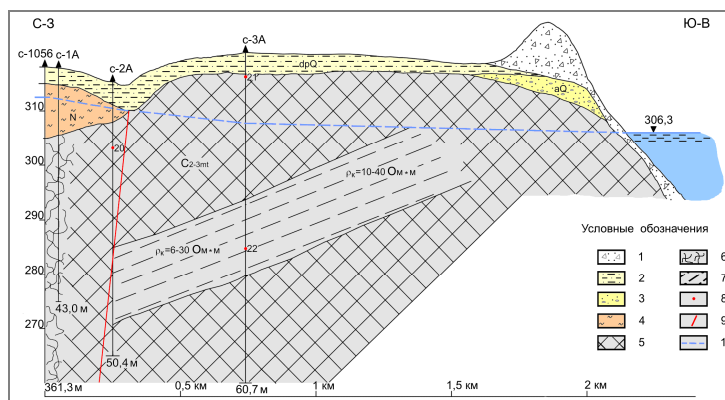
Результаты расчета зон и активности адсорбированных радионуклидов на площадке «Балапан»

Наименование зоны, площадь	Активность радионуклидов, адсорбированных в диоритах	
	^{137}Cs , Бк	^{90}Sr , Бк
Зоны дробления и столба обрушения, $1,2 \cdot 10^9 \text{ м}^2$	$0,04 \cdot 10^{15}$	$0,001 \cdot 10^{15}$
Зона интенсивной трещиноватости, $2,0 \cdot 10^{11} \text{ м}^2$	$5,9 \cdot 10^{15}$	$0,2 \cdot 10^{15}$
Зона блоковой трещиноватости, $1,1 \cdot 10^{13} \text{ м}^2$	$325,6 \cdot 10^{15}$	$11,6 \cdot 10^{15}$
Зона локальных необратимых проявлений, $6,2 \cdot 10^9 \text{ м}^2$	$0,2 \cdot 10^{15}$	$0,006 \cdot 10^{15}$
Всего площадь зон: $11,2 \cdot 10^{12} \text{ м}^2$	$3,3 \cdot 10^{17}$	$1,2 \cdot 10^{16}$
Всего наработано	$2,8 \cdot 10^{16}$	$2,1 \cdot 10^{16}$

Результаты расчетов показали, что выделенная природно-техногенная сорбционная система на площадке «Балапан» на поверхностях обломках горных пород и плоскостях трещин способна адсорбировать из подземных вод гораздо больше ^{137}Cs , чем его наработано ПЯВ. Несколько меньше она способна адсорбировать ^{90}Sr .

Из вышесказанного следует **второе защищаемое положение:** «Разработанные схемы и результаты подсчета запасов ^{137}Cs и ^{90}Sr , адсорбированных грунтами из подземных вод на площадках «Дегелен» и «Балапан»». По результатам лабораторных исследований и теоретических расчетов установлено наличие природно-техногенных систем исключаящих миграцию ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ с подземными водами за границы испытательных площадок СИП.

Для оценки характера распределение радионуклидов в подземных водах при удалении от центральных зон ПЯВ проведены заверочные полевые исследования. Для этого между «боевыми» скважинами 1056 и 1004 («Атомное» озеро) пробурен створ скважин (рис.16).



1 – навал породы, выброшенной взрывом; 2 – делювиально-пролювиальные супеси и пески (dpQ); 3 – аллювиальные пески и галечники (аQ); 4 – водоупорные глины неогена (N); 5 – терригенные грубообломочные отложения майтубинской свиты среднего-верхнего карбона (C_{2-3mt}); 6 – зона обрушения при взрыве в скв.1056; 7 – горизонт пород, обладающий пониженным удельным электрическим сопротивлением; 8 – повышенная гамма-активность по данным каротажа (мкР/час); 9 – тектоническое нарушение; 10 – уровень подземных вод

Рис. 16. Разрез по профилю: скважина 1056 – скважина 1004 (“Атомное” озеро)

Значения абсолютных отметок уровня подземных и поверхностных вод дают основания утверждать, что разгрузка подземных вод происходит от скважины 1056 по направлению к «Атомному» озеру.

Таблица 3

Содержание радионуклидов в подземных водах площадки Балапан

№ п/п	Место отбора пробы	Дата отбора, мес., год	³ H, кБк/кг	⁹⁰ Sr, Бк/кг	¹³⁷ Cs, Бк/кг	Ближайшая "боевая" скважина, км
1	С-1А	06.2005	282	1240,0	4,0	<u>1056</u> 0,06
2	С-2А, гл. 20 м	06.2005	1537	49,0	<0,1	<u>1056</u> 0,2
3	С-2А, гл. 35 м	06.2005	1518	40,0	<0,1	
4	С-3А	07.2005	0,161	0,02	<0,1	<u>1056</u> 0,8
5	“Атомное” озеро	05.2005	3,1	0,2	2,0	
УВ			7,6	4,9	11	

УВ – уровень вмешательства по содержанию отдельных радионуклидов в питьевой воде (для ²³⁹⁺²⁴⁰Pu составляет 0,55 Бк/кг)

По представленным данным можно отметить, что подземные воды с заметной концентрацией ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr распространяются в пределах 50-70 м от ствола «боевой» скважины, где образованы столб обрушения и зона дробления. При удалении от центральных зон концентрации этих радионуклидов резко снижаются.

Анализируя полученные данные, можно выделить следующие основные детали, позволяющие судить о динамике развития радиоэкологической обстановки на площадке «Балапан» и прилегающих к ней территорий.

Режим миграции радионуклидов ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu можно считать

установившимся. На значительной части территории площадки концентрация этих радионуклидов находится ниже значений МДК, либо не превышает допустимых значений для питьевой воды. Согласно расчетным данным, основная часть радионуклидов адсорбировалась в сорбционной системе зон необратимых деформаций. По данным многолетнего мониторинга увеличения их концентраций не наблюдается. В связи с этим, можно утверждать, что появления данных радионуклидов в подземных водах за границами площадки «Балапан» не произойдет.

Основным искусственным радионуклидом в подземных водах в настоящее время является тритий. В ряде скважин обнаружены концентрации, значительно превышающие УВ. За границами площадки высоких концентраций трития не обнаружено. В подземных водах, распространенных в зонах региональных тектонических разломов, концентрация трития не превышает 1 кБк/кг, что радиационной опасности не представляет и не превышает УВ.

Из вышесказанного следует **третье защищаемое положение:** *«Результаты прогнозной оценки возможного развития радиоэкологической обстановки на территории СИП, связанного с миграцией техногенных радионуклидов с подземными водами».* В обозримом будущем повышения концентрации радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ выше нормативных значений для питьевой воды в потоках подземных вод, выходящих за границы испытательных площадок «Дегелен» и «Балапан», не будет. Основным искусственным радионуклидом в подземных водах в настоящее время и в ближайшем будущем будет являться только тритий.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований показано и установлено

1. Из 181 штольни горного массива Дегелен, 30 штолен имели вытекающие на портал радиоактивные ручьи. После окончательного запечатывания порталов осталось 8 штолен с водопоявлением (104, 165, 176, 177, 503, 504, 511 и 802). В ручьях этих штолен содержатся радионуклиды ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^3H , концентрация которых находится в интервале следующих значений: для ^{90}Sr (от 45 до 1700 Бк/кг), ^{137}Cs (от 0,2 до 755 Бк/кг), $^{239+240}\text{Pu}$ (от 0,003 до 12 Бк/кг) и ^3H (от 0,6 до 1430 кБк/кг)

2. Результаты 18-летнего мониторинга показали, что радионуклидный состав и уровни загрязнения для всех водоносных штолен весьма различны, однако общим свойством остается относительное постоянство этих величин во времени, характер загрязнения с течением времени не меняется. За период наших наблюдений не выявлено значимых сезонных колебаний концентраций ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$. Полученные нами данные по мониторингу штольневых вод показывают, что процесс радиоактивного загрязнения водной среды горного массива Дегелен продолжается до настоящего времени и имеет относительно стабильный характер.

3. В горах Дегелен в результате проведения большого количества подземных ядерных взрывов в горизонтальных выработках образовались полости, заполненные обрушенной породой, и зоны техногенной трещиноватости, изменилась проницаемость природных структур, и появились открытые полости, особенно в близповерхностной части. В результате наблюдались такие явления, как неожиданное прекращение притока воды в штольню, прорыв значительных масс воды, поступление воды, скопившейся в штольне, из-за бетонных стенок.

4. В горном массиве, вмещающем центральные зоны ПЯВ, выделены две природно-техногенных сорбционных системы – это скальные горные породы зон необратимых деформаций и рыхлые отложения межгорных равнин. Проведен расчет активности ^{90}Sr и ^{137}Cs , которые могут быть адсорбированы данными системами из подземных вод. Результаты сравнительной оценки показали, что массив рыхлых отложений межгорных равнин по сорбционным свойствам значительно превосходит блоки скальных горных пород зон необратимых деформаций ПЯВ. Расчеты показали, что большая часть наработанного ^{90}Sr и ^{137}Cs будет адсорбирована рыхлыми отложениями из потоков подземных вод до выхода их за пределы границ площадки «Дегелен».

5. Результаты расчетов с учетом данных многолетнего мониторинга дают основание считать, что в обозримом будущем на развитие радиоэкологической обстановки в районе площадки «Дегелен» будет оказывать влияние постепенное перераспределение радиоактивных продуктов из центральных зон ПЯВ в периферийную часть горного массива Дегелен. По данным математического моделирования в подземных водах, выходящих за пределы центральных зон ПЯВ, в отсутствие резких изменений будет происходить медленное уменьшение концентрации ^{90}Sr и ^{137}Cs и слабое увеличение концентрации $^{239+240}\text{Pu}$. Со временем активность ^{90}Sr и ^{137}Cs будет существенно уменьшаться, а альфа-активность плутония практически не изменится. В связи с чем, данный процесс вызывает необходимость дальнейшего мониторинга.

6. Основными носителями радионуклидов на площадке «Балапан» являются трещинные и трещинно-жильные подземные воды. Концентрация радионуклидов примерно одинаковы и ниже допустимых уровней для питьевой воды: ^{137}Cs изменяется от 0,01 до 1,5 Бк/л, а ^{90}Sr – от 0,02 до 4,0 Бк/л. Концентрация ^3H в пробах подземных вод изменяется от 10 Бк/кг до значений, более чем в 500 раз превышающих допустимый уровень для питьевой воды данного радионуклида. На большей части территории площадки «Балапан» движение подземных вод осуществляется при достаточно малых величинах гидравлического уклона и низких скоростях фильтрации, не превышающие величины 1 м/сут.

7. Результаты моделирования миграции ^{90}Sr показали, что с течением времени будет происходить постепенное «вымывание» из центральных зон ПЯВ ^{90}Sr и миграция его в северном и северо-восточном направлении. При этом основная часть наработанного ^{90}Sr будет адсорбирована в зонах необратимых деформаций горных пород на площадке «Балапан».

8. На площадке «Балапан» установлено наличие вновь образованной горно-геологической сорбционной системы, образовавшейся в массиве горных пород при проведении серии ПЯВ, выделены её пространственные границы по площади и на глубину. Результаты расчетов с использованием данных по сорбционной емкости горных пород и размерам сорбционной системы показали, что выделенная природно-техногенная сорбционная система на площадке «Балапан» способна адсорбировать из подземных вод гораздо больше ^{137}Cs и ^{90}Sr , чем его наработано после проведения ПЯВ.

Таким образом, в целом по территории СИП в обозримом будущем повышения концентрации радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ выше нормативных значений для питьевой воды в потоках подземных вод, выходящих за границы испытательных

площадок «Дегелен» и «Балапан», не будет. Основным искусственным радионуклидом в подземных водах в настоящее время и в ближайшем будущем будет являться только тритий. Существенное снижение концентрации трития за пределами испытательных площадок объясняется благоприятными условиями инфильтрации.

Так как площадь испытательных площадок, где проводились подземные ядерные взрывы, занимает всего 8% от общей площади Семипалатинского полигона, полученные данные дают основание утверждать, что примерно 90% площади СИП по уровню загрязнения техногенными радионуклидами подземных вод может использоваться в хозяйственной деятельности без ограничений.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Субботин С.Б., Айдарханов А.О., Дубасов Ю.В. Исследование миграции трития с подземными водами на бывшем Семипалатинском полигоне // Радиохимия, 2013, Т. 55. – N. 5. – С. 471–478.
2. Субботин С.Б., Дубасов Ю.В. Радиоактивное загрязнение водной среды горного массива Дегелен// Радиохимия, 2013, Т. 55. – N. 6. – С. 561-567.
3. Субботин С.Б., Дубасов Ю.В., Коровина О.Ю., Смирнова Е.А. Сорбционные свойства горных пород на территории бывшего Семипалатинского полигона// Радиохимия, 2014, Т. 56. – N. 5. – С. 477-480.

Статьи в иностранных периодических изданиях:

1. O.I. Artemev, S.B. Subbotin et al. “Radiation Survey and Radionuclide analysis of Radioactive Plumes from the former Semipalatinsk Nuclear Test Site” in “Nuclear Physical Methods in Radioecological Investigations of Nuclear Test Sites” , Kluwer Academic Publishers 2000, 127-143
2. E. Gorbunova, **S. Subbotin**. Study of Radionuclide Transport by Underground Water at the Semipalatinsk Test Site //The New Uranium Mining Boom. Berlin, 2011.- P.335-342

Статьи в периодических изданиях:

1. Субботин С.Б. Оценка влияния результатов разработки месторождения «Каражыра» на состояние подземных вод испытательной площадки «Балапан» бывшего СИП // С.Б. Субботин, Е.А. Новикова, В.В. Романенко, К.И. Кузеванов, А.А. Быкова, М.Н. Тырышкина // Вестник НЯЦ РК. -2012. - Вып. 3.- С.92-100.
2. Субботин С.Б., Лукашенко С.Н., Айдарханов А.О., Ларионова Н.В., Яковенко Ю.Ю. Радиоактивное загрязнение техногенными радионуклидами компонентов экосистемы реки Шаган //Проблемы биогеохимии и геохимической экологии.- 2010. - №3 (14). – С.106-115.
3. Субботин С.Б., Романенко В.В., Новикова Е.А., Барсукова С.А., Бахтин Л.В., Кузеванов К.И., Тырышкина М.Н. Изучение загрязнения искусственными радионуклидами подземных вод испытательной площадки “Балапан”. //Проблемы биогеохимии и геохимической экологии.- 2010. - №3 (14). – С.95-123.

Тезисы докладов и материалы конференций:

1. Субботин С.Б., Лукашенко С.Н., Каширский В.М., Яковенко Ю.Ю., Бахтин Л.В. Подземная миграция искусственных радионуклидов за пределы горного массива Дегелен // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана [Сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2007-2009 гг.] /под рук. Лукашенко С.Н. – Вып. 2 – Павлодар: Дом печати, 2011. – С. 103-156.

2. Субботин С.Б., Лукашенко С.Н., Романенко В.В., Каширский В.В., Пестов Е.Ю., Горбунова Э.М., Кузеванов К.И. Выявление путей миграции техногенных радионуклидов за пределы испытательной площадки «Балапан» // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана [Сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2010 г.] /под рук. Лукашенко С.Н. – Т.2 – Вып. 3 – Павлодар: Дом печати, 2011. – С. 161-232.

3. Subbotin S.B. Study of sorption properties of rocks distributed at the territory of STS / S.B. Subbotin, L.F. Subbotina, O.Yu. Korovina // Радиационная экология. Ядерно-физические методы в медицине и промышленности: докл. 5-ой междунар. конф. "Ядерная и радиационная физика", Алматы, 26-29 сент. 2005. –Т.3 – С. 84-91.

4. Субботин С.Б., Стрильчук Ю.Г., Новикова Е.А., Романенко В.В., Бахтин Л.В., Горбунова Э.М. Исследование путей и механизмов загрязнения техногенными радионуклидами вод реки Шаган //Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана [Сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2012 г.] /под рук. Лукашенко С.Н. – Т.2. – Вып. 4. - Павлодар: Дом печати, 2013. - С. 41-63.

5. Ляхова О.Н., Лукашенко С.Н., **Субботин С.Б.** Третий как индикатор мест проведения ядерных испытаний //Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана. /под руководством Лукашенко С.Н. Павлодар: Дом печати, выпуск 3, 2011. – Том-2, С. 121 – 142.

6. Ларионова Н.В., **Субботин С.Б.**, Лукашенко С.Н. Разработка и применение метода оценки загрязнения тритием грунтовых вод по его содержанию в растительном покрове //Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана. /под руководством Лукашенко С.Н. Павлодар: Дом печати, выпуск 2, 2010. – С. 321 – 330

7. Айдарханов А.О., Лукашенко С.Н., **Субботин С.Б.** Радиоэкологическое состояние территории флюоритового месторождения «Караджал» //Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана. /под руководством Лукашенко С.Н. Павлодар: Дом печати, выпуск 2, 2010. – С. 245 – 274.

8. Стрильчук Ю.Г., Лукашенко С.Н., **Субботин С.Б.** Радиоэкологическое состояние «западной» части территории СИП //Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана. /под руководством Лукашенко С.Н. Павлодар: Дом печати, выпуск 3, 2011, Том-1, С. 81-164.

9. Стрильчук Ю.Г., **Субботин С.Б.** Радиоэкологическое состояние территории месторождения «Байтемир» //Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана. /под руководством Лукашенко С.Н. Павлодар: Дом печати, выпуск 3, 2011. – Том-1, С. 333 – 384.

10. Стрильчук Ю.Г., **Субботин С.Б.** Радиоэкологическое состояние территории месторождения «Есымжал» //Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана. /под руководством Лукашенко С.Н. Павлодар: Дом печати, выпуск 3, 2011. – Том-1, С. 385 – 398.