

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский государственный университет
Институт Наук о Земле
Кафедра геоэкологии и природопользования

Файзрахманов Вагиз Валерьевич

Выпускная квалификационная работа

**ОЦЕНКА РАДИАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЧЕЛОВЕКА И ОКРУЖАЮЩУЮ
СРЕДУ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ЗАГРЯЗНЕННЫХ СБРОСАМИ «ПО МАЯК»**

Основная образовательная программа магистратуры
Направление 05.04.06 «Геоэкологический мониторинг и рациональное природопользование»
Профиль «Природопользование»

Научный руководитель:
д.ф-м.н., профессор
Белозерский Геннадий Николаевич

Рецензент:
Заместитель директора по научной работе
ЗАО «Научно-Производственная Фирма «Аргос»
к.т.н., доцент
Лобынцев Валентин Васильевич

Санкт-Петербург
2019

Содержание

Введение.....	3
Глава 1. Физико-географическое описание района.....	7
1.1. Климатические характеристики региона	7
1.2 Растительный и животный мир региона	8
1.3 Геолого-гидрогеологические характеристики района природной впадины Карачай.....	10
1.4 Данные об активности воды озера Карачай и его химическом составе воды.	13
Глава 2. Воздействие водного объекта на окружающую среду.....	18
2.1 Карачай как источник загрязнения подземных вод	18
2.2 Загрязнение окружающей территории вследствие ветрового разноса активной пыли.....	25
Глава 3. Изучение возможности переноса активного аэрозоля из акватории озера Карачай на окружающую территорию	34
3.1 Общие представления о водном аэрозоле и механизмах его образования.....	34
3.2 Расчет объема и активности аэрозоля, образываемого с поверхности акватории	37
Глава 4. Исследования Тимофеева-Ресовского по снижению активности ЖРАО	40
Глава 5. Проблема недостатка и недостоверности информации в сфере обращения с РАО.....	45
Заключение	47
Список литературы	49
Приложение 1	55
Приложение 2	56
Приложение 3	57

Введение

Открытие в начале 1939 года деления ядра урана и затем обоснование возможности протекания в уране цепной ядерной реакции деления, дали старт возникновению ядерной энергетики.

На ранних этапах ее развития, она была связана с созданием ядерного оружия. Сложность проблемы, недостаток знаний и времени, все это привело к масштабному попаданию радионуклидов в окружающую среду, что повлекло за собой облучение персонала предприятий и населения окрестных территорий. Это усугублялось секретностью работ в отрасли, приводившим к тому, что население прилегающих территорий просто не знало об опасностях, исходящих от рядом расположенных производств. Только спустя более чем 40 лет стала появляться первая отрывочная информация, как о таком производстве, так и об опасности его для населения и природы.

Недостаток информации о произошедшем и происходящем, по-прежнему является источником проблем для населения подобных регионов даже в конце второго десятилетия XXI века. Наиболее известным и характерным объектом в атомной отрасли является производственное объединение «Маяк» — одно из крупнейших предприятий Госкорпорации «Росатом».

Федеральное государственное унитарное предприятие «Производственное объединение Маяк». Оно было создано для получения оружейного плутония на основании постановления Правительства СССР № 3007-892 от 1 декабря 1945 г. [3]. Оно расположено на западе от уральского хребта, между реками Теча и Мишеляк, вблизи городов Кыштым и Касли на территории Озёрского городского округа. Промышленная площадка ФГУП «ПО «Маяк» занимает вместе с санитарно-защитной зоной площадь 256 км² [1]. Для сравнения, площадь промышленной площадки расположенного в США и так же выполнявшего аналогичные функции Хэнфордского комплекса составляет 1536 км² [2].

По состоянию на 2017 год [4] ФГУП «ПО «Маяк» является производственным комплексом, включающим 7 основных заводов и 16 обеспечивающих подразделений. Основные заводы ПО «Маяк» расположены на двух отдельных площадках, удаленных от жилых массивов города Озерска на 12 км к юго-востоку, от города Кыштым на 14 км к востоку, от города Касли на 15 км к югу, от поселка № 2 на 7,5 км к востоку, от поселка Новогорный менее 4,5 км к северу, от поселка Метлино на 16 км к юго-западу, от села Кызылбулак на 8 км к северо-западу, от села Худайбердинск на 10 км к юго-востоку; от села Бижеляк на 10 км к югу, а от областного центра, города Челябинска на 60 км к северо-западу. Данные представлены в таблице 1 и графически изображены на рисунках 1,2.

Таблица 1 - Расстояние от площадки предприятия до ближайших населенных пунктов [5].

Название населенного пункта	Количество населения в 2010 г., чел.	Расстояние от ПО «Маяк», км.
г. Озерск	82164	15
г. Кыштым	38942	15
г. Касли	16969	15
с. Аргаяш	10041	25
пос. Новогорный	6733	7
пос. Тайгинка	1452	20
пос №2	31	2
пос. Худайбердинский	807	11

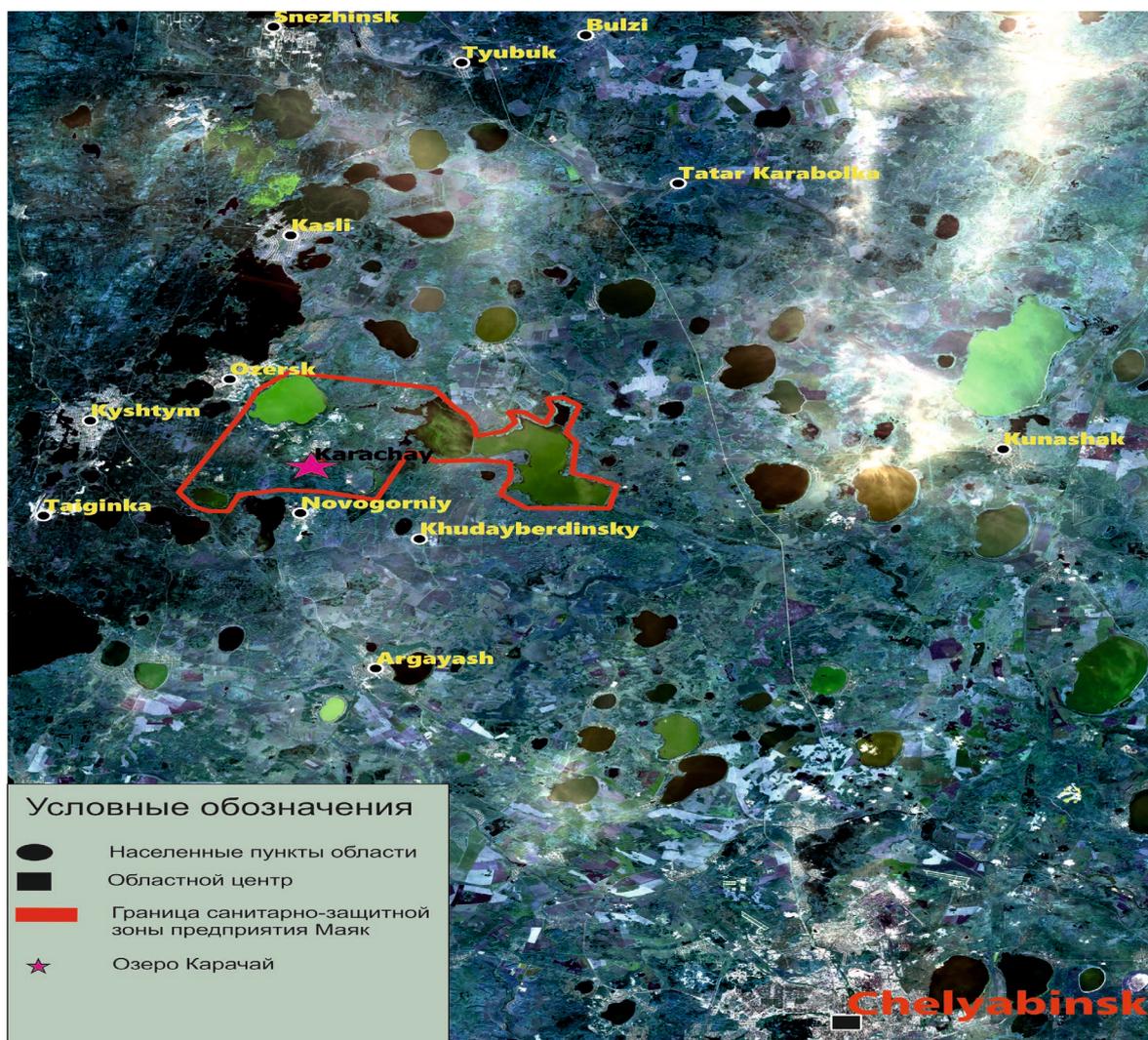


Рисунок 1 – Расположение предприятия Маяк и окружающих его населенных пунктов, выполнено автором в программе «QGIS», 2018 год.

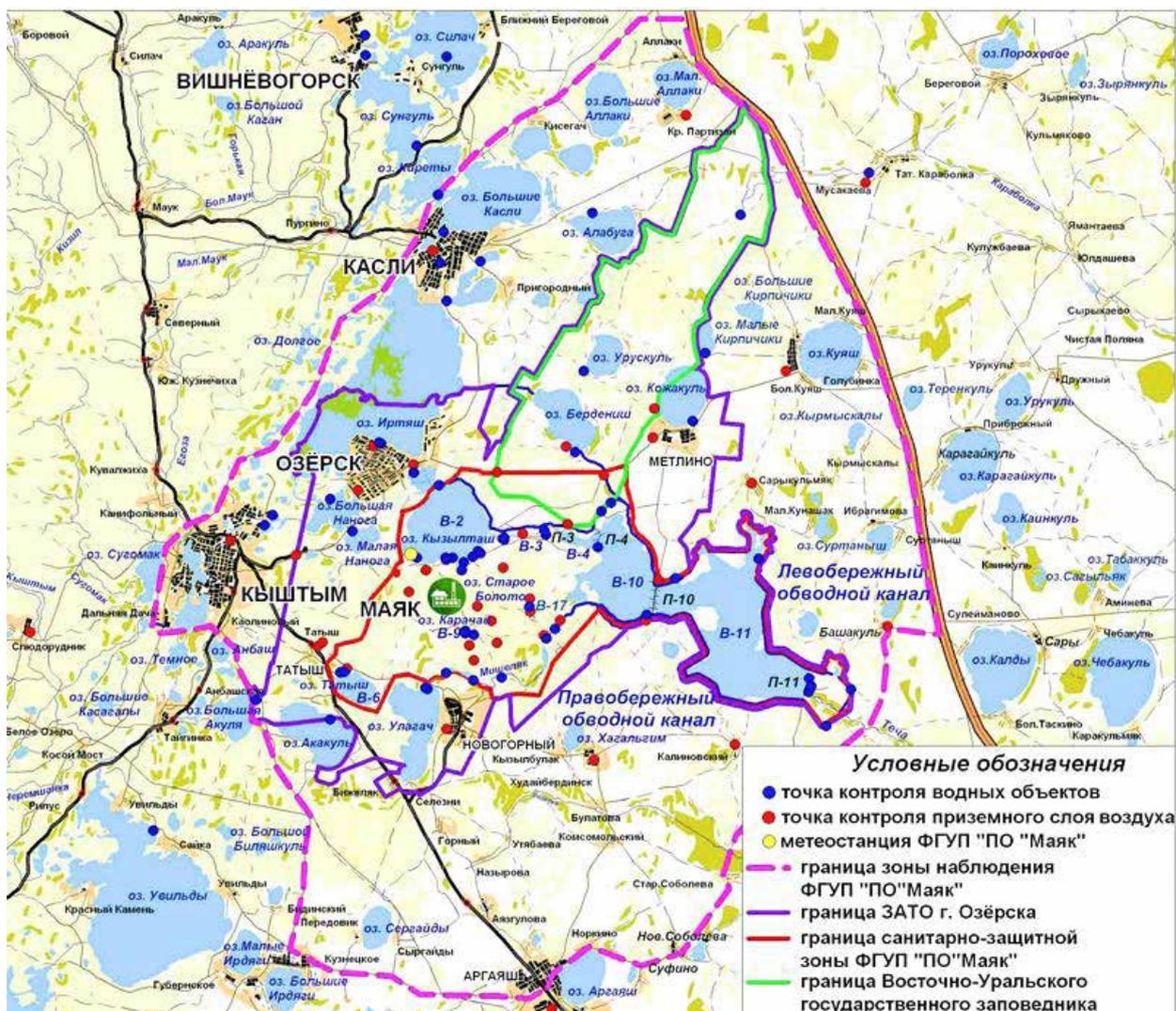


Рисунок 2 – Схема расположения предприятия «Маяк» [4].

С самых первых этапов своей работы предприятие производило сбросы ЖРО в гидросистему Челябинской области как в регламентном (предусмотренным техническим проектом), так и в аварийном порядке. Сбросы осуществлялись в следующие водные объекты: реку Теча, озера Кызылташ, Татыш, и в образованные затем техногенные водные объекты (Карачай, Старое болото, Теченский каскад водоемов).

Настоящая работа посвящена изучению миграции радиоактивных веществ из самого большого в мире, неизолированного от окружающей среды хранилища, жидких радиоактивных отходов (ЖРО) Карачай, за весь период использования, в которое было сброшено более $\sim 2 \cdot 10^{19}$ Бк активности, состоящей как из коротко¹, так и из долго живущих радионуклидов².

Использование такого хранилища ЖРО всегда вызывало недоуменные вопросы у экологов (у защитников окружающей среды). Формально говоря, только с 1971 г. начались работы, связанные с упорядочением границ береговой линии водоема. Сбросы ЖРО в него

¹ Коротко живущие радионуклиды имеют период полураспада, согласно [7], менее 100 дней.

² Существующие оценки активности они относятся к величине сброса.

продолжались, но затем начались работы просто по его засыпке, которые закончились в 2014 году ликвидацией акватории водного объекта, оставив все его содержимое под тонким слоем материала засыпки.

Официального названия вновь образованный объект не получил. В мировой практике прецедентов такого обращения с ЖРО нет. Уникальность такого объекта требует понимания того, что же изменилось в положительную или отрицательную сторону в плане воздействия оставшихся на том же месте радионуклидов на окружающую среду.

Цель работы: Оценить влияние на окружающую среду неизолированного от нее хранилища радиоактивных отходов (на примере объекта Карачай).

Для достижения имеющейся цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать историю возникновения и эволюцию озера «Карачай» как места временного хранения жидких РАО ПО Маяк.
2. Провести оценки состава и активностей радионуклидов, оказавшихся в этом объекте.
3. Проанализировать все возможные каналы поступления радионуклидов из объекта в окружающую среду.
4. Оценить влияние на окружающую среду радионуклидов до и после ликвидации акватории.

Глава 1. Физико-географическое описание района

1.1. Климатические характеристики региона

Климат региона, в котором расположены исследуемые объекты, является умеренно-континентальным, данная особенность определяется положением региона в центре Евро-Азиатского материка, большим удалением от морей и океанов, ближайшее к региону Баренцево море расположено на расстоянии около 1500 километров. Существенное влияние на формирование климата оказывают Уральские горы, создающие препятствие на пути движения атлантических воздушных масс [8].

Для климата региона характерны продолжительная зима, с устойчивым снежным покровом, и непродолжительное лето. Зима холодная, чаще всего малоснежная, ее длительность составляет 5,5-6 месяцев. Средняя высота снежного покрова составляет около 30-40 сантиметров. Продолжительность нахождения снежного покрова на местности составляет примерно 160 дней. Лето является жарким, длится 3 месяца [8].

Самым холодным месяцем является январь со средней температурой $-14,7^{\circ}\text{C}$, при этом абсолютный минимум $-43,2^{\circ}\text{C}$ был зарегистрирован в декабре 1955 года. Самым жарким месяцем является июль со средней температурой $+18,7^{\circ}\text{C}$, абсолютный максимум $+37,3^{\circ}\text{C}$ наблюдался в июле 1952 года. Средняя годовая температура воздуха в регионе составляет $+2,6^{\circ}\text{C}$. Первые заморозки наблюдаются в среднем 15 сентября, при этом самая ранняя дата фиксирования заморозков приходится на 3 сентября, а поздняя на 5 октября [8].

Температура почвы на глубине до 0,5 метров соответствует температуре окружающего воздуха. Наибольшие глубины промерзания почвы приходятся на март и составляют от 1,8 до 2,0 метров [9].

Влажность воздуха характеризуется значительной годовой и суточной изменчивостью. Среднегодовое значение абсолютной влажности составляет $6,8 \text{ г/м}^3$, а среднегодовая относительная влажность 72%. Годовое количество атмосферных осадков составляет 250-600 мм, из которых до 75- 80% выпадает дни летних месяцев, а зимой выпадает около 15%. Годовая норма испарения с поверхности малых водоемов составляет 600 - 700 мм с м^2 [9].

В районе расположения озера Карачай наблюдаются туманы, обледенения, грозы, град, снегопады и метели. Туманы могут наблюдаться в любое время года, при этом среднее количество дней с туманом в году равно 15. Количество дней с метелями может значительно колебаться от года к году. В среднем, в течение одного года регистрируется до 33 дней с метелями, а максимальное количество таких дней - 58. Грозы обычно наблюдаются летом, реже весной и осенью, среднее количество в году дней с грозами 25, а самое большое 38.

Град обычно наблюдается во время ливневых осадков. Среднее количество дней с градом 1,8, а наибольшее - 4 дня в году [8].

Направление и скорость ветра имеют сезонную цикличность. Зимой основное влияние на гидрометеорологические условия Южного Урала оказывает южный гребень (область повышенного давления между двумя областями пониженного давления) азиатского антициклона. В этот период года здесь преобладают западные ветры, с южной составляющей около 65%. Летом Азорский антициклон приводит к повышению атмосферного давления на западе Южного Урала; поэтому начинают преобладать ветры западного и северного направлений. Среднегодовая скорость ветра равна 4,1 м/с, причем среднемесячная скорость ветра почти одинакова и достаточно устойчива. Максимальная скорость ветра составляет 24 м/с. [8].

1.2 Растительный и животный мир региона

Согласно физико-географическому положению растительность Челябинской области, подразделяется на три зоны. В первую зону входит растительность горнолесной зоны, во вторую растительность степной зоны, включающую разнотравно-ковыльные, луговые степи; островные боры, каменистые степи. Третья зона представлена растительностью лесостепи, включающую центральную и северо-восточную, восточную части области, с преобладанием лесов из березы и осины, участков луговой степи и остепненных лугов, и ленточных островных боров. Лесостепь Зауралья можно разделить на две подзоны: северную, в которой располагалось озеро Карачай и южную [9]. Общее количество видов растений произрастающих на территории области достигает 1 500 [9].

Основой естественной растительности данного района являются колковые березовые и осиновые леса, занимающие низины. Травянистый покров состоит из мятлика, овсяницы, тимофеевки, костреца, пырея, коротконожки. Встречаются зопник клубненосный и подмаренник, а так же пижма, полынь, горошек, змееголовник, девясил, душица, зверобой, спаржа лекарственная и другие виды [10].

На севере области распространены болота: верховые, переходные и низинные. Верховые болота являются местом обитания видов арктической флоры, таких как карликовая березка, морошка, клюква, пушица. На переходных болотах можно встретить различные виды ивы, мытников и осок, багульник, голубику, пушицу. Наиболее распространенными видами, произрастающими на низинных болотах, являются травянистые болота из тростника, вейника, осоки, рогоза, манника гигантского и других травянистых растений [10].

В настоящее время на территории области обитает более 70 видов млекопитающих и около 300 видов птиц. К промысловым относятся 33 вида млекопитающих и 70 видов птиц. Пресмыкающиеся и земноводные представлены 20-тью видами, рыбы - 60-тью видами [11].

Типичными представителями млекопитающих зоны лесотепей являются лось, пятнистый олень, заяц-беляк, белка, еж, колонок, куница, крот, русак, барсук, горностай, степной хорь [11].

Из перелетных птиц на озерах, водоемах области гнездятся лебедь-кликун и лебедь-шипун, серый гусь. Подсемейство утиных представлено уткой-пеганкой, уткой-огарь, кряквой, серой уткой, шилохвостью и другими. Всего на водоемах области гнездится 16 видов уток. Самой распространенной из уток является кряква. Пеганки, огари-утки, редко встречающиеся в восточных и южных районах области. Отряд журавлиных представлен на Южном Урале серым журавлем. В области серый журавль встречается в обширных заболоченных пространствах лесостепи, на болотах в островных борах [10].

Среди насекомых выделяются представители отряда двукрылых (мошки, комары, мухи), перепончатокрылых (пчелы, шмели, осы, наездники), равнокрылых (цикадовые), а так же прямокрылых (кузнечики) [10].

Основными представителями земноводных являются остромордая и прудовая лягушки, а также серая и зеленая жаба. В стоячих водоемах обитает краснобрюхая жерменка. В мелких водоемах можно встретить тритона гребенчатого и обыкновенного [10].

В оз. Иртяш, в оз. Кызылташ и в прудах встречаются лишь чебаки, окуни, ельцы, щуки, лини и караси, а в нижней части Течи, где дно каменистое и течение быстрое, лишь гольцы и пескари. Озеро Иртяш с рыбо-хозяйственной точки зрения относится к числу малокормных, что объясняется наличием больших глубин, каменистым характером дна, слабым развитием водной растительности, планктона и бентоса [11].

По данным, проводившегося в 2015 году, исследования биоты озера Карачай, перед ликвидацией его акватории, видовое разнообразие фитопланктона, зоопланктона, перифитона, зообентоса водоёма было невелико. Всего за летний период зарегистрировано 13 видов фитопланктона, восемь видов зоопланктонных организмов, два вида представителей зообентоса, что представляется крайне незначительным по сравнению с естественными водоёмами и другими промышленными водоёмам [12].

Фитопланктон и перифитон оз. Карачай был представлен преимущественно цианобактериями, что характерно для экстремальных местообитаний. В планктоне резко преобладал единственный вид *Microcystis aeruginosa* составляющий 98-99 % от общей численности микроводорослей [12].

Зоопланктон водоёма был представлен коловратками, встреченные виды *Brachionus calyciflorus* и *Brachionu urgeus* являлись мирными фильтраторами, устойчивыми к действиям токсикантов [12].

В донном сообществе водоема, наблюдалась деградация, близкая к полному исчезновению. Бентос был представлен единичными особями, из которых только *Psectrotanypus sibiricus* является типичным обитателем донных отложений. Таким образом, виды фито- и зоопланктона, обнаруживаемые в водоёме В-9, являлись эвригалинными и галофильными, то есть способными существовать в условиях повышенной солёности и быть устойчивыми к действию различных токсикантов [12].

1.3 Геолого-гидрогеологические характеристики района природной впадины Карачай

На северо-востоке Челябинской области, цепь Уральских гор постепенно переходит в холмистую равнину. Здесь, между невысокими холмами имеется значительное количество бессточных понижений-западин, в которых скапливаются дождевые и талые воды. В одной из таких западин, на слабохолмистой равнине, между рекой Течей, её правым притоком, рекой Мишеляк и озёрами Улагач и Кызылташ было расположено болото Карачай.

До начала промышленных сбросов, водоем Карачай представлял собой болото верхового типа, которое в маловодные годы полностью пересыхало. На топографических картах того периода водный объект обозначался как болото Карачай. Однако после начала производства сбросов Карачай уже никогда не пересыхал, и термин болото Карачай постепенно вышел из употребления, сменившись терминами: озеро Карачай, водоём Карачай, водоём-9 [13].

Решение о направлении жидких радиоактивных отходов в болото Карачай было принято 7 августа 1951 года специальной комиссией под председательством академика А.П. Александрова. Данная комиссия была создана после обнаружения сильного радиоактивного загрязнения поймы реки Теча, в результате производства сбросов с радиохимического завода Б. Из канализационной трубы завода, в реку, ежедневно поступало от 4000 до 8500 м³ сбросных вод, активность которых колебалась от $1.1 \cdot 10^6$ Бк/л до $2.2 \cdot 10^8$ Бк/л, следовательно, в сутки сбрасывалось от $9.2 \cdot 10^{12}$ Бк до $1.4 \cdot 10^{15}$ Бк активности. [14]

Отвод жидких среднеактивных отходов в водоём Карачай рассматривался в 1951 г. как альтернатива их санкционированному сбросу в р. Теча, и являлся, по мнению членов комиссии, минимизирующей природоохранной мерой. Изначально предполагалось производить сбросы в водный объект в течение двух-трех лет [6], однако они продолжались более 60 лет, начиная с 3 ноября 1951 года. Основным официальным доводом в пользу данного способа содержания жидких отходов было не мотивированное представление об отсутствии стока или заметной фильтрации в другие водоемы из природного объекта — болота Карачай. Не официальным

доводом являлось то обстоятельство, что это место находилось в 400 метрах от завода «Б» — основного радиохимического завода предприятия.

Вероятность существования подземного стока и его влияние на распространение радионуклидов в гидросфере не рассматривались [6].

Первые инженерно-геологические изыскания с применением ручного бурения на территории, прилегающей к озеру Карачай, были выполнены в августе 1951г. Результаты этих изысканий явились первыми данными о геологическом строении верхней части разреза территории побережья и самого водоёма [13].

Абсолютные отметки высот в районе, окружающем водоем, изменяются в пределах от 222 м на урезе воды р. Теча в точке 55.639315 с.ш. 61.152037 в.д., месте слияния правобережного и левобережного каналов и 249.3 м. на уровне берега водоема Карачай [15]. Водный объект и его окрестности располагаются над массивом распространения вулканогенных и вулканогенно-осадочных пород силур-девонского возраста. Данные породы представлены лавами, лавобрекчиями и туфолавами андезито-базальтовых порфиритов, туфопесчаниками и туфоалевролитами а также сланцами, возникшими в ходе динамометаморфизма вышеперечисленных пород, и изображены на рисунке 5 [13].

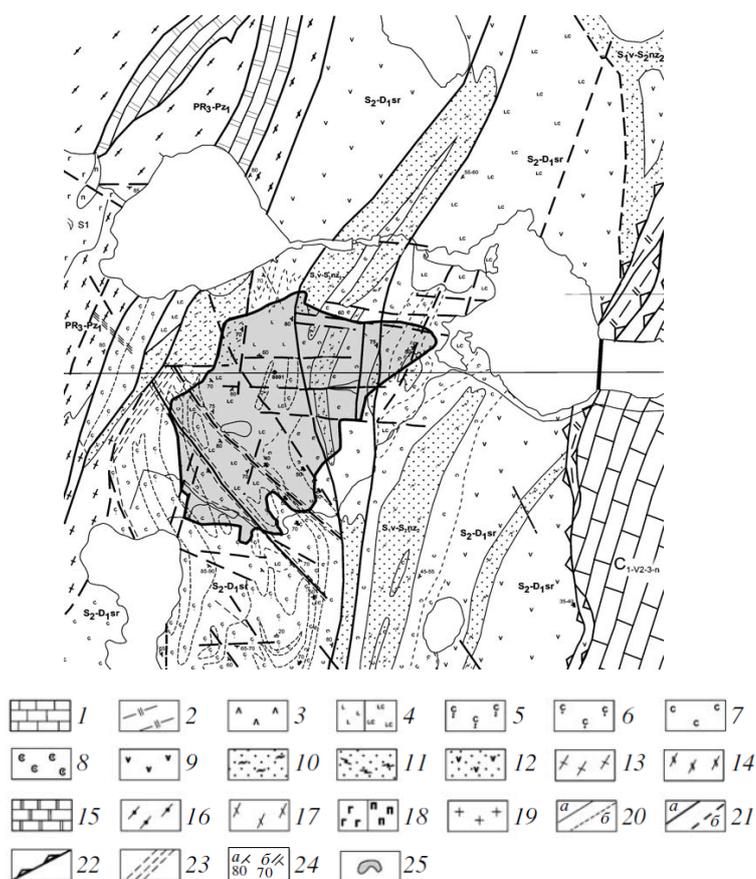


Рисунок 3 – Схема геологического строения района расположения водоема Карачай [16].

Примечание к рисунку 3. Условные обозначения к схеме. 1) известняки, мраморизованные известняки; 2) известково-глинистые сланцы; 3) нерасчлененные вулканогенно-осадочные породы; 4) лавы и туфолавы пироксен-плагиоклазовых пофиритов андезито-базальтового состава; 5) туфы крупнопсефитовые до агломерато-глыбовых; 6) туфы мелкопсефитовые; 7) туфы алевропсаммитовые и псаммитовые; 8) туфоалевролиты, туфопесчаники, кремнистые туффиты с элементами слоистости; 9) нерасчлененные вулканогенные и вулканогенно-осадочные породы; 10) сланцы хлорит-серицитовые, кварц-альбит-серицит-хлоритовые; 11) сланцы кварц-серицит-хлоритовые, микрокварциты, 12) нерасчлененные вулканогенно-осадочные породы; 13) сланцы кварц-альбит-серицит-хлоритовые; 14) хлоритовые (оттрелитовые) сланцы; 15- известняки мраморизованные, мраморы; 16) кристаллические сланцы, гнейсы биотитовые, биотит-амфиболовые, образованные за счет среднекислых эффузивов; 17) амфиболиты; 18) габбро, габбро-пироксениты, пироксениты; 19) граниты, гранодиориты; 20) границы: стратиграфические (а), фациальных разновидностей пород (б); 21) разрывные нарушения: установленные (а), предполагаемые (б); 22) тектонические швы Аргаяшского надвига; 23) зоны интенсивного рассланцевания; 24) элементы залегания слоистости (а), разрывных нарушений (б); 25) контур ореола загрязнения подземных вод, распространяющихся от оз. Карачай.

Вулканогенные породы рассматриваются как химически однородная среда следующего среднего состава: Si_2O - 50%, Al_2O_3 - 14%, MgO - 8.5%, CaO - 8.4%, FeO - 7%, Na_2O - 3.2%, H_2O - 3.2%, Fe_2O_3 - 3%, CO_2 - 1%, $\text{TiO}_2 < 1\%$, K_2O - 0.55%, MnO - 0.15% [13].

В минеральном составе слагающих пород основная роль принадлежит вторичным минералам, образовавшимся при метаморфизме. Метаморфические процессы привели к кристаллизации вулканического стекла и альбитизации первичного плагиоклаза. Из первичных минералов местами сохранились только реликты пироксена. Пироксен представлен своей моноклинной разновидностью - авгитом. Основным вторичным минералом, развитым по пироксену, является актинолит. Первичный плагиоклаз в вулканитах полностью замещен альбитом. Одним из основных продуктов альбитизации плагиоклаза является эпидот. Карбонат, представленный чистым кальцитом, в незначительном количестве встречается повсеместно [13].

В структурно-тектоническом отношении окрестности озёрной впадины представляют собой синклинали, являющейся составной частью Кызылташского синклинория, так же с востока к синклинали примыкает сложная антиклинальная складка. Разрывные нарушения группируются в зоны разломов субмеридионального, северо-западного и субширотного направлений. Наиболее крупными являются разломы субмеридионального направления. Эти разломы представляют собой зоны дробления с глиной трения и окварцевания, а также повышенной мощностью приуроченных к ним линейных кор выветривания. Наиболее значительным из нарушений северо- западного направления является Мишеляжский разлом, представленный полосой неравномерно рассланцованных и перемятых пород шириной около 1 км, выраженный понижением рельефа и увеличением мощности коры выветривания до 40 и более метров. Многочисленные разрывные нарушения субширотного направления установлены севернее озёрной впадины. На большей части территории района расположения водоема

Карачай, породы складчатого основания скрыты под образованиями позднемезозойской коры выветривания и перекрывающими их на отдельных участках глинисто-песчаными кайнозойскими отложениями [13].

Коры выветривания района сформировались в начале платформенной стадии развития молодой эпигерцинской платформы и являются продуктом позднемезозойской эпохи регионального выветривания, по мощности варьируют в широких пределах, от первых метров до десятков и сотен метров. Преобладающими морфологическими типами являются линейный и линейно-площадной. [13].

Подшвой коры выветривания служит граница, выделяемая по значительному изменению физико-механических свойств вулканогенных пород. Эти изменения обусловлены тем, что плотные массивные вулканиды с ничтожно малой гидравлической проницаемостью достаточно резко сменяются вверх по разрезу сначала трещиноватыми, а затем дезинтегрированными образованиями коры выветривания с более высокими фильтрационными параметрами. Таким образом, подошва коры выветривания является, по существу, относительным водоупором, контролирующим вертикальную миграцию подземных вод.

1.4 Данные об активности воды озера Карачай и его химическом составе воды.

С начала использования водоема для сбросов ЖРО предприятия в ноябре 1951 года, и до 1967 года, информация об активности его вод носит отрывочный характер. В архивных документах отсутствуют упоминания о дате и годовом количестве отбора проб воды [17].

Начиная с 1967 г., отбор проб воды из водоёма стал проводиться регулярно, не менее двух-трёх раз в год, обычно весной в мае и осенью октябре. В архивных документах стали указывать дату (день, месяц) отбора пробы. С этого же периода времени, основную часть измерений удельной активности γ -излучающих радионуклидов выполнялась с использованием, сначала сцинтилляционных, а затем и полупроводниковых γ -спектрометров, что позволило существенно повысить достоверность и точность получаемых результатов. Отобранные пробы воды поступали в аналитическую лабораторию и подвергались радиохимическому (на содержание Sr^{90}), γ -спектрометрическому (на содержание γ -излучающих нуклидов) и α -спектрометрическому анализу [17].

Результаты измерения активности воды водоема Карачай в различные периоды времени представлены в Приложении 1 [13].

В марте 2002 года специалистами ЦЗЛ ПО «Маяк» было проведено комплексное обследование водоема Карачай. В ходе проделанных работ были отобраны пробы льда, воды, и донных отложений на различных глубинах водоема. В пробах воды, льда, донных отложений были определены следующие показатели: суммарная β -активность, суммарная α -активность,

pH, плотность, щелочность, жесткость, перманганатная окисляемость, сухой остаток, содержание в пробе урана, хлорид-иона, сульфат-иона, нитрат-иона, железа, марганца, хрома, алюминия, таллия, магния, кальция и натрия, концентрации ТБФ (Трибутилфосфат) и ГХБД(Гексахлорбутадиен) (таблица 2) [18].

Таблица 2 – Средние значения радиохимических и гидрохимических параметров воды (с учетом взвесей) и льда [18].

Параметр	Единицы измерения	Значение	
		Лед	Вода
Суммарная β -активность	Бк/л	$1,6 \cdot 10^7$	$2,6 \cdot 10^8$
^{137}Cs	Бк/л	$6,1 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^8$
$^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$	Бк/л	$9,6 \cdot 10^6$	$1,1 \cdot 10^8$
^3H	Бк/л	$3,2 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^4$
Суммарная α -активность	Бк/л	$7,0 \cdot 10^3$	$6,5 \cdot 10^5$
$^{241}\text{Am} + ^{238}\text{Pu}$	Бк/л	$4,8 \cdot 10^3$	$3,9 \cdot 10^5$
$^{(239,240)}\text{Pu}$	Бк/л	$3,0 \cdot 10^2$	$2,9 \cdot 10^4$
^{244}Cm	Бк/л	$1,8 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^5$
pH	-	7,1	7,7
Плотность	г/см ³	0,995	1,004
NO_3^-	мг/л	1300	10500
SO_4^{2-}	мг/л	19	113
Cl^-	мг/л	4,7	38,8
Щелочность	ммоль/л	1,5	10,8
Жесткость	ммоль/л	2,7	11,9
Перманганатная окисляемость	мг О/л	39	104
Сухой остаток	мг/л.	1800	15900
Уран,	мг/л (ПДК 0,015 мг/м ³)	4,2	16,2
K^+ ,	мг/л	4	17
Na^+	мг/л	390	2240
Ca^{2+}	мг/л	13	62
Mg^{2+}	мг/л	75	140

На период обследования отмечалась существенная неоднородность распределения радионуклидов в воде, с увеличением глубины их объемная активность возрастала в 2-30 раз. Наблюдалась также и зависимость в распределении активности в воде водоема от местоположения точки пробоотбора в пределах акватории: при приближении к точке сброса отходов от наиболее удаленной западной части Карачая, активность в воде увеличивалась. В наибольшей степени неоднородность распределения была характерна для α -излучателей.

Причины различной неоднородности были связаны с различными формами нахождения радионуклидов в воде: большая часть относительно равномерно распределенных радионуклидов присутствовала в водоеме в подвижных формах и лучше перемешивалась. Альфа-излучающие радионуклиды были сорбированы преимущественно на взвесах, что привело к накоплению активности в придонном слое и в непосредственной близости от точки сброса [18].

Анализ результатов измерений параметров донных отложений и грунтов дна показал что слой придонной воды со взвешенными и легко взмучиваемыми илами незначителен и имеет мощность 10-40 см. Верхний слой донных отложений представляют техногенные илы - 20 см, глубже 10-20 см залегают суглинистые грунты; Также для всех слоев грунтов характерна высокая зольность (80-100 %), свидетельствующая о незначительном содержании в их общей массе органических веществ. Для химического состава грунтов характерно высокое содержание кальция, натрия и железа. Радиоактивное загрязнение грунтов ложа водоема определялось главным образом стронцием-90(+иттрий-90) до $3,4 \cdot 10^{11}$ Бк/кг сух. веса (9,2 Ки/кг сух. веса), цезием-137 до $2,4 \cdot 10^{11}$ Бк/кг сух. веса (6,5 Ки/кг сух. веса) и альфа-излучающими радионуклидами - до $1,60 \cdot 10^{10}$ Бк/кг сух. веса (0,4 Ки/кг сух. веса) [18].

Максимальные значения удельной активности для всех радионуклидов соответствовали верхнему 0-10-сантиметровому слою дна водоема. С возрастающей глубиной активность снижалась на 3 порядка для ^{90}Sr и на 2 порядка для ^{137}Cs , в интервале глубин от 0 до 50 см. В ряде точек пробоотбора так же наблюдались дополнительные максимумы активности альфа-излучателей на глубине 20- 40 см, данное обстоятельство было связано с резко неравномерным поступлением радионуклидов в водоем в течение всего периода эксплуатации. Вследствие этого происходило перекрытие отложений, поступивших в водоем в более ранний период, относительно чистым слоем более новых донных отложений [18].

Согласно проведенному обследованию водоема, значения суммарной активности радионуклидов (данные приведены в таблице 3), накопленных к 2002 году в не засыпанной части водоема В-9, составили (Табл. 6): $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ - $4,4 \cdot 10^{17}$ Бк (12 млн. Ки), ^{137}Cs - $4,4 \cdot 10^{17}$ Бк (12 млн. Ки), суммы β -излучающих радионуклидов - $9,1 \cdot 10^{17}$ Бк (25 млн. Ки), суммы α -излучающих радионуклидов - $3,0 \cdot 10^{16}$ Бк (800 тыс. Ки), при площади водного зеркала около 106 Га.

Таблица 3 – Суммарная активность радионуклидов в воде и грунтах водоема Карачай [18].

Радионуклид / среда водоема	$^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$, Бк (%)	^{137}Cs , Бк (%)	Сумма активности В-излучающих радионуклидов, Бк (%)	U, кг (%)	Сумма активности А-излучающих радионуклидов, Бк
Лед, вода и взвеси	$4 \cdot 10^{16}$ (9)	$5,9 \cdot 10^{16}$ (13)	$9,99 \cdot 10^{16}$ (11)	7000 (44)	$2,59 \cdot 10^{13}$ (1)

Грунты ложа водоема	$3.9 \cdot 10^{17}$ (91)	$3.8 \cdot 10^{17}$ (87)	$8.1 \cdot 10^{17}$ (89)	8900 (56)	$2.96 \cdot 10^{16}$ (99)
Всего, Ки / Бк	$12 \cdot 10^6 / 4,4 \cdot 10^{17}$	$12 \cdot 10^6 / 4,4 \cdot 10^{17}$	$2,5 \cdot 10^7 / 9,1 \cdot 10^{17}$	~16000	$8,0 \cdot 10^5 / 3,0 \cdot 10^{16}$

Химический и радионуклидный состав жидких радиоактивных отходов сбрасываемых в водоем Карачай определялся технологиями основного производства предприятия и объемами производства. Поступление растворов в водоём производилось по специально проложенным трубопроводам, под зеркало воды. Поступление жидких радиоактивных отходов в водоём Карачай было непрерывным процессом. Всего выделялось два основных периода поступления сбросов в водоем [13].

Первый период 1951-1976 года, характеризовался применением ацетатной осадительной технологии. В этот период количество жидких отходов, направляемых в водоём Карачай, было максимальным. Оно составляло от 75 до 140 тыс. м³/год. Этот период также характеризовался максимальными содержаниями солей в жидких радиоактивных отходах, представленных нитратом натрия до (550 г/л), и ацетатом натрия (до 60 г/л), нитрата алюминия (до 35 г/л), и повышенным содержанием железа, хрома, никеля. В этот промежуток времени имела место максимальная активность сбрасываемых отходов, она составляла $4 \cdot 10^{17}$ - $2 \cdot 10^{18}$ Бк/год. В общую активность растворов наибольший вклад вносили короткоживущие радионуклиды: ⁹⁵Zr, ⁹⁵Nb, ¹⁴⁴Ce, ¹⁴⁴Pr [13].

Второй период поступлений сбросов начался с 1976 года. С этого времени начал осуществляться переход на экстракционную технологию. Объем сбрасываемых отходов сократился до 15-20 тыс. м³/год, в их составе появились органические вещества: трибутилфосфат, гексахлорбутадиен, синтин, амины, спирты. Активность сбрасываемых отходов во второй период снижается до $3.7 \cdot 10^{16}$ Бк/год; снижается содержание короткоживущих радионуклидов. После 1973 г. доля ¹³⁷Cs в общей β-активности увеличивается до 25-55%. доля ⁹⁰Sr и ⁹⁰Y - до 25%. [13]

Таблица 4 наглядно демонстрирует изменения химического состава воды водоема Карачай с течением времени [13].

Таблица 4 – Параметры химического состава вод озера Карачай в разные периоды времени [13].

Показатель	10.1954	08.1956	09.1962	02.1969	07.1975	10.1980	05.1985	11.1990	05.1995	06.2000	10.2005
pH	-	9,6	9,0	7,2	9,0	8,2	8,9	7,9	8,1	9,8	9,35
Na ⁺ , г/л	-	21,0	24,0	35,0	10,5	5,8	6,0	6,0	4,0	2,4	1,2
Ca ²⁺ , мг/л	-	-	-	24	50	8	16	21	90	65	10
Mg ²⁺ , мг/л	8	50		25	12	15	6	69	-	32	15

Нитрат-ион, г/л	-	23,4	39,0	74,0	22,5	18,6	14,5	17,4	9,0	3,8	5,6
Ацетат-ион г/л	40,0	39,0	17,0	12,0	3,0	0,8	2,2	2,1	0,1	0,017	-
Хлорид-ион, мг/л	-	-	-	230	127	54	38	90	50	28	22
Сульфат-ион, мг/л	-	-	-	1100	104	190	79	317	106	57	78
Сухой остаток, г/л	81,0	83		120,0	32,0	16	20,4	27,1	14,2	6,7	8,24
Окисляемость мгО ₂ /л	-	-	-	4000	896	152	395	-	200	-	83
Плотность, г/см ³	-	-	-	1,080	1,063	1,010	1,012	1,016	1,006	1,004	-

Из приведённой таблицы следует, что в соответствии с изменением состава и количества жидких отходов сбрасываемых в водоем, в водах Карачая происходило существенное изменение содержания некоторых компонентов. Например содержание нитрата уменьшилось с 70 до 3,8 г/л, ацетата с 40 до 0,017 г/л, сульфата с 1100 до 57 мг/л, хлорида с 230 до 22 мг/л. В целом же, вода в Карачае оставалась слабощелочной с повышенным суммарным содержанием солей и высокой окисляемостью.

Глава 2. Воздействие водного объекта на окружающую среду

2.1 Карачай как источник загрязнения подземных вод

Водопроницаемость геологического массива, то есть его свойство, заключающееся в способности пропускать сквозь себя воду, в значительной степени определяется его трещиноватостью. Обычно неоднородности проявляются на границе двух сред, обладающих различными физико-механическими свойствами, в данном случае такими границами являются поверхности раздела минеральных зерен в горных породах, а также поверхности, разделяющие различные по составу напластования. Неоднородности, как проявление пространственной изменчивости свойств горной породы, обнаруживаются и внутри относительно однородного по физико-механическим свойствам геологического тела, если в различных частях его возникают неравномерно распределенные и некомпенсированные напряжения. Напряжения в массиве горной породы возникают при сжатии его или при растяжении под влиянием возрастающего геостатического давления, при изменении объема породы, связанного с изменением температуры, при гидратации или дегидратации, в ходе литификации породы или ее разуплотнения. Напряжения или, напротив, разгрузка их ослабляют силы сцепления между минеральными зернами или напластованиями в горной породе. Полная потеря сцепления ведет к образованию трещин. Трещины обычно возникают в горной породе как результат суммарного действия одновременно или последовательно проявляющихся факторов в ходе диагенетических или эпигенетических преобразований [19].

Изучение гидрогеологических условий района, в котором располагался водоем Карачай, началось в августе 1951 года, после пребывания на территории предприятия Маяк, комиссии академика Александрова, посвященной решению проблемы радиоактивного загрязнения поймы реки Теча. Тогда на области, прилегающей к озеру Карачай, была выполнена топографическая съемка, промерены глубины озера, по двум взаимно-перпендикулярным створам для изучения характера подстилающих пород пробурено 37 скважин, из которых пять в самом озере [13].

Дальнейшее изучение района происходило в результате комплексных геолого-гидрогеологических работ, проводимых ГПП «Гидроспецгеология», ВНИПИпром-технологии, Уральским проектно-изыскательским институтом и ЦЗЛ ПО «Маяк». Систематические наблюдения за подземными водами были начаты в 1964 году, через систему наблюдательных скважин [13].

Согласно данным исследованиям, породы в районе расположения водоема Карачай характеризуются существенной тектонической, петрофизической и тектонофизической неоднородностью строения. Неоднородность выражается в развитии в различных блоках изучаемой площади трещинных систем различной густоты и направленности. В целом для

территории характерно блоковое строение, отдельные слабо трещиноватые блоки коренных пород разделяются линейными зонами интенсивной трещиноватости. Мощность зоны интенсивной трещиноватости пород составляет 40-60 м, уменьшаясь на участках водораздела Теча - Мишеляк до 20-30 м. Плотность открытых трещин убывает по глубине примерно от 15-25 тр/метр в верхней части разреза до 4-6 тр/метр на глубинах 40-60 м. и до менее 1 тр/метр на глубинах более 70-100 м. Пропорционально количеству открытых трещин изменяется и значение пористости пород [20].

Основными фильтрационными характеристиками горных пород являются их гидродинамические и емкостные параметры. Гидродинамические параметры обуславливают особенности передвижения подземных вод в порах и трещинах пород, а емкостные - объемные содержания в них влаги.

Гидрогеологические параметры подстилающих пород на площади междуречья Теча - Мишеляк изменяются в следующих пределах: коэффициент фильтрации от 0,001 м/сут на нижней границе водоносного горизонта, до 0,3 м/сут. и более в наиболее проницаемой зоне, коэффициент водопроводимости от 2 м²/сут. до 600 м²/сут., причем коэффициенты водопроводимости близмеридиональных направлений превышают аналогичные показатели близширотных направлений в среднем в 2 раза [20].

Максимальная проницаемость массива горных пород приурочена к глубинам 50-75 м здесь коэффициент фильтрации достигает 2-4 м/сут, при этом в середине разреза на глубине 30-50 м выделен крайне слабопроницаемый слой, с коэффициентом фильтрации 0,0003-0,05 м/сут [16].

Подземные воды как природные растворы изначально несут в себе растворенное вещество. Под растворенными веществами подземных вод понимается совокупность различных химических элементов и соединений природного или техногенного происхождения, устойчивых в растворе, по крайней мере, в пределах определенного участка водоносного горизонта, подчиняющаяся общим закономерностям миграции и рассеяния. В зависимости от физико-химических свойств растворенного вещества, факторов миграции и рассеяния выделяются группы сорбирующихся и несорбирующихся; радиоактивных и нерадиоактивных; вступающих в физико-химическое взаимодействие с природными растворами и водовмещающими породами и не вступающих в такое взаимодействие; смешивающихся и несмешивающихся; равных и разных плотностей [21].

Формирование растворенного вещества подземных вод происходит в зависимости от наличия различных природных и искусственных источников и происходит практически на всем пути движения подземных вод от областей питания к областям разгрузки. Подземные воды могут обогащаться веществом за счет породообразующих минералов водовмещающих пород, за

счет скоплений минеральных соединений или от разнообразных источников техногенного происхождения, а в рассматриваемом случае, в результате фильтрации от хранилища радиоактивных отходов, водоема Карачай.

Ликвидация открытой акватории озера не означает полного прекращения его воздействия на окружающую природную среду, так как озёрная впадина находится в области питания водоносного горизонта. Глубина уровня подземных вод в районе расположения водоема Карачай изменяется от 0,2 - 5 м. [20] на придолинных участках, и 15-20 м на участке водораздела Теча - Мишеляк. Питание подземных вод осуществляется благодаря фильтрующимся с поверхности осадкам, поэтому их уровень изменяется в зависимости от водности года. Таким образом, водоём непосредственно связан с зоной насыщения водоносного горизонта. Подобное положение обуславливает вероятность формирования потока-носителя радиоактивных и стабильных загрязняющих веществ из водоема Карачай в подземные воды.

Вещество, попадающее в подземные воды путем фильтрации, подвергается миграции, то есть дальнейшему пространственному перемещению в водной фазе литосферы. Миграция осуществляется вследствие конвекции, диффузии и действия вектора гравитации [21].

Склонение нижней границы коры выветривания определяет общий характер растекания подземных вод от оз. Карачай. Вектор регионального стока подземных вод в рассматриваемом районе ориентирован с запада на восток. Однако нахождение озера на водоразделе верховьев рек Теча и Мишеляк обуславливает общее склонение нижней границы коры выветривания и локальный сток подземных вод на север и юг от него - в направлении долин названных выше рек. В соответствии с этим ореол радиоактивных вод имеет в плане форму линзы, длинная ось которой в ее центральной части изогнута выпуклостью на запад, а на северном и южном флангах - ориентирована на северо-восток и юго-восток (рисунок 3) [16].

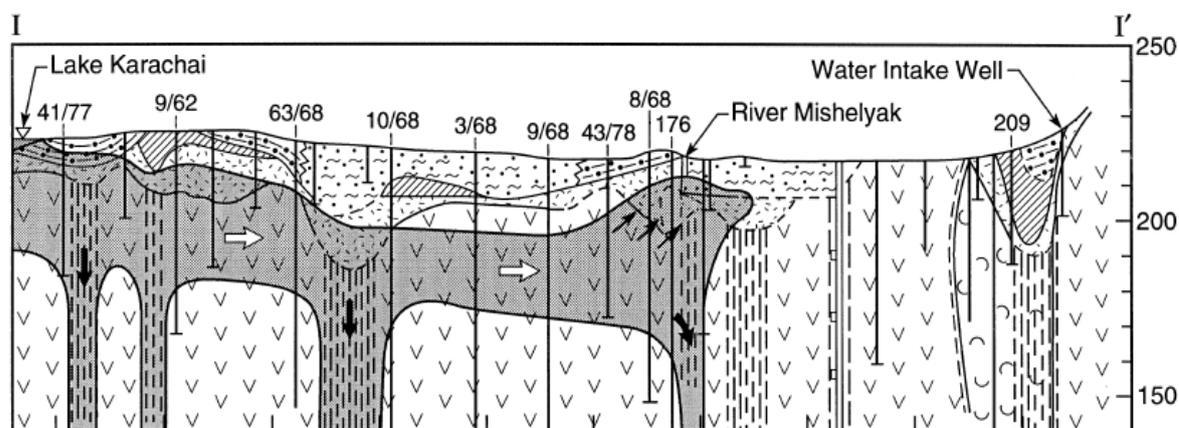


Рисунок 4 – Направление движения потока-носителя загрязняющих веществ в долине реки Мишеляк [22].

В процессе миграции происходит рассеяние вещества. Данное явление представляет собой перераспределение растворенного вещества в большем, по сравнению с начальным

объеме, и сопровождается при этом, уменьшением концентрации вещества в пространстве, относительно избранных начальных точек отсчета.

В связи с этим рассматривают такие факторы рассеяния, как фильтрационная дисперсия, молекулярная диффузия, физико-химическое взаимодействие мигрирующих веществ с водовмещающими породами, заполнение веществом непроточного порового объема пород, радиоактивный распад и другие, действие которых приводит к уменьшению концентрации вещества в подземных водах с удалением от локального источника их поступления [21].

Фильтрационная дисперсия как процесс рассеяния проявляется при конвективном переносе вещества в полностью водонасыщенных фильтрующих средах, в однородных геохимических условиях. Способность рассеивать движущееся в фильтрационном потоке вещество относится к неперенным свойствам пористых и трещинных фильтрующих сред. Известны два механизма фильтрационной дисперсии. Первый обусловлен неоднородностью поля скоростей фильтрационного потока, неравенством скоростей элементарных струек в смежных порах и внутри отдельных пор. Второй связан с пористым или трещинным характером среды, обуславливающим искривление траекторий элементарных струек потока и, как следствие этого, пересечение и слияние струек с разным содержанием индикаторов [21].

Как уже упоминалось ранее, поток компонентов загрязнения исходящий из озера Карачай, представляет собой фильтрационные потери водоема, содержащие в себе техногенные сбросы радиохимического производства, примерный состав которых изложен в таблице 6. За прошедшие пятьдесят лет, в подземные воды, через ложе водоема поступило, по различным оценкам, около 4-5 млн. м³ радиоактивных растворов [22].

В качестве потока-носителя в данном случае выступает поток подземных вод, естественная структура которого осложнена фильтрационными потерями водоема и повышенной плотностью техногенных растворов. Распространение компонентов загрязнения в геологическом массиве происходит вследствие конвекции и определяется структурой потока-носителя и его действительной скоростью. Миграция растворенного вещества техногенных растворов с потоком-носителем происходит по ореольной схеме, то есть сопровождается рассеянием, уменьшением концентрации компонентов загрязнения в направлении вектора рассеяния.

В качестве факторов рассеяния в данном случае выступают фильтрационная дисперсия, радиоактивный распад и физико-химическое взаимодействие растворенного вещества с твердой фазой фильтрующей среды, в данном случае вулканогенными трещиноватыми породами [21].

По миграционной способности, компоненты химического состава воды озера Карачай можно разделить на следующие четыре группы.

К первой группе будут относиться стабильные анионы и нейтральные комплексы: нитрат-ион, нитрит-ион, ацетат-ион, сульфат-ион, хлор-ион. Основным фактором рассеяния для компонентов этой группы является фильтрационная дисперсия. Ореолы рассеяния компонентов этой группы отличаются высокой способностью к миграции. По этой причине представитель этой группы - нитрат-ион - избран в качестве индикатора загрязняющего вещества. Определяющим признаком этой группы является линейная корреляция концентраций компонентов и концентраций индикатора. Линейная корреляция прослежена для пары нитрат-ион - ацетат-ион [23].

Ко второй группе будут относиться стабильные катионы: натрий, кальций, магний. Основными факторами рассеяния для этих компонентов являются фильтрационная дисперсия и физико-химическое взаимодействие с твердой фазой фильтрующей среды.

К третьей группе будут относиться радиоактивные элементы, мигрирующие в форме анионных и нейтральных комплексов:

а) с периодом полураспада менее 15 лет: ^3H , ^{106}Ru , ^{60}Co . Основные факторы рассеяния компонентов подгруппы являются фильтрационная дисперсия и радиоактивный распад.

б) с периодом полураспада более 15 лет: ^{241}Am . Эффект распада радиоактивных элементов с периодом полураспада менее 15 лет на реальных путях миграции заметен, при периоде полураспада более 15 лет пренебрежимо мал. Определяющим признаком этой подгруппы является корреляция концентраций радиоактивных элементов и элемента-индикатора. Такая зависимость прослежена для пар нитрат-ион- ^{106}Ru , нитрат-ион- ^{60}Co и т.д. Основным фактором рассеяния для компонентов данной подгруппы - фильтрационная дисперсия.

Четвертую группу будут составлять радиоактивные элементы, мигрирующие в форме катионов и катионных комплексов:

а) с периодом полураспада менее 15 лет: ^{144}Ce , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{125}Sb . Основные факторы рассеяния для компонентов этой подгруппы будут фильтрационная дисперсия, физико-химическое взаимодействие с твердой фазой массива, радиоактивный распад.

б) с периодом полураспада более 15 лет: ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{239}Pu , ^{238}U , ^{237}Np . Здесь основным фактором рассеяния будет фильтрационная дисперсия и физико-химическое взаимодействие с твердой фазой.

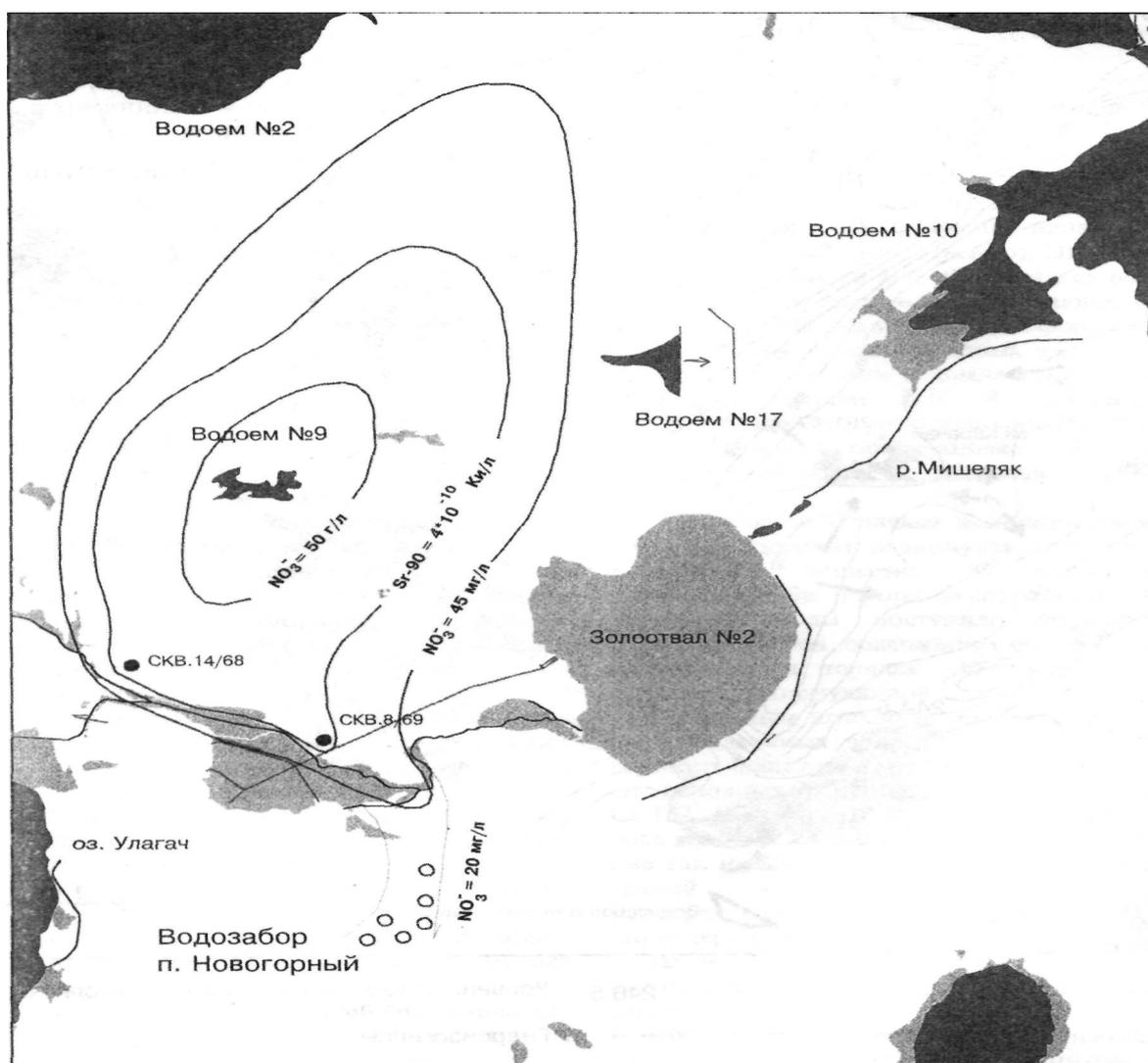


Рисунок 5 – Распространение загрязнения от водоема Карачай [23]

Средняя скорость продвижения фронтальной части южного ореола (отражена на рисунке 5), по данным 20-летних наблюдений, составляет около 0.2 м/сут (73 м/год), в том числе по нитрат-иону и ^{90}Sr - 0.23 м/сут, по ^{60}Co - 0.14 м/сут. Средняя скорость продвижения неразбавленных растворов, фильтрующихся от В-9, составляет 0.17 м/сут. [23].

Сформировавшийся в подземных водах ореол рассеяния по каждому загрязняющему компоненту в большей своей части характеризуется относительно стабильным состоянием, то есть наблюдается колебание содержаний около постоянных для каждой точки величин. Фронтальные части ореола характеризуются менее стабильным состоянием за счет изменяющегося, от степени разбавления чистыми водами, содержания загрязняющих компонентов.

Замедление миграционных процессов происходит вследствие проявления сорбционных свойств пород водоносного горизонта. Способность к сорбции разных компонентов не одинакова: нитрат-ион, тритий, ацетат - ион, хлорид-ион свободно мигрируют в форме анионов и нейтральных комплексов, скорость их распространения практически равна действительной

скорости потока; радионуклиды, мигрирующие в катионной форме и в форме сложных комплексов такие как ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{144}Ce , ^{95}Zr достаточно хорошо сорбируются, и их распространение замедлено по сравнению с действительной скоростью потока подземных вод [24].

Однако, не смотря на сорбционное замедление, южная фронтальная часть ореола загрязнения по ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^3H , ^{60}Co достигла поймы реки Мишеляк в начале 2000-ых годов (таблица 5) [25].

Таблица 5 Содержание радионуклидов в подземных водах в СЗЗ ПО «Маяк» и водах р. Мишеляк в 2004 г.(данные ЦЗЛ ПО «Маяк») [26].

Пункт контроля	Дата отбора проб	Объемная активность, Бк/л		
		^{90}Sr	^3H	^{60}Co
р. Мишеляк, выходной створ	Март	1.5	150	<5
	Июль	0.7	190	<5
	Сентябрь	0.4	60	<5
	Средняя	0.86	133	5

Если проанализировать данные ежегодников «Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств» с 2004 по 2018 годы [26-30], то становится очевидно, что поступление активных веществ в реку продолжается. На данный момент в ее водах присутствует ^{90}Sr (рисунок 6).



Рисунок 6 – Содержание ^{90}Sr в воде реки Мишеляк 2004-2017 годы [26-30].

Так же на протяжении двадцати лет в водах реки Мишеляк обнаруживается ^3H (рисунок 6).



Рисунок 7 – Содержание ^3H в воде реки Мишеляк 2004-2017 годы [26-30].

Еще в воде реки Мишеляк присутствует ^{137}Cs , однако его содержание, начиная с 2013 года, постепенно идет на снижение.



Рисунок 8 – Содержание ^{137}Cs в воде реки Мишеляк 2006-2017 годы [26-30].

Несмотря на то что, уже в 1956 году было известно о том, что радиоактивные вещества из накопителя отходов Карачай поступают в подземные воды, и поэтому сбросы в этот объект необходимо сокращать и прекратить вовсе до начала 1960 года [11], они продолжились в течение нескольких десятков лет. Вследствие этого, на месте бывшего верхового болота появился неконтролируемо расширяющийся источник радиоактивного загрязнения подземных вод на площади более 20 км².

2.2 Загрязнение окружающей территории вследствие ветрового разноса активной пыли

Вследствие длительного периода производства сбросов активных отходов в акваторию водоема Карачай, данный водный объект стал источником загрязнения подземных вод в районе своего расположения, как было рассмотрено выше.

Однако в литературе имеются неоднозначные данные, что водоем так же являлся источником загрязнения радионуклидами близлежащих к нему территорий, путем переноса их с берегов озера ветром. Наиболее значимым в плане разноса загрязнения выделяется 1967 год, тогда по разным оценкам с берегов озера на окружающую территорию было вынесено от $2.22 \cdot 10^{13}$ [31] до $2.22 \cdot 10^{14}$ Бк [32] активности. Согласно этим данным, загрязнению подверглась территория, включающая населенные пункты, площадью около 1800 км². Загрязненная площадь показана на рисунке 9.

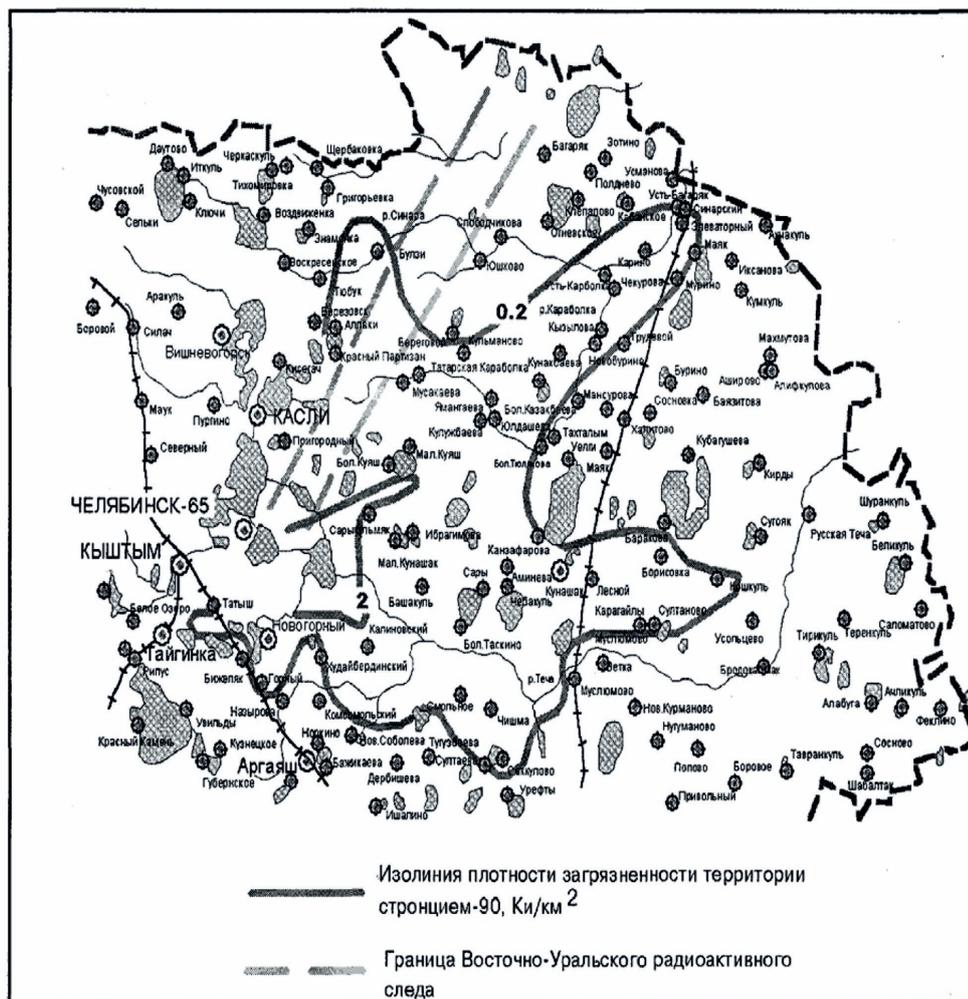


Рисунок 9– Карта-схема загрязнения территории, окружающей водоем Карачай, в 1967 году [31].

Официальное объяснение данного инцидента заключалось в том, что имели место радиоактивные выпадения, причиной которых стала неблагоприятная погодная обстановка, и неподготовленность промышленного водоема к изменению природных условий.

Анализ рисунка 10, на котором отмечена зависимость изменения площади акватории озера Карачай от конкретного года, показывает, что условия для поднятия радиоактивной пыли с его берегов существенно не менялись в период: 1965-68 гг. То есть процесс уменьшения

акватории начался в 1965 году, достигнув в нем наибольшего размаха, и в меньшей мере продолжался в 1966-67 годы.

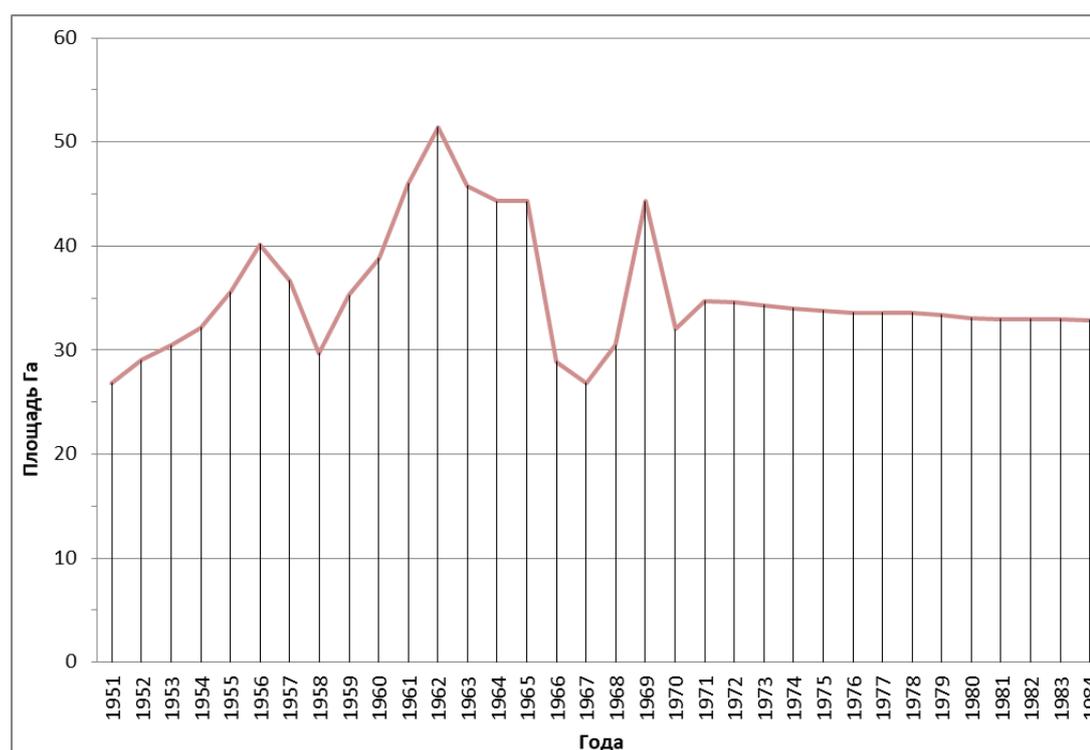


Рисунок 10 – Динамика изменения акватории озера Карачай 1951-1983 годы (выполнено автором).

Более того в работах (Оценка радиационной обстановки на территории, загрязненной в результате ветрового переноса радиоактивных аэрозолей в районе предприятия в 1967 году: реферат отчета 1968 года) [31], (Челябинская область : ликвидация последствий радиационных аварий) [32] и многих других источниках литературы, практически не уделяется внимания «реконструкции» фоновой обстановки на рассматриваемой территории в период, предшествующий предполагаемому инциденту. Суммарная активность, вынесенная в окружающую среду, составляет менее $\sim 0.00001\%$ от активности ЖРО содержащихся в неизолированном хранилище [13], что практически не поддается прямым оценкам любыми «разумными» методами.

Кроме всего прочего озеро Карачай находится всего в 400 метрах от радиохимического Завода Б. Поэтому в любом случае было бы трудно определить источник радионуклидов, в так называемом карачаевском следе по розе ветров, так как ветровой разнос радионуклидов при аварии на заводе происходил бы в ту же сторону, что и при сдуве пыли с берегов Карачая.

Однако при рассмотрении данной ситуации становится заметным отсутствие простейших превентивных мер в начале эксплуатации водоема, предпринимаемых предприятием для недопущения возникновения подобных инцидентов, таких как отсыпка береговой линии, своевременный долив чистой воды. Так же существовала сложность

использования водоема под накопитель активных отходов, ввиду его расположения в области с высоким уровнем испарения.

Благодаря существующему в природе круговороту воды, на планете постоянно происходят процессы испарения. Например, с поверхности суши ежегодно испаряется $69,5 \cdot 10^{12}$ м³ воды [33], при ее площади $1,5 \cdot 10^{14}$ м², следовательно, с каждого квадратного метра поверхности суши испаряется $46,3 \cdot 10^{-2}$ м воды в год. Океан же испаряет около $5,05 \cdot 10^5$ км³/год пресной воды в атмосферу [33], что при его площади $3,6 \cdot 10^8$ км² равно слою около 1,4 м. с 1 м² площади.

Согласно основному, на данный момент, методическому пособию по расчету испарения [34], средние многолетние величины испарения с водоемов площадью менее 40 км² рекомендуется определять путем умножения известной средней многолетней величины испарения с водной поверхности испарительного бассейна площадью 20 м² (рисунок 11), на определенные коэффициенты.

При дальнейшем возрастании площади (свыше 20-40 км²) интенсивность испарения с водной поверхности монотонно уменьшается, асимптотически приближаясь к величине интенсивности испарения с морей и океанов [35].

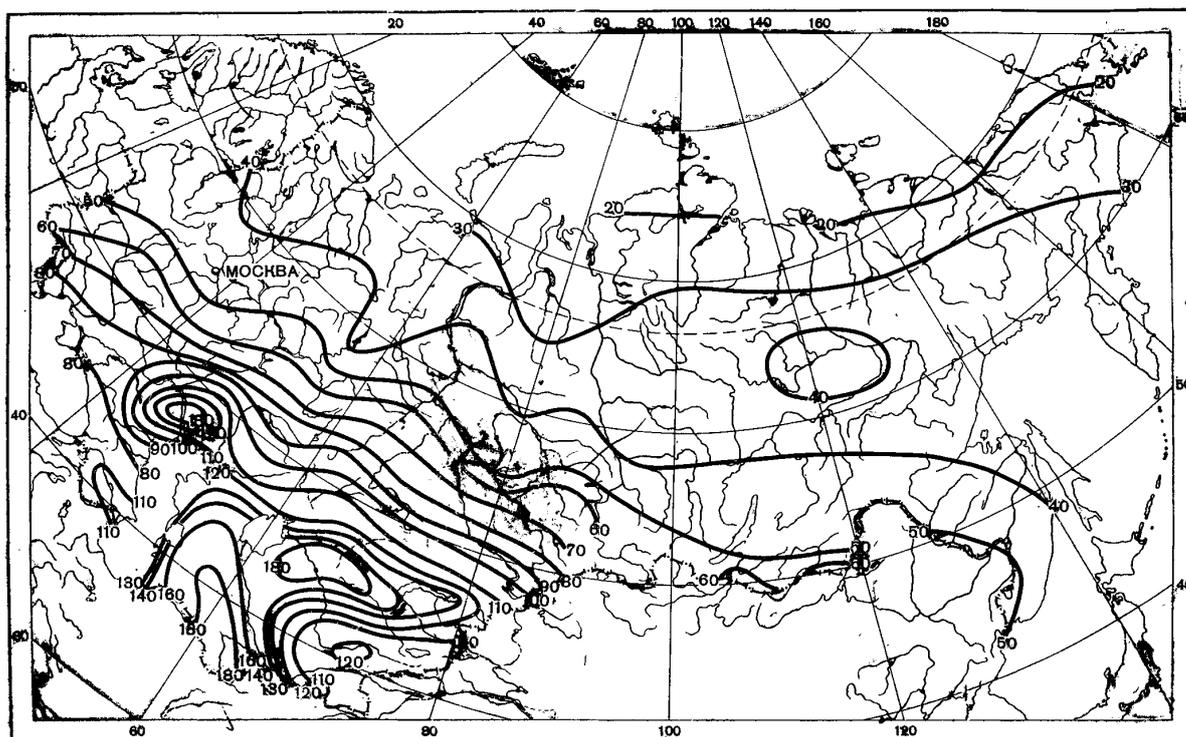


Рисунок 11– Средняя многолетняя величина испарения с водной поверхности испарительного бассейна площадью 20 м² (в см) [34].

Испарение с водоема E_0 (в см) в этом случае определяется по формуле 1:

$$E_0 = E_{20} \cdot K_H \cdot K_{\text{защ}} \cdot \beta, \text{ см/год (1),}$$

где E_{20} - испарение с бассейна площадью 20 м² в см (рисунок 11), K_H - поправочный коэффициент на глубину водоема (таблица 6); $K_{защ}$ - поправочный коэффициент на защищенность водоема от ветра древесной растительностью, строениями, крутыми берегами и другими препятствиями. (таблица 7), β - поправочный коэффициент на площадь водоема. (таблица 8) [33].

Таблица 6. Поправочные коэффициенты на глубину водоема K_H [34].

Местоположение водоема	Глубина водоема, м					
	2	5	10	15	20	>25
Тундровая и лесная зоны	1,00	0,99	0,97	0,95	0,94	0,92
Лесостепная зона	1,00	0,98	0,96	0,95	0,94	0,92
Степная зона	1,00	0,96	0,95	0,94	0,93	0,93
Зона полупустынь	1,00	1,00	0,99	0,98	0,98	0,97
Зона пустынь	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Таблица 7. Коэффициенты уменьшения испарения с защищенных водоемов $K_{защ}$ [34].

$h/L_{ср}$	0,01	0,03	0,05	0,07	0,10	0,20	0,30	0,40
$K_{защ}$	0,96	0,89	0,84	0,80	0,76	0,70	0,64	0,57

Таблица 8. Поправочные коэффициенты β на площадь водоема [34].

Площадь водоема, км ²	0,01	0,05	0,1	0,5	1,0	2,0	5,0
Коэффициент β	1,03	1,08	1,11	1,18	1,21	1,23	1,26

Для водоема, находящегося в приблизительных географических координатах к озеру Карачай, формула (1) будет иметь следующий вид:

$$E=60\text{см}\cdot 1\cdot 0,96\cdot 1,08=62,208\text{ см/год.}$$

Таким образом, с каждого квадратного метра акватории данного условного водоема, в год, будет происходить испарение объема воды 0.62.2 м³.

Подобное обстоятельство говорит нам о сильной зависимости поддержания уровня воды в таком водоеме от осадков, а так же высоком риске использования подобного водоема, под открытый накопитель РАО, без технического обустройства его берегов.

Водоем Карачай не явился исключением при использовании. При средней глубине 1,5 метра [15], в связи со столь высоким объемом испарения, Карачай постоянно менял месторасположение береговой линии, в зависимости от количества осадков в конкретном году.

С началом эксплуатации водоема Карачай, как хранилища жидких радиоактивных отходов, он перестал быть пересыхающим. В течение первых семи лет использования, в результате увеличивающихся объёмов сбросов, в водном объекте наблюдался рост уровня

воды, который привел к возрастанию площади его водного зеркала, что наглядно отражено на рисунке 10. Однако в результате засухи в 1958 году (за год выпало 247,7 мм осадков) произошло резкое понижение уровня воды на 0,7 м и сокращение объема акватории. Данный погодный катаклизм привел к пересыханию мелководных участков и обнажению дна, содержащего активные илы [32].

Каких либо данных, о разnose активности на соседнюю территорию, из-за этого инцидента, в литературе не встречается, что так же является странным, по сравнению с масштабом описываемого в литературе случая разноса радионуклидов в 1967 году.

Ликвидация возникшей ситуации была осуществлена путём доливания в водоем около 92 тыс. м³ чистой воды. Долив воды, продолжался в 1961 г. и в начале 1962 г.; за этот период было долито около 600 тыс. м³ воды [36].

Обильные подпитки 1961-62 гг. без какого либо укрепления береговой линии привели снова к росту уровня воды в Карачае, и затопления им соседних территорий. В мае 1962 г., отметка уровня воды в озере составила 251,07 м, а общая площадь хранилища, достигла 530 тыс. м² [37].

Несмотря на полученный опыт 1958 и 1962 годах, предприятием-эксплантатом не было принято каких либо конкретных мер по укреплению берегов и не разработано планов действий в зависимости от метеорологических условий, следствием чему и стала авария 1967 года. Ликвидация ее последствий включала работы по отсыпке загрязнённых участков побережья и части мелководья суглинистыми грунтами и отсыпку каменно-набросного откоса берегов водоёма. Работы по засыпке прибрежной полосы и участков мелководья суглинистыми грунтами производились в 1967-1968 гг. В результате этих работ была засыпана площадь в 19 тыс. м², отметки поверхности прибрежной полосы по всему периметру оказались поднятыми на 1,7-3,0 м. Работы по созданию каменно-набросного откоса водоёма-9 велись в 1969-1971 гг. В результате выполненных инженерных работ по обустройству бывшее озеро с блюдцеобразной чашей дна было преобразовано в водоём с крутыми береговыми откосами. Кроме того, технический регламент эксплуатации хранилища стал предусматривать поддержание уровня в нём в заданном интервале отметок; при снижении уровня ниже предписанного минимума происходила подпитка водоёма сбросами из промканализации [38].

Принятые после аварии 1967 г. меры по инженерному дооборудованию водоёма Карачай и строгому регламентированию эксплуатационных отметок уровня воды, привели к тому, что с начала 1970-х до середины 1980-х гг. площадь открытого зеркала водоёма Карачай оставалась практически постоянной, тем самым исключалась возможность обнажения участков дна озера, содержащая высокоактивные илы.

При должном уровне контроля над водоемом, наиболее реальным вариантом разноса значительного количества активности является возникновение в районе расположения водного объекта опасных гидрометеорологических явлений. А именно, прохождение над акваторией смерча.

Смерчи относятся к одним из наиболее опасных метеорологических явлений. Они могут оказывать поражающее воздействие на людей, сельскохозяйственных животных и растения, объекты экономики и окружающую среду.

Опасные свойства смерчей обусловлены: а) ударным эффектом очень сильного ветра при прохождении стенки смерча; б) резким падением давления при прохождении центральной области смерча; в) воздействием захваченных смерчем летящих предметов. Кроме того, большинство смерчей сопровождается грозами и крупным градом [39].

Смерчи генерируют сильные электромагнитные поля, сопровождаются молниями и шаровыми молниями, смерчи могут вызвать наводнения и пожары, могут захватывать и переносить на некоторое расстояние различные предметы и содержимое водных объектов [38]. Поэтому, пространственно-временное распределение смерчей необходимо учитывать на этапе проектирования опасных производственных объектов, к которым и относятся объекты использования атомной энергии.

Возникновение смерчей связано с очень сильной неустойчивой стратификацией в нижних слоях атмосферы, формированием мощной кучеводождевой облачности и грозами. Близость атмосферных фронтов стимулирует образование смерчей. Над сушей смерчи возникают в теплый период года. Скорость движения стенки смерча может достигать 140 м/с при сильных восходящих потоках воздуха (до 70-90 м/с). Перепад давления между периферией и центром вихря может составить 249 ГПа [40].

В силу своих особенностей смерч за короткое время в состоянии совершить катастрофические разрушения практически любых техногенных объектов. В случае разрушения объектов атомной отрасли, сформировать в пограничном слое атмосферы облако радиоактивных аэрозолей, что негативно изменит состояние окружающей среды, и может серьезно повлиять на радиационную безопасность в районе расположения [40].

Согласно документу: «Рекомендации по оценке характеристик смерча для объектов использования атомной энергии», интенсивность наблюдаемых смерчей в России оценивается по шкале Фуджиты (ПРИЛОЖЕНИЕ 2)

Так же, согласно [14], Челябинская область расположена частично в смерчопасном районе (рисунок 14).

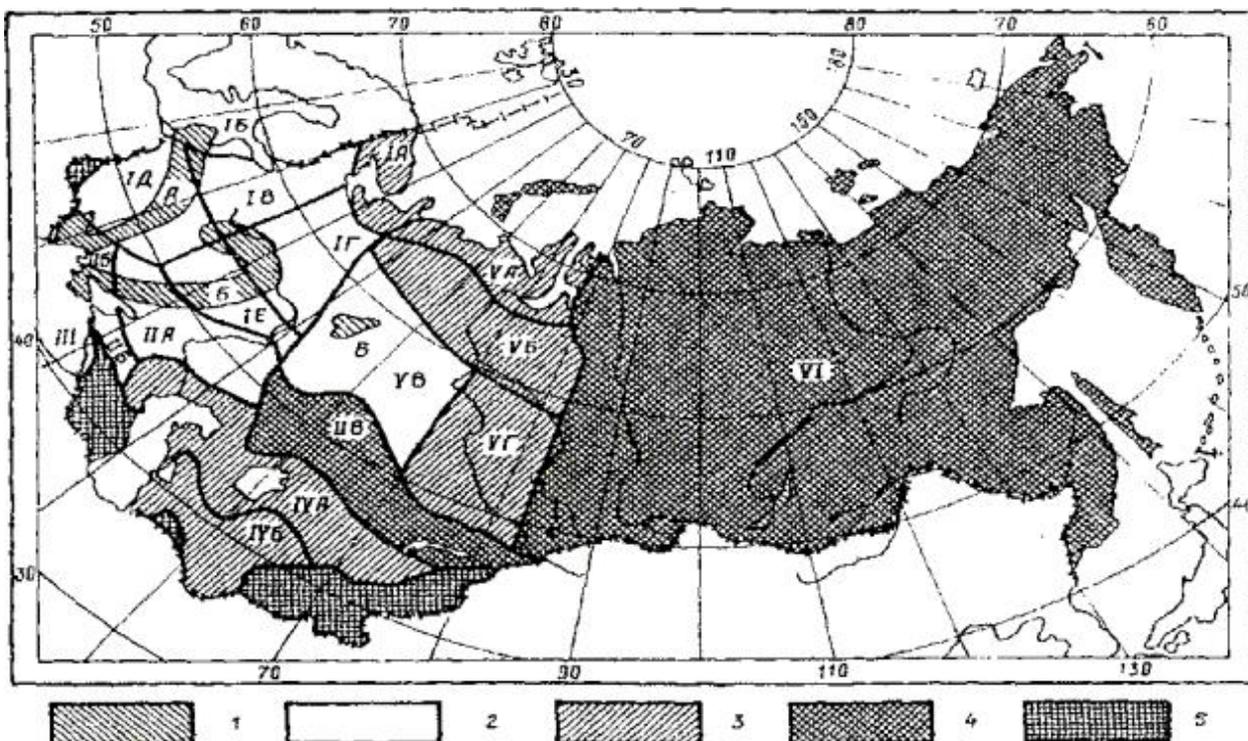


Рисунок 12 – Карта-схема смерчопасных районов России [39].

Примечание к рисунку 12. 1- зоны повышенной смерчопасности; 2 - смерчопасные районы; 3 - несмерчопасные районы; 4 - малоизученные районы; 5 - горные районы

Всего с 1957 по 2015 годы, на территории области было зарегистрировано 18 смерчей.

Самый сильный из них произошел 27 июля 1971 г. Он был отмечен на севере Челябинской области, в районе села Тюбук Каслинского района, т.е. примерно в 50 км к северо-востоку от промплощадки ФГУП "ПО "Маяк". За 10-15 минут смерч промчался через село, сокрушая все на своем пути: снес крыши с домов, повалил заборы, сломал деревья, порвал провода. Так же им было уничтожено почти 100 га соснового леса. Зона разрушений была длиной около 10 км и шириной 200- 300 м [8].

Если для наглядности отметить предполагаемые координаты «прохождения» всех зарегистрированных смерчей на карте-схеме (рисунок 13), то становится заметным повышенная частота их образования в районе, расположенном юго-восточнее озера Карачай.

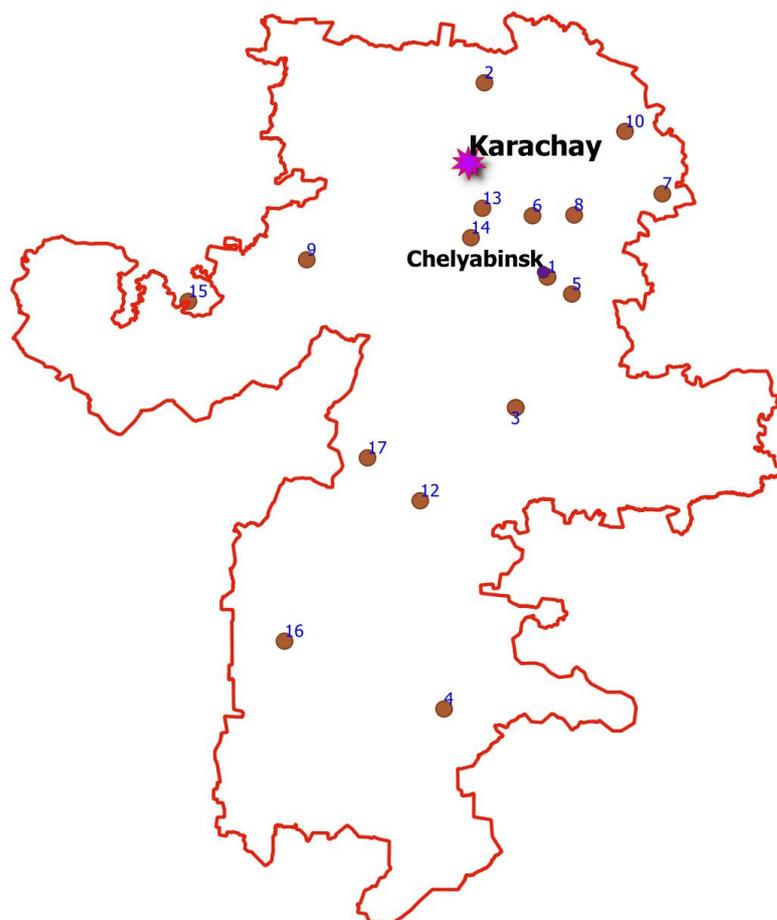


Рисунок 13 – Зарегистрированные смерчи на карте-схеме области (выполнено автором).

Однако, подавляющее большинство из зарегистрированных на территории области смерчей, ПРИЛОЖЕНИЕ 3 по степени интенсивности воздушных потоков были нулевого и первого класса интенсивности. Следовательно, они не могли нанести существенного ущерба техногенным и природным объектам.

Вероятность же прохождения смерча категорией выше второй, непосредственно над акваторией водоема Карачай стремится к нулю.

Глава 3. Изучение возможности переноса активного аэрозоля из акватории озера Карачай на окружающую территорию

3.1 Общие представления о водном аэрозоле и механизмах его образования

На нашей планете имеется много источников аэрозолей³ [42]. В качестве таковых можно отметить: поверхность суши, поверхностных вод, извержения вулканов, лесные пожары, хозяйственную деятельность человека, а так же химические и фотохимические реакции в атмосфере. При химических и фотохимических реакциях аэрозольные частицы образуются из продуктов реакций сернистого газа, органических соединений, аммиака, сероводорода, окислов азота и некоторых других газов с окислителем из озона [43].

По различным оценкам, общее количество аэрозолей попадающих в атмосферу Земли, составляет около $2 \cdot 10^9$ - $1,2 \cdot 10^{10}$ т/год [44].

Поверхность суши, является наиболее мощным источником аэрозольных частиц, находящихся в атмосфере, давая по различным косвенным оценкам примерно 50% их массы. Вторым по мощности источником аэрозолей является водная поверхность, ее доля составляет около 20 % массы аэрозольной материи в воздухе [45].

Находящиеся в атмосфере аэрозольные частицы, имеют широкий диапазон размеров. Они могут состоять как из нескольких кластеров молекул, диаметром < 1 мкм, так и являться крупными пылинками диаметром до 10 мкм. Точное определение наибольших размеров аэрозольных частиц затруднено, так как в разных погодных условиях частицы одного и того же размера могут выпадать из атмосферы, а могут и довольно длительное время находиться взвешенными в воздухе. По Х.Юнге эта граница равна около 20 мкм. Однако во время пылевых бурь верхний предел размеров находящихся в воздухе частиц может составлять более 100 мкм [46].

Всего по размеру выделяются три основных класса аэрозольных частиц: а) мелкодисперсные ($r \leq 0,1$ мкм), б) среднедисперсные ($0,1$ мкм $< r < 1$ мкм) и в) грубодисперсные ($r \geq 1$ мкм) [46].

Водный аэрозоль может попадать в земную атмосферу благодаря наличию определенных механизмов [45].

Первым механизмом появления частиц воды в воздухе, является сдувание брызг с гребней разбивающихся волн (рисунок 14).

³ Аэрозоли — активные в химическом отношении частицы, находящиеся в воздушной среде [1].



Рисунок 14 – Образование частиц от брызг волн [46].

Однако основным механизмом поступления в атмосферу водного аэрозоля считается механизм, состоящий из образования мелких капель, при лопанье огромного числа пузырьков воздуха, поднимающихся к поверхности водоема со дна. (рисунок 15). Перенос вещества в атмосферу пузырьками происходит не только при штормовом волнении, но и в спокойную погоду, когда воздушные пузырьки поднимаются к поверхности и лопаются.

По существующим оценкам, около 0,3 % поверхности Мирового океана покрыто воздушными пузырьками, при этом ежесекундно лопается не менее 10^{18} - 10^{20} пузырьков, около $2,8 \cdot 10^7$ пурьков с каждого квадратного метра водной поверхности. Данные пузырьки вносят в земную атмосферу в общей сложности 10^9 т/год органических и неорганических веществ, то есть примерно $2,8 \text{ г/м}^2$ вещества в год [45].

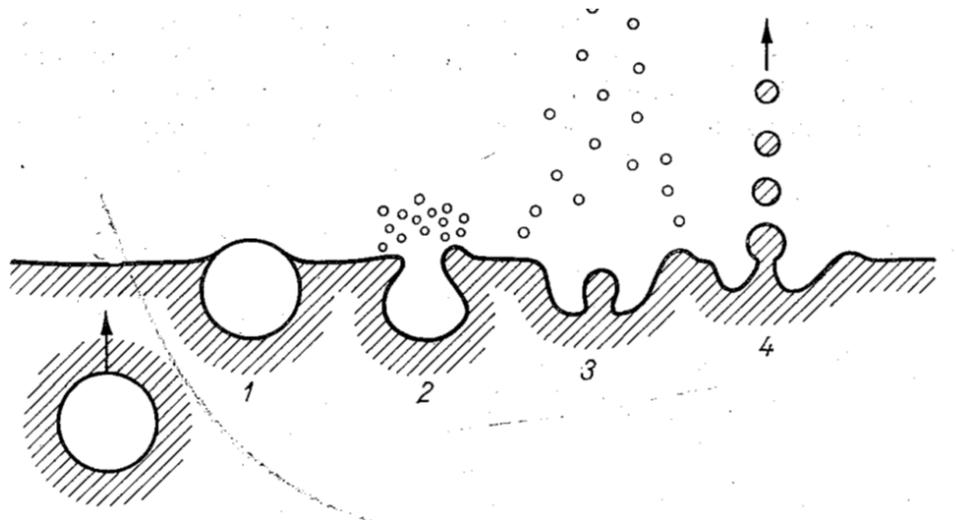


Рисунок 15 – Схема выхода пузырька на поверхность [33].

Образование пузырьков в природных водоемах происходит частично при захвате воздуха волнами, но гораздо в большей степени при увеличении содержания микропузырьков газа в воде, поднимающихся к поверхности. В толще вод эти микропузырьки образуются при различных биологических процессах, при адсорбции газов на взвешенных частицах [33].

Выделяются две стадии в развитии механизма разрыва, обуславливающие возникновение в приповерхностном слое воздуха взвешенных капель двух диапазонов дисперсности (рисунок 17).

На первой стадии пузырек, при достижении водной поверхности или при образовании на ней, имеет верхушку, являющуюся частью общей границы раздела океан-атмосфера. С момента образования пузырька, его верхушка начинает быстро уменьшаться благодаря гравитационному осушению в областях отрицательной кривизны у границ пленки. Наступающая затем деструкция пузырька сопровождается резким сокращением пленки лопнувшей верхушки (2). Жидкость сокращающейся пленки лопнувшей верхушки пузырька под действием сил поверхностного натяжения со скоростью порядка десятков метров в секунду стремительно направляется к горловине еще сохраняющейся подводной части пузырька и собирается в тороидальное кольцо. Благодаря образующимся градиентам поверхностного натяжения, градиентам толщины и микротурбулентности происходит частичная дезинтеграция этого тороуса, сопровождающаяся образованием капелек, движущихся почти параллельно поверхности воды. Самые тяжелые капли этого сорта, за исключением особо турбулентных областей, не в состоянии находиться во взвешенном состоянии в приповерхностном слое воздуха. Часть этих тяжелых капель может падать во внутрь образовавшейся полости лопнувшего пузырька и участвовать во второй стадии рассматриваемого процесса. Часть более мелких капелек увлекается вверх потоком воздуха, вырвавшимся из лопнувшего пузырька, образует грибовидное облачко над полостью пузырька и способна существовать во взвешенном состоянии непосредственно над поверхностью воды. Число этих взвешенных капелек, образовавшихся от одного лопнувшего пузырька, варьирует в пределах 100—200, а солевые аэрозольные частицы, остающиеся при испарении этих капель, характеризуются максимальным диаметром около 0,9 мкм [45].

Во второй стадии тороус со стремительным ускорением порядка около 10^3 — 10^6 g перемещается ко дну пузырька под действием давления, обусловленного кривизной поверхности пузырька. При достижении тороусом дна пузырька дальнейшее развитие процесса идет по пути формирования симметричных выбросов вверх и вниз - «фонтанчиков». В формировании выброса вверх принимают участие слои жидкости, составляющие стенки пузырька. Образующийся выброс-фонтанчик в форме цилиндрической струйки, далее распадается на поток капелек диаметром порядка 0,1 размера пузырька. Наиболее мелкие пузырьки, образующиеся за счет развивающихся небольших волн, имеют диаметр около 100 мкм. Следовательно поперечный размер наиболее мелких капель этого рода составляет около 10 мкм, что соответствует диаметру солевой частицы 2- 2,5 мкм и более [45].

Химический состав содержащихся в атмосфере аэрозольных частиц должен примерно соответствовать химическому составу сухого остатка воды. Для частиц, образовавшихся из морской воды, химический состав является примерно следующим: NaCl - 78%, MgCl₂ - 11 %, CaSO₄, Na₂SO₄, K₂SO₄ - 11 %. Однако в химическом составе водного аэрозоля могут быть и отличия от процентного содержания веществ в воде. Причем отклонения от ожидаемого химического состава морских солей могут быть весьма различны. Химический состав аэрозоля может быть близким к сухому остатку воды, но и в нем может наблюдаться обогащение микроэлементами, с коэффициентами обогащения относительно воды порядка 10-100 раз [46].

Данное обстоятельство объясняется наличием на поверхности воды поверхностно-активной пленки толщиной менее 150 мкм собирающая на себя ионы с высоким ионным потенциалом из среды, где их концентрация относительно мала. Для океана роль таких молекул-адсорбентов, образующих поверхностно-активные пленки, могут играть как неорганические, так и органические вещества. В силу этого обстоятельства адсорбционный механизм обогащения поверхностного микрослоя ионами микроэлементов усиливается биологическим механизмом, а именно, поверхностные органические пленки на поверхности моря становятся средой обитания разнообразных бактерий, результатом жизнедеятельности которых является выделение из морской воды определенных микроэлементов. Последнее может стать причиной обогащения микроэлементами пленки пузырьков, а, следовательно, и солевого аэрозоля [46].

Другой причиной обогащения солевых частиц микроэлементами является прямое испарение из поверхностного слоя, нагреваемого солнечным излучением, вследствие этого процесса, происходит накопление элементов, не испаряющихся вместе с водой [49].

3.2 Расчет объема и активности аэрозоля, образываемого с поверхности акватории

Для того чтобы рассчитать характеристики количества радионуклидов или плотностей загрязнений в радиоэкологии используется понятие активность, однако для определения степени воздействия вещества на окружающую территорию зачастую является необходимым понимать о каком же количестве вещества в граммах идет речь. Нам известна активность воды в озере Карачай в разные периоды времени его существования. Однако для расчета объема образываемого с поверхности озера аэрозоля необходимо иметь представление об удельной массе наиболее значимых радиоактивных веществ содержащихся в воде озера. Для этого нам необходимо найти вес 1 Бк основных содержащихся в воде озера Карачай долгоживущих радионуклидов. По существующему определению 1 Бк это есть 1 распад в секунду, то есть

$$1 \text{ Бк} = -dN/dt = \lambda \cdot N = (0,693/T_{1/2}) \cdot N, \text{ формула 2 [7].}$$

Активность 1 Бк каждого радионуклида всегда обусловлена $N = 1/\lambda$ атомами и следовательно 1 Бк вещества, состоящего из радионуклидов с массовым числом A и периодом полураспада $T_{1/2}$, весит m_1 Бк.

Таким образом, $m_1 \text{ Бк} = (T_{1/2}/0,693) \cdot (A/6,02 \cdot 10^{23}) = 0,24 \cdot 10^{-23} T_{1/2} \cdot A$, грамм.

Рассчитаем по этой формуле массу 1 Бк ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{60}C .

$$m_1 \text{ Бк}^{90}\text{Sr} = 90 \cdot (0,24 \cdot 10^{-23}) \cdot (9,18 \cdot 10^8) = 1,983 \times 10^{-13} \text{ грамм};$$

$$m_1 \text{ Бк}^{137}\text{Cs} = (0,24 \cdot 10^{-23}) \cdot (9,54 \cdot 10^8) \cdot 137 = 3,137 \times 10^{-13} \text{ грамм};$$

$$m_1 \text{ Бк}^{60}\text{C} = 1,7 \cdot 10^8 \cdot 60 \cdot 0,24 \cdot 10^{-23} = 2,448 \times 10^{-14} \text{ грамм}.$$

Далее необходимо определить удельную и молярную массу данных радиоактивных веществ в воде озера. Для нахождения удельной массы, необходимо умножить массу одного Бк на общее количество Бк в воде необходимых для расчета веществ. Для нахождения молярной массы удельную массу разделим на молярную. Полученные значения занесем в таблицу 9.

Таблица 9. Массовое содержание активных элементов в воде озера Карачай.

Радионуклид, дата взятия пробы.	Содержание в воде на дату опробования, Бк/л.	Масса 1 Беккереля вещества, грамм	Содержание в воде, г/л	Содержание моль/литр
10.1956				
^{90}Sr	$7,4 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^{-13}$	$7,3 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$
^{137}Cs	$9,0 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^{-13}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$
^{60}C	$3,8 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^{-14}$	$9,3 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-8}$
08.1969				
^{90}Sr	$1,4 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^{-13}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-7}$
^{137}Cs	$7,0 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^{-13}$	$21 \cdot 10^{-5}$	$16 \cdot 10^{-7}$
^{60}C	-	$2 \cdot 10^{-14}$	-	-
11.07.1975				
^{90}Sr	$2,8 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^{-13}$	$5,5 \cdot 10^{-5}$	$6,2 \cdot 10^{-7}$
^{137}Cs	$9,3 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^{-13}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-7}$
^{60}C	-	$2 \cdot 10^{-14}$	-	-
10.10.1980				
^{90}Sr	$2,7 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^{-13}$	$5,3 \cdot 10^{-6}$	$6,1 \cdot 10^{-8}$
^{137}Cs	$6,2 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^{-13}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$
^{60}C	$9,8 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^{-14}$	$2,4 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-11}$

Основным способом поступления водного аэрозоля в атмосферу является лопанье на поверхности воды воздушных пузырьков. Для мирового океана известна так же цифра годового поступления вещества $2,8 \text{ г/м}^2$ вещества в год. Водоем Карачай, находящийся в умеренной географической широте, а, следовательно, покрывающийся льдом на зимний период, не мог генерировать большие количества аэрозоля со своей акватории. Поэтому установим эту цифру в качестве максимальной.

Зная площадь акватории водоема и содержание в его воде интересующих нас радионуклидов, мы можем рассчитать объем генерируемого с водоема аэрозоля и его активность. Результаты расчетов указаны в таблице 10.

Таблица 10. Объем генерируемого аэрозоля с озера Карачай в разные моменты времени.

Год	Площадь зеркала, м ²	Объем испарения, м ³	Объем аэрозоля, л	Объемное содержание ⁹⁰ Sr, Бк	Объемное содержание ¹³⁷ Cs, Бк	Объемное содержание ⁶⁰ Co, Бк
1956	401600	248992	$1.2 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^{10}$	$8.3 \cdot 10^{10}$	$4.2 \cdot 10^{10}$
1969	443300	274846	$1.2 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^{11}$	$8 \cdot 10^{11}$	-
1975	338000	209560	$9.4 \cdot 10^2$	$2.6 \cdot 10^{11}$	$8.9 \cdot 10^{10}$	-
1980	331000	205220	$9.2 \cdot 10^2$	$9 \cdot 10^{10}$	$1.5 \cdot 10^{10}$	$9 \cdot 10^7$

Исходя из таблицы 10, можно сделать вывод, что годовая активность по основным загрязняющим веществам, в образываемом над акваторией водоема Карачай аэрозоле, с 1975 года, периода, когда была зарегулирована его береговая линия, не превышала установленных для предприятия допустимых выбросов этих веществ в 2017 году, таблица 11.

Таблица 11. Годовые выбросы радионуклидов в атмосферу в 2017 году на предприятии «Маяк», Бк [30].

Наименование радионуклида	Допустимый выброс, Бк
⁶⁰ Co	$6,13 \cdot 10^8$
⁹⁰ Sr	$7,60 \cdot 10^{12}$
¹³⁷ Cs	$5,70 \cdot 10^{10}$

Так же в литературе имеются экспериментальные данные [50], что уже в пределах 300 м от берега водоема за счет гравитационного осаждения и столкновений с различными препятствиями исчезает до 80% массы аэрозоля, поступающего на сушу. На расстоянии же 1000 метров от берега, относительное содержание водного аэрозоля в воздухе составляет лишь около 10%.

Таким образом, можно заключить, что основная масса образываемого над акваторией водоема Карачай аэрозоля осаждалась в непосредственной близости от водного объекта и не могла вызывать радиоактивного загрязнения в близлежащих населенных пунктах.

Глава 4. Исследования Тимофеева-Ресовского по снижению активности ЖРАО

Несмотря на то, что до 1971 года эксплуатация озера Карачай велась даже без простейшего технического регулирования его берегов, вопросы по миграции радионуклидов в биогеоценозах и защите от радиоактивных излучений окружающей среды уже поднимались учеными того времени.

Например, Тимофеев-Ресовский в своей работе [51], уже в 1962 году обращал внимание на то, что наиболее быстрыми и мощными путями миграции и разноса радиоизотопов из мест загрязнения являются ветровое перемещение пылевых аэрозолей и вынос их на соседние территории вместе с водой рек и ручьев. По его мнению, при небрежном отношении к радиоактивным отходам этими путями, возможно быстрое радиоактивное заражение относительно больших площадей почв с населяющими их биоценозами, а так же крупных открытых водоемов [51].

Им же предлагались меры по устранению уже имеющегося радиоактивного загрязнения территории. Данные меры заключались в максимальном сокращении возможностей образования радиоактивной пыли в центре загрязнения, воспрепятствовании выноса радиоактивности из центров загрязнения водой, путем устройства прудов-отстойников, сокращение до минимума путей биологической миграции радиоизотопов и прекращение использования, всей биопродукции с загрязненной территории.

Тимофеевым-Ресовским было рассмотрено несколько биологических способов «дезактивации» верхнего слоя почвы и природных водоемов, с помощью способности живых организмов концентрировать и накапливать радионуклиды. Эта способность была установлена еще В. И. Вернадским и его сотрудниками, при изучении ими планктона и ряски, содержащих радий в концентрациях, в сотни раз превышающих таковую в воде, и являются мощными накопителями этого элемента из водного раствора. Тимофеев-Ресовский обратил внимание на эту закономерность и провел исследования по накоплению 20 радиоизотопов среди различных видов живых организмов [52].

Результаты этих опытов показали, что, с одной стороны, среди изученных 20 радиоизотопов выделяются такие, которые в среднем, дают очень высокие коэффициенты накопления, это фосфор, железо, кобальт, цинк, иттрий, цирконий, ниобий, кадмий, церий, прометий и ртуть. Так же были и те, у которых в среднем коэффициенты накопления низки: (сера, германий и цезий). Разные группы живых организмов дали весьма различные коэффициенты накопления, при этом наивысшие коэффициенты накопления были у водорослей (в среднем порядка 10^4), затем у бактерий и высших водных растений (порядка 10^3), наконец наиболее низкие коэффициенты были у пресноводных животных (порядка 10^2). Очень

высокими коэффициентами накопления характеризовался растительный и животный планктон и, особенно, детрит, образуемый отмирающей биомассой. Но и в пределах вышеуказанных групп живых организмов разные виды могут, как в среднем, так и по отдельным радиоизотопам, сильно отличаться по коэффициентам накопления. На коэффициенты накопления влияют как химические свойства соответствующих элементов, так и, особенно та физико-химическая форма, в которой они находятся в растворе [52].

В ходе проведения опытов, были выделены 5 из 25 пресноводных животных и 10 из 35 видов растений, являющихся специфическими накопителями тех или иных из 20 изученных радиоизотопов. Коэффициенты накопления соответствующих радиоизотопов у этих специфических накопителей резко выделяются своей величиной, отклоняясь более чем на 4 порядка от среднего коэффициента накопления данного радиоизотопа остальными видами.

Для «дезактивации» почв им предлагалось засеять их в течение ряда лет специально подобранными травянистыми фитоценозами, при этом ежегодно скашивать зеленую массу и захоранивать ее в изолированных от воздействия окружающей среды местах. Для дезактивации же водоемов предлагалось проводить естественную биологическую очистку и очистку с помощью пропуска активной воды через специальные водоемы отстойники.

Тимофеев-Ресовский неоднократно указывал в своих работах [53], [54], что при использовании водоемов-отстойников, должны быть приняты все доступные меры по непопаданию радионуклидов из них на окружающую территорию. Эти меры заключались в посадке рядом с водными объектами защитных ветровых насаждений, аккуратном оформлении берегов водоемов-отстойников, минимального нахождения в водоемах личинок насекомых, птиц и млекопитающих.

Так же он заявлял, что водоемы-отстойники должны эксплуатироваться не более двух лет, так как по истечении этого времени их способности по задержке радионуклидов теряются, и проходящая через них вода не претерпевает существенных изменений в своей активности. Данные заявления были основаны на опытах, проводившихся в течение 10 лет под руководством ученого [52], [53], [54], [55].

Опыты заключались в проведении мер по снижению активности воды, содержащей раствор осколков урана, и другие изотопы, при помощи трех экспериментальных установок. Первая установка состояла из почвенного фильтра и расположенного за ним пруда-отстойника, емкостью около 30 м^3 . Вторая установка состояла из такого же пруда и расположенного за ним почвенного фильтра. Фильтры были емкостью около $0,1 \text{ м}^3$. В течение трех летних сезонов через первую установку пропускалось ежедневно по 250, а через вторую по 300 л раствора осколков урана концентрацией 25 мккюри/л ($9 \cdot 10^5 \text{ Бк/л}$) в течение двух первых и 10 мккюри/л ($3,7 \cdot 10^5 \text{ Бк/л}$) в течение третьего сезона. Периодически измерялась активность воды,

вытекающей из фильтров, из прудов и воды из середины каждого пруда: два раза в месяц брались пробы грунта и водных растений для измерения в них радиоактивности [53].

Опыты показали, что в обеих установках пруды и фильтры поглощали около 99%, поступающей в них радиоактивности. Из обеих установок вытекало, таким образом, около 1% впущенной в них активности.

За время работы в течение трех сезонов и проведения специального опыта при форсированном режиме (подача 1000 л раствора в сутки) не было замечено наступающего насыщения прудов.

Основываясь на результатах опытов с двумя первыми установками, решено было в третьей установке обойтись без почвенного фильтра, заменив его прудами.

Третья установка состояла из трех последовательно соединенных стоком прудов, общей емкостью около 50 м³. В первый пруд ежесуточно подавалось по 1000 л раствора осколков урана концентрацией 10 мкюри/л ($3.7 \cdot 10^5$ Бк/л). Из третьей установки выходило менее 1% поступившей в нее радиоактивности.

На основании закономерностей, обнаруженных в опытах с прудами, данным научным коллективом были проведены новые более детальные и точные опыты по снижению активности в воде отдельных радионуклидов. Установки для опытов состояли из серии соединенных верхним протоком небольших по емкости (45—90 л) бачков, содержащих грунт, воду и биомассу. Схема такой установки изображена на рис. 16.

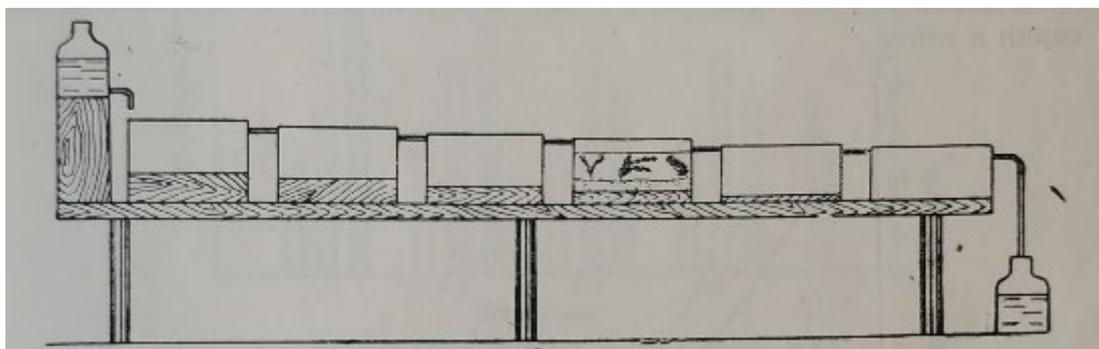


Рис. 16 – Схема серии бачков для очистки сточных вод (по данным Тимофеевой, Ресовской, Агафонова и Тимофеева-Ресовского) [52].

Методика этих опытов состояла в следующем. Во все бачки серии (состоявшей обычно из 10, а в ряде опытов из 4-6 бачков) помещалось определенное, одинаковое по весу, количество озерного песка с тонкой прослойкой почвы, высаживалось определенное количество высших водных растений (уруть, роголистник, элодея и лягушатник) и наливалось одинаковое количество озерной воды. В каждый бачок вносилась взвесь озерного планктона и вся серия выдерживалась в течение нескольких недель для стабилизации биологического режима [52].

После этого в первый бачок серии из большой бутылки ежедневно поступало определенное количества ($1/30$ общего объема воды всей серии) раствора, содержащего тот или иной радиоизотоп в концентрации порядка 10^{-5} кюри/л. Вода, вытекавшая из последнего бачка, собиралась в большую бутылку и ежедневно измерялся ее объем. В ряде специальных опытов изучалось влияние на дезактивацию воды некоторых факторов, таких как концентрация раствора, режим протока, рН воды, состав биоценоза, состав и количество взмученных частиц в воде. Ежедневно или (при длительных опытах) через каждые несколько дней брались пробы воды из всех бачков серии и из стока для определения концентрации радиоизотопа; в конце опытов (продолжавшихся от 1 до 6 месяцев) проводился баланс радиоактивности во всей серии [53].

Стронций и рутений при этом режиме проходили через всю серию бачков и в стоке их содержалось от 1,5 до 2% от исходного количества, то есть коэффициент очистки по ним, таким образом, равен 50-65. Сера, проходила через всю серию в количестве 10-20%, с коэффициентом очистки 5-10. Остальные радиоизотопы задерживались в бачках серии практически целиком и не были обнаружены в стоке (при точности определения концентрации порядка до 10^{-8} - 10^{-9} кюри/л). При этом железо, цинк и цирконий доходили до десятого, кобальт, цезий и церий до девятого, а иттрий до шестого - седьмого бачков; смесь осколков урана доходила до девятого-десятого бачка [52].

Со стронцием были проведены опыты по влиянию режима протока. В первом опыте через серию из четырех бачков пропускаться раствор с концентрацией $1 \cdot 10^{-5}$ кюри/л, при ежесуточной подаче $1/25$ общего объема воды в серии. Во втором опыте концентрация раствора была повышена вдвое ($2 \cdot 10^{-5}$ кюри/л), а скорость протока вдвое замедлена (ежесуточная подача $1/50$ общего объема воды в серии). В третьем опыте концентрация раствора была увеличена до $4 \cdot 10^{-5}$ кюри/л, а скорость протока вдвое снижена (ежесуточная подача $1/100$ общего объема воды в серии) [52].

Таким образом, во всех трех опытах в серию за единицу времени подавалось одно и то же количество стронция, при разной скорости протока. В то время как в первом опыте из последнего бачка серии вытекало немного более 5% от поступившего в серию стронция, во втором опыте вытекало менее 0,5%, а в третьем - менее 0,1%, то есть достигался коэффициент очистки порядка 10^3 . Следовательно, при более медленном протоке, даже такие элементы, как стронций, могут практически целиком задерживаться серией водоемов [52].

На основании этих опытов, Тимофеев-Ресовский имел основания утверждать, что большинство радионуклидов хорошо задерживаются сериями слабопроточных водоемов. При этом без существенных финансовых затрат достигается почти полное очищение вытекающей из серии водоемов воды. На высоких коэффициентах накопления радиоизотопов грунтами,

живыми организмами может быть основана технология биологической очистки слаборадиоактивных вод в специальных сериях слабопроточных водоемов-отстойников перед спуском этих вод в открытые водоемы общего и бытового использования.

Использование прудов-отстойников, вместе с обладающими высокими коэффициентами накопления радиоизотопов, живыми организмами, могло являться довольно безопасным и дешевым вариантом обращения с ЖРАО. Конечно, не стоит забывать о минусах данного способа обращения с ЖРАО, таких как непродолжительность полезного использования подобных объектов, ввиду потери ими в течение двух лет очистительных способностей и необходимости их размещения на водоупорных горных породах.

Однако при развитии и доработке подобного направления в обращении с ЖРАО и использовании его для очистки сбросов предприятия Маяк, не исключено что не появилось бы такой проблемы, как не изолированное от окружающей среды хранилище активных отходов, Карачай.

Глава 5. Проблема недостатка и недостоверности информации в сфере обращения с РАО

Проблема недостатка верной информации в сфере обращения с РАО является актуальной для нашей страны и в настоящее время. Данный недостаток ведет, как правило, к появлению ложных, зачастую ни на чем не основанных данных, при ознакомлении с которыми у населения возникают различного рода страхи, недоверие и заблуждения. Это подтверждают и публикации в средствах массовой информации о неизолированном от окружающей природной среды, хранилище ЖРАО Карачай.

В статье газеты «Аргументы и факты»: «Карачай захоронен, но жив. Озеро с мутантами может мигрировать» от 10 февраля 2017 года говорится [56], что в 60 годы прошлого века с берегов и акватории озера поднимались смерчи, загрязняющие радиацией окружающую территорию. Так же согласно этой публикации, состав воды озера вызывал мутации живых организмов, такие как появление карасей, без глаз и хвоста, с чешуей, которая росла не к хвосту, как положено, а к голове, карпов, которые светились в темноте. Данные истории, конечно же, являются выдуманными, не имеющими никакого научного обоснования и подтверждения, но они подаются в серьезном, заслуживающем доверия населению издании, как истина. В этой же статье говорится о том, что консервацию Карачая проводили в рамках федеральной программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008-2015 года», и затраты на закрытие бетонными блоками и скальным грунтом акватории составили почти 17 миллиардов рублей. Однако в статье газеты Комсомольская правда «Мы избавились, как минимум, от двух Чернобылей» от 30 ноября 2015 года [57], фигурирует сумма в 400 миллионов рублей, потраченных на засыпку Карачая, в рамках этой же программы.

Если подобные неточности встречаются в публикациях Российских средств информации, то в иностранных источниках о Карачае говорится еще меньше правды. Например, в статье газеты Daily Mail «Is this the most polluted place on Earth? The Russian lake where an hour on the beach would kill you» от 9 октября 2012 года [58], репортеры посчитали, что озеро Карачай находится на Юго-западе Челябинской области, рядом с границей с Казахстаном, но при этом оно располагается так же и в непосредственной близости от самого Челябинска. В данной статье говорится о том, что радиоактивные отходы стали поступать в озеро Карачай после взрыва в 1957 году, вследствие разрушения всех существующих на предприятии хранилищ ЖРАО. Затем, через 10 лет, авария произошла и на самом Карачае, в результате нее был загрязнен радионуклидами сам город Челябинск. В газете, так же говорится, что окрестности озера являются одним из самых опасных для жизни человека мест в мире, рядом с которым без средств защиты можно умереть в течение одного часа. А население города Челябинска даже сегодня не знает фактических уровней радиоизотопов в продуктах собственного производства,

а многие участки города остаются непригодными для проживания. Ссылка на эту статью была так же в газете Аргументы и факты от 11 октября 2012, под названием «Карачай, Карачай, кого хочешь - отравляй. Южноуральский водоём назван самым опасным местом на Земле» [59], здесь смертельная доза, достигаемая у берегов Карачая без средств защиты, значит уже как 5 минут.

В том числе и благодаря подобным публикациям, появляется типичное представление у основной массы людей, что места хранения радиоактивных отходов это крайне опасные для окружающей среды, территории, даже недолгое пребывание на которых, может привести к серьезным болезням, мутациям и даже смерти. Поэтому взаимодействие с общественностью, информирование ее и просвещение должны являться одними из наиболее приоритетных направлений развития атомной промышленности.

Заключение

В заключение работы можно сделать следующие выводы:

1. Создание Водоемы-накопители жидких радиоактивных отходов не будут оказывать серьезного влияния на окружающую среду, если они создаются в районах без экстремальных погодных явлений (типа смерчей) и с низкой сейсмической активностью, если они будут расположены на водоупорных породах, а их берега укреплены и проводится контроль уровня воды. Активность радионуклидов в таком хранилище можно понижать за счет использования различных растений, обладающих высокими коэффициентами накопления.

2. Использование болота Карачай в качестве накопителя ЖРАО является неудачным вариантом обращения с радиоактивными отходами, в связи с отсутствием водоупорных пород в районе его расположения, непосредственным его воздействием на подземными водами и отсутствием в течение двух десятилетий, каких либо простейших мер, по укреплению его береговой линии и слежения за уровнем воды в нем.

3. В Челябинской области, за более чем 70 лет наблюдений, был зарегистрирован лишь один смерч 2 класса опасности по шкале Фуджиты, оставивший после себя заметные разрушения. Над водным объектом и на расстояниях от него не, менее чем 50 километров никогда не были зарегистрированы смерчи, что делает вероятность их прохождения над объектом крайне низкой.

4. Как известно, испарение воды из подобных водоемов не сопровождается заметным выносом растворенных в них веществ (эта величина пропорциональна молярной концентрации растворенного вещества). Эмиссия радионуклидов может быть связана только с эмиссией аэрозолей или мелких частиц, которые могут образовываться за счет силы ветра или с пузырьками, поднимающимися снизу. Согласно расчетам, произведенным в работе, этот канал воздействия не представлял серьезной опасности для человека и окружающей природной среды. Основная масса аэрозоля, если они образовывались, осаждалась в непосредственной близости от водного объекта и не могла вызывать радиоактивного загрязнения в близлежащих населенных пунктах.

5. Имеющиеся в литературе данные «о разносе радиоактивной пыли с берегов водоема» в 1967 году не позволяют утверждать о реальности произошедшего инцидента по причине отсутствия каких-либо убедительных метеорологических и дозиметрических данных. Нельзя никак исключить небольшого дополнительного загрязнения окружающей среды в 1967 г., но оно имеет простое логическое объяснение. Это могли быть сверхнормативные выбросы радионуклидов от радиохимического производства, расположенного всего в ~400 метров от озера Карачай.

6. Ликвидация водоема путем засыпки его акватории, не была научно обоснована и не решила проблемы предотвращения миграции радионуклидов из накопителя в гидросферу. Можно утверждать, что такая ликвидация лишь усугубила ее. Данный водный объект превратился в неконтролируемый расширяющийся источник радиоактивного загрязнения подземных вод, создающий реальную угрозу водозаборам питьевого назначения.

7. Формирование общественного мнения об атомной промышленности происходит благодаря публикациям о ней в средствах массовой информации. Недостоверность и искажение данных, приводят к негативному восприятию среди населения этой отрасли производства. Взаимодействие с общественностью, информирование ее и просвещение должны являться одними из наиболее приоритетных направлений развития атомной промышленности.

Список литературы

1. Проблемы ядерного наследия и пути их решения. – Под общей ред. Е. В. Евстратова, А.М.Агапова, Н.П. Лаверова, Л.А. Большова, И.И. Линге – М.: Энергопроманистика, 2012. – 356 с. – Т. 1.
2. Hanford Site Development Plan. — С. A. Rinne, R. H. Curry, J. W. Hagan, S. W. Seiler, D. J. Sommer — Westinghouse Hanford Company, E. F. Yancey — Pacific Northwest Laboratory/Date Published January 1990/
3. Атомный проект СССР. Документы и материалы. Т. II. Атомная бомба. 1945-1954. Кн. 2. Москва-Саров, 2000.
4. ФГУП «ПО Маяк». Отчет по экологической безопасности за 2017год. — М.:изд-во АНО, 2016.-40с.
5. Официальный сайт переписи населения 2010. URL:
http://www.gks.ru/free_doc/new_site/perepis2010/croc/perepis_itogi1612.htm
6. Толстиков В.С., Кузнецов В.Н. Ядерное наследие на Урале: исторические оценки и документы – Екатеринбург: Банк культурной информации, 2017. – 400 с., сер. «Атомные города Урала».
7. Белозерский ГН. Радиационная Экология/ Учебник. Издательский Центр «Академия», 2008. 384 стр.
8. Калишев В.Б. У природы нет плохой погоды. О погоде Урала. – Челябинск: Изд-во ЧП «А. Рейх», 1998. – 272 с.
9. Географическое краеведение. Челябинская область: справочно-учеб. пособие / М. С. Гитис, А. П. Моисеев -Челябинск: АБРИС, 2008. - 128 с.
10. Левит А.И. Южный Урал: География, экология, природопользование. Южно-Уральское книжное издательство, Челябинск, 2005 г., 246 стр.
11. Ильин Д.И. Миграция радиоактивных веществ из открытых водоемов: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Архив ПО "Маяк", ф. 11, оп. 30, ед.хр. 839, Озерск, 1956, -270 с
12. Исследование биоты озера Карачай перед его ликвидацией в 2015 году. Атаманюк Н.И., Пряхин Е.А., Осипова О.Ф., Перетыкин А.А., Стяжкина Е.В., Егорейченков Е.А., Осипов Д.И.,

- Тряпицына Г.А., Аклеев А.В., Мокров Ю.Г., Алексахин А.И., Коновалов А.В., Мокров К.Ю., Нагорная М.Г. Вопросы радиационной безопасности. 2016. № 3 (83). С. 3-16.
- 13 Водоём-9 – хранилище жидких радиоактивных отходов и воздействие его на геологическую среду / Под ред. Е.Г. Дрожко, Б.Г. Самсонова. – М.: Росатом, 2007. – 250 с
14. Отчет комиссии ПГУ о загрязнении территории, прилегающей к заводу им. Менделеева, под председательством А.П. Александрова, 1951. Из архивов по «Маяк». — ВРБ, 2006, № 3. — С. 60-74
15. Ретроспективное восстановление морфометрических параметров оз. Карачай с использованием технологии геоинформационных систем. Алексахин А.И., Егоров В.А. (Россия, г. Озерск, ПО "Маяк") – ВРБ, 1996, №4 – С.60–66.
16. Величкин В.И., Солодов И.Н., Петров В.А. и др. Геологические, геохимические и гидрогеохимические факторы, определяющие миграцию радиоактивных подземных вод в районе оз. Карачай (ПО “Маяк”, Челябинская обл.) //Геоэкология. 2008. № 5. С. 1–12.
17. Мокров Ю.Г., Мокров К.Ю., Ишунина М.А. и др. Оценка вклада различных источников загрязнения атмосферы плутонием в районе размещения ФГУП "ПО "Маяк" в период 2002–2016 гг. // Вопросы радиац. безопасности. – 2017. – № 2. – С. 35–46
18. Результаты комплексного обследования водоема Карачай в 2002 году / Е.Г. Дрожко, П.М. Стукалов, И.А. Иванов, А.И. Алексахин // Вопросы радиационной безопасности. — 2004. — № 1. — С. 33-43
19. Фильтрационная неоднородность трещиноватых пород. - М.: Издательство «Горная книга », 2009. - 151 с . : ил.
20. Современное состояние подземной гидросферы в районе ПО "Маяк". Дрожко Е.Г., Иванов И.А., Алексахин А.И. (Россия, Озерск, ПО "Маяк"), Самсонова Л.М., Глаголев А.В. (Россия, Москва, ГГП Гидроспецгеология) – ВРБ, 1996, №1 – С.11–19
21. Степанов В.М. Введение в структурную гидрогеологию. Учебное пособие.- Иркутск: ИЛИ, 1985.- 104
22. Geochemistry of natural and contaminated subsurface waters in assured bed rocks of the Lake Karachai area, Southern Urals, Russia. Igor N. Solodov, Aleksandr V. Zotov, Aleksandr D. Khoteev, Aleksandr P. Mukhamet-Galeev, Boris R. Tagirov

23. Задержка радионуклидов твердой фазой геологического массива вблизи озера Карачай. Дрожко Е.Г., Иванов И.А. (Россия, Озерск, ПО "Маяк"), Самсонова Л.М. (Россия, Москва, ГГП Гидроспецгеология), Самсонов Б.Г., Малышев В.И., Бахур А.Е., Салмин Ю.П., Березина Л.А. (Россия, Москва, Всероссийский Институт Минерального Сырья) – ВРБ, 1996, №2 – С.22–27.
24. Гидрогеологические условия района озера Карачай и численное моделирование миграции загрязнений в подземных водах. Дрожко Е.Г., Иванов И.А. (Россия, г. Озерск, ПО "Маяк"), Самсонова Л.М., Василькова Н.А., Глаголев А.В., Тер-Саакян К.С. (Россия, г.Москва, ГГП "Гидроспецгеология"), Зинин А.И., Зинина Г.А. (Россия, г.Обнинск, ГНЦ ФЭИ) – ВРБ, 1996, №4 – С.5–14.
25. Основные проблемы и современное состояние предприятий ядерного топливного цикла российской федерации/ - Российская Демократическая партия «Яблоко» - М.: , 2002 г. - 259 с.
26. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2004 году. Ежегодник / Под ред. С. М. Вакуловского. – М.: Метеоагентство Росгидромета, 2005. – 274 с.
27. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2007 году. Ежегодник / Под ред. С. М. Вакуловского. – Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2008. – 315 с.
28. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2011 году. Ежегодник / Под ред. С. М. Вакуловского. – Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. – 298 с.
29. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2014 году. Ежегодник / Под ред. Шершакова В. М., Булгакова В. Г., Вакуловского С. М. и др.-Нижний Новгород: типография ИП Кузнецов, 2015. – 322 с.
30. Ежегодник «Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2017 году» – Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун». – 2018. 376 с.
31. Оценка радиационной обстановки на территории, загрязненной в результате ветрового переноса радиоактивных аэрозолей в районе предприятия в 1967 году: реферат отчета 1968 года / Ю. Корсаков, Е. Федоров, Г. Романов, Л. Пантелеев и др. // Вопросы радиационной безопасности. – 1996. – № 4. – С. 50–59.
32. Челябинская область : ликвидация последствий радиационных аварий / Под ред. А. В. Аклеева. – Челябинск : Медбиоэкстрем, 2006. – 344 с.
33. Радионуклиды в зонах воздействия двух ядерных инцидентов: Кыштым, 1957; оз. Карачай, 1967. (По результатам анализов почвенных образцов, отобранных в Челябинской и

Свердловской обл. в 1990-1995 гг.) А.Ааркрог, Х. Дальгаардт, С.П. Нильсен, А.В.Трапезников, И.В. Молчанова, В.Н. Позолотина, Е.Н.Караваяева, П.И.Юшков, Г.Г.Поликарпов

33. Общая океанология [Текст] : [Учебник для вузов по специальности "Океанология"] / Л. А. Жуков ; Под ред. проф., д-ра физ.-мат. наук Ю. П. Доронина. - Ленинград : Гидрометеиздат, 1976. - 376 с.

34. Рекомендации по расчету испарения с поверхности суши. - Л.: Гидрометеиздат, 1976. - 96 с.

35. Константинов А.Р. Испарение в природе. Изд. 2-е. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 532 с

36. Новоселов В. Н. и др. Атомное сердце России: [история становления и развития ФГУП «ПО «Маяк»»] / [В. Н. Новоселов, Ю. Ф. Носач, Б. Н. Ентяков; гл. ред. С. В. Баранов] ; Гос. корпорация по атом. энергии «Росатом», ФГУП «Производственное объединение «Маяк»». — Челябинск ; Озерск : [Автограф], 2014. — 528 с. : ил

37. Брохович Б. В. Химический комбинат «Маяк» : История. Серпантин событий: (Воспоминания). — [Озёрск], 1996. — 171 с.

38. История эксплуатации водоема Карачай. Обзорный очерк по архивным и отчетным материалам ПО «Маяк» А.И. Алексахин (Россия, г. Озерск, ФГУП «ПО «Маяк»). — ВРБ, 2005, № 4. — С. 42-50.

39. Наливкин Д.В. Ураганы, бури и смерчи. Географические особенности и геологическая деятельность. -Л.: Наука, 1969. - 487 с.

40. Будилина Е.Н., Прох Л.З., Снитковский А.И. Смерчи и шквалы умеренных широт. - Л.: Гидрометеиздат 1976.-32 с

41. Рекомендации по оценке характеристик смерча для объектов использования атомной энергии. РБ-022-01"(утв. Постановлением Госатомнадзора РФ от 28.12.2001 N 17)

42. Физико-химические процессы образования атмосферных аэрозолей / А. А. Лушников, В. А. Загайнов, И. Е. Аграновский, Ю. С. Любовцева // Журнал физической химии . – 15/10/2008 . – Т. 82, N 10 . – С. 1950-1958

43.Ивлев Л.С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. -Изд-во Ленингр. ун-та, 1982. Ил. - 36, табл. - 33, Оиблиогр. - 241 назв. -368 с.)

44. Ивлев Л.С. Структурные и оптические характеристики морских аэрозолей. // Прикладные вопросы физики атмосферы. 1989, с. 113-121
45. Атмосферный аэрозоль / К. Я. Кондратьев, Н. И. Москаленко, Д. В. Поздняков. - Ленинград : Гидрометеиздат, 1983. - 224 с
46. Караваева Е.В. Фракционирование ионного состава в поверхностном микрослое океана в зависимости от теплообмена с атмосферой: Автореферат дисс. канд. ф-мат. наук. – М., 1992. – 18 с.
47. Хентов В.Я. Гасанов В.М., К.Е. Сёмина, Сёмин Е.Г. Физико-химия морского солевого аэрозоля. Биосфера. СПб.: Изд-во Фонд научных исследований «XXI век», 2014.- Т. 6.- № 4.- С. 373-381.
48. В.Я Хентов , Ю.В Власов, Я.Х. Халилов ,В.М. Гасанов. О различии поверхностных натяжений жидкости капельного уноса и объемной фазы // Изв. СКНЦ ВШ. Естественные науки.- 1989,- № 2.- С. 109-111.
49. Петренчук О.П. Экспериментальные исследования атмосферного аэрозоля. Л., 1979. 264 с.
50. Хентов В.Я. Физико-химия капельного уноса. Ростов на/Д: Изд-во РГУ, 1979. 128 с.
51. Тимофеев-Ресовский Н.В. О радиоактивных загрязнениях биосферы и о мерах борьбы с этими загрязнениями// Тр. Ин-та биологии УФ АН СССР. - Свердловск, 1962. - Вып. 22. - С. 49-67.
52. Тимофеева - Ресовская Е.А. Распределение радиоизотопов по основным компонентам пресноводных водоемов.- Свердловск, 1963.- 78с.- (Тр. /Ин-т биологии УФ АН СССР, Вып.30)51.
- 53 Тимофеев-Ресовский Н.В. Распределение рассеянных элементов по компонентам водоемов. 1. Некоторые общие соображения// Тр. Ин-та биологии УФ АН СССР. - Свердловск,1960.- Вып. 12. - С. 189-193.
54. Тимофеева-Ресовская Е.А., Тимофеев-Ресовский Н.В. Распределение рассеянных элементов по компонентам водоемов. II. Почвенно-биологическая дезактивация воды в прудах-отстойниках // Тр. Ин-та биологии УФ АН СССР. - Свердловск,1960.- Вып. 12. - С. 194-223.
55. Тимофеева-Ресовская Е.А., Агафонов Б.М., Тимофеев-Ресовский Н.В. О судьбе радиоизотопов в водоемах// Тр. Ин-та биологии УФ АН СССР. - Свердловск, 1962. - Вып. 22. - С. 49-67.

56. Официальный сайт газеты «Аргументы и Факты». URL:
http://www.chel.aif.ru/society/industry/karachay_zahoronen_no_zhiv_ozero_s_mutantami_mozhet_migrirovat?utm_source=pj17linkb&utm_medium=click&utm_campaign=pj17linkb
57. Официальный сайт газеты «Комсомольская правда». URL:
<https://www.vologda.kp.ru/daily/26464.5/3334514/>
58. Официальный сайт газеты Daily Mail. URL:
<https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2215023/Is-polluted-place-Earth-The-Russian-lake-hour-beach-kill-you.html#comments>
59. Официальный сайт газеты Аргументы и Факты URL:
<http://www.chel.aif.ru/incidents/179360>

Приложение 1

Активность воды водоема Карачай в различные периоды времени [13].

Дата	Суммарная β -активность, Бк/л	^{90}Sr , Бк/л	^{137}Cs (^{134}Cs), Бк/л	^{95}Zr , Бк/л	^{95}Nb , Бк/л	^{144}Ce + ^{144}Pr , Бк/л	^{125}Sb , Бк/л	^{106}Ru , Бк/л	^{60}Co , Бк/л	^3H , Бк/л	Суммарная α -активность, Бк/л	$^{(239+240)\text{Pu}}$ (мкг/л)	U, мг/л
Период полураспада		29,1 лет	30 лет	64 суток	35,1 суток	284,6 суток 17,3мин	2,77 лет	1,01 год	5,27 лет	12,32 года			
10.1954	$4,3 \cdot 10^8$	$3,7 \cdot 10^7$	$7,4 \cdot 10^7$	$2,0 \cdot 10^7$				$1,2 \cdot 10^7$			$6,7 \cdot 10^4$	29	191
08.1956	$6,8 \cdot 10^8$	$7,4 \cdot 10^7$	$9,0 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^8$	$9,0 \cdot 10^7$	$1,6 \cdot 10^8$		$1,6 \cdot 10^7$			$1,6 \cdot 10^5$	51	215
11.02.1969	$1,4 \cdot 10^9$	$1,4 \cdot 10^8$	$7,0 \cdot 10^8$	$5,2 \cdot 10^6$				$4,1 \cdot 10^7$			$5,6 \cdot 10^4$		70
11.07.75	$2,4 \cdot 10^8$	$2,8 \cdot 10^8$	$9,3 \cdot 10^7$ ($5,9 \cdot 10^6$)	$8,5 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^6$	$7,0 \cdot 10^6$	$5,2 \cdot 10^5$	$5,5 \cdot 10^7$			$1,6 \cdot 10^4$		30
10.10.80	$1,6 \cdot 10^8$	$2,7 \cdot 10^7$	$6,2 \cdot 10^7$ ($8,7 \cdot 10^5$)	$3,4 \cdot 10^5$	$2,3 \cdot 10^5$	$5,0 \cdot 10^6$	$9,6 \cdot 10^5$	$3,2 \cdot 10^7$	$9,8 \cdot 10^4$	$6,3 \cdot 10^5$	$3,8 \cdot 10^4$		13
30.05.85	$4,7 \cdot 10^8$	$6,5 \cdot 10^7$	$2,8 \cdot 10^8$ ($1,9 \cdot 10^7$)	$7,3 \cdot 10^5$	$3,6 \cdot 10^5$	$3,4 \cdot 10^6$	$3,2 \cdot 10^6$	$3,8 \cdot 10^7$	$1,6 \cdot 10^6$	$1,6 \cdot 10^6$	$9,2 \cdot 10^4$		17
16.11.90	$7,0 \cdot 10^8$	$1,5 \cdot 10^8$	$3,5 \cdot 10^8$ ($3,7 \cdot 10^7$)			$4,8 \cdot 10^6$	$4,1 \cdot 10^6$	$1,9 \cdot 10^7$	$2,9 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^6$	$2,2 \cdot 10^5$		28
26.05.95	$1,7 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$	$7,0 \cdot 10^7$ ($1,9 \cdot 10^6$)					$7,4 \cdot 10^5$	$< 5 \cdot 10^3$	$2,0 \cdot 10^5$	$5,9 \cdot 10^4$		31
07.06.00	$7,3 \cdot 10^7$	$2,7 \cdot 10^7$	$1,8 \cdot 10^7$ ($3,0 \cdot 10^5$)					$< 1 \cdot 10^6$	$< 5 \cdot 10^3$	$6,7 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^4$		7,5

Приложение 2

Классификация интенсивности смерча по f-шкале Фуджиты [41].

Класс интенсивности смерча	Диапазон максимальных горизонтальных скоростей вращательного движения стенки смерча, м/с	Характер разрушений
0	До 33	Слабые повреждения. Некоторые повреждения труб и телевизионных антенн; сломанные ветки деревьев; поваленные деревья с неглубоко залегающими корнями.
1	33-49	Средние повреждения. Сорваны крыши; разбиты окна; перевернуты или передвинуты легкие автоприцепы; некоторые деревья вырваны с корнем или унесены; движущиеся автомобили снесены с дороги.
2	50-69	Значительные повреждения. Сорваны крыши каркасов домов (прочные вертикальные стены не разрушены); разрушены неустойчивые здания в сельских районах; разрушения жилые автоприцепы; крупные деревья вырваны с корнем или унесены; опрокинуты железнодорожные товарные вагоны; снесены автомобили с шоссе.
3	70-92	Серьезные повреждения. Сорваны крыши с каркасов домов и разрушена часть вертикальных стен; здания в сельской местности полностью разрушены; опрокинуты поезда; разорваны конструкции со стальной оболочкой типа ангаров или пакгаузов; большинство деревьев в лесу вырваны с корнем, унесены или повалены на землю.
4	93-116	Опустошительные разрушения. Каркасы повалены на землю целиком, остались лишь груды обломков; стальные конструкции сильно разрушены, кора с деревьев содрана небольшими летящими обломками; автомобили или поезда отброшены на значительное расстояние; крупные летящие предметы в воздухе.
5	117-140	Потрясающие повреждения. Каркасы домов полностью сорваны с фундаментов; железобетонные конструкции сильно повреждены; в воздухе летящие предметы размером с автомобиль, могут возникать чрезвычайные явления.
6-12	141-330 (до скорости звука)	Невообразимые разрушения. Если случится смерч с максимальной скоростью ветра, превышающей класс 6, то степень и тип повреждений трудно предположить.

Приложение 3

Зарегистрированные смерчи на территории Челябинской области 1957-2015 года.

№	Место прохождения смерча	Дата	Время. Продолжительность	Класс	Длина пути, км.	Координаты
1	г. Челябинск	3.07.1957	18.45-20.00 московского времени. 1 ч 15 мин	1		55.143969 61.433945
2	п. Тюбук Каслинский р-н	27.07.1971	Около 19.00 местного времени. За 10-15 мин смерч промчался через село. Путь в 10 км смерч прошел за 33-50 мин.	2	10	56.046945 60.927593
3	п. Берёзовка Увельский р-н	Июнь 1973 г.		1		54.523992 61.179092
4	г. Карталы Карталинский р-н	30.06.1974	12.42-12.57 московского I времени. 15 мин	1	1,5	53.059198 60.603190
5	г Копейск Копейский городской округ	12.08.1978	Вечером. Продолжался около. 15 мин	1		55.063172 61.630520
6	оз. Узункуль Сосновский р-н	15.07.1991	Около 17.00 местного времени. Продолжался около 5 мин	1		55.430771 61.313972
7	с. Алабуга Красноармейский р-н	27.06.2000		1	0,5	55.533003 62.357484
8	с. Дубровка Красноармейский р-н	11.08.2004		1		55.434126 61.648636
9	с. Медведевка Кусинский р-н	30.05.2006	Продолжался около 4 мин	1		5.224591 59.499814
10	с. Кирды Красноармейский р-н	11.06.2006	20.25-20.50	1		55.822585 62.057654
11	п. Берёзовка Увельский р-н	1.07.2008	7-10мин	1		54.523992 61.179092
12	п. Степное И Пластовский р-н	26.07.2008		1		54.076990 60.411700
13	Аргаяшский р-н	14.06.2009		1		55.465418 60.911521
14	Деревни Усманово, Кузяшево и Буланцы Аргаяшский р-н	30.07.2010	Около 19.00 местного времени. Продолжался 1 мин	1		55.327899 60.818930
15	Между ж.д. станциями Усть-Катав и Сулея	23.06.2011		0		55.028940 58.548021
16	Между п. Буранный и Новобуранный Агаповский р-н	27.07.2013,	Около 19.30 местного времени. Продолжался около 3 мин	0		53.393466 59.321129
17	Деревни Аминев и Нижнеусцелемово Уйский р-н	11.06.2014	Около 17.00 местного времени	1		54.283547 59.988050
18	Челябинск. Район ЮУрГУ	25.05.2015		0		55.143969 61.433945