

## Анализ безопасности при ветровом подъеме радиоактивных веществ с береговой линии Теченского каскада водоемов

А.В. Пыхова<sup>1</sup>, А.А. Екидин<sup>2</sup>, М.Е. Васянович<sup>2</sup>, К.Л. Антонов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

*В работе дана оценка вероятности и последствий внешних событий, способных привести к инциденту с нарушением сформированных барьеров безопасности, ограничивающих распространение радиоактивных веществ береговой линии Теченского каскада водоемов. Исходными событиями такого инцидента могут стать неблагоприятные метеорологические условия, в результате которых произойдет понижение уровня воды в водоемах каскада ниже границ заданных проектных отметок. Осушение поверхности ранее обводненных участков береговой линии сформирует протяженный источник загрязнения атмосферного воздуха при ветровом подъеме техногенных радионуклидов. Вероятная площадь осушенных участков составит 0,02 – 0,08 км<sup>2</sup> для водоема В-3, 0,06 – 0,3 км<sup>2</sup> для водоема В-4, 0,2 – 0,9 км<sup>2</sup> для водоема В-10 и 0,5 – 2,2 км<sup>2</sup> для водоема В-11. Суммарная запасенная активность на указанной территории превышает 10<sup>5</sup> Бк/м<sup>2</sup> <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr. Активность, поступающая в атмосферу в течении часа, составит от 3,7·10<sup>8</sup> до 8,5·10<sup>11</sup> Бк для скорости ветра 5 м/с и 20 м/с соответственно. Вероятности совместной реализации сильного ветра и условия засушливости составляют 6,8·10<sup>7</sup> в год при скорости ветра 20 м/с и 2,1·10<sup>3</sup> в год при скорости ветра 5 м/с. Наибольшие значения эффективной дозы для населения ближайших населенных пунктов, составляющие 1–3 мкЗв за первые 10 суток и более 200 мкЗв за первый год, достигаются при экстремальных ветровых нагрузках со скоростью ветра 20 м/с и более.*

**Ключевые слова:** Теченский каскад водоемов, береговая линия, засуха, ветровой подъем, модель переноса, радионуклиды, эффективная доза, индикаторы безопасности.

### Введение

Каскад промышленных водоемов на реке Теча (ТКВ), созданный для ограничения радиоактивного загрязнения окружающей среды, эксплуатируется в качестве хранилища жидких радиоактивных отходов [1, 2]. Беспрепятственное поступление с поверхности водоемов радиоактивных веществ в газообразной и аэрозольной формах позволяет отнести их к числу наиболее масштабных площадных неорганизованных источников загрязнения атмосферного воздуха [3–6]. Управление неорганизованными источниками в нормальных условиях эксплуатации сопровождается инженерными и организационными мероприятиями, направленными на минимизацию радиационного воздействия на персонал, население и окружающую среду. Изменения или существенные отклонения условий эксплуатации может привести к последствиям во внешней среде, которые не могут игнорироваться с точки зрения защиты или безопасности. Анализ и оценка опасностей, прогнозирование показателей и условий эксплуатации ТКВ позволяют сделать обоснованный выбор индикаторов безопасности, а при необходимости и мер по ограничению воздействия на человека и окружающую среду [7, 8].

Влияние на условия эксплуатации ТКВ могут оказать современные тенденции климатических изменений на территории России, выраженные, например, в увеличении частоты среднегодовых и сезонных аномалий температур приземного воздуха и продолжительности засушливых

периодов [9]. В регионе расположения ТКВ нередки засухи и атмосферные явления, способствующие дефляции радиоактивных веществ с подстилающих поверхностей [10, 11]. Продолжительное отсутствие осадков, понижение влажности и длительные интервалы повышенных температур воздуха приведут к понижению уровня водоемов и, как следствие, к исчезновению барьера безопасности между атмосферой и накопленной активностью в отложениях осушенной береговой линии. В такой ситуации вероятен ветровой подъем и перенос радиоактивных веществ с высохшей береговой линии ТКВ. Индикаторами безопасности этих событий могут быть характеристики скорости ветра, площадь и запас активности осушенной береговой линии.

Примером реализации рассматриваемого сценария является ветровой подъем радиоактивной пыли с береговой линии озера Карачай (водоем В-9) в 1967 году в засушливый период. Продолжительный летний жаркий период способствовал понижению уровня водоема В-9, что привело к подъему ветром с высушенной береговой линии значительной части радиоактивности (~2,22·10<sup>14</sup> Бк) и её выпадениям на территории площадью 1660 км<sup>2</sup> [12, 13]. Оценка коллективной дозы облучения населения в результате ветрового подъема активности с осушенной береговой линии озера Карачай составила 700 чел.-Зв [14]. В наиболее загрязненных населенных пунктах дополнительное облучение населения за 1967 год оценивалось в интервале 0,8 – 1,0 мЗв/год [12]. Актуальные ожидаемые значения годовой эффективной дозы при длительном нахождении на обще-

Пыхова Александра Владимировна

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

Адрес для переписки: 620002, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19; E-mail: a.v.nazarovich@mail.ru

ственно доступных участках с повышенным содержанием  $^{137}\text{Cs}$ , вынесенного с озера Карачай, не превышают четверти годового предела дозы для населения [15]. Несмотря на отсутствие серьезных радиационных последствий для населения и окружающей среды, инцидент 1967 на озере Карачай показал потенциальную радиологическую и радиозоологическую опасность повторения подобных ситуаций на промышленных водоемах Теченского каскада.

Сочетание периодов сильных ветровых нагрузок с возможным осушением береговой линии ТКВ, где накоплен относительно большой запас радиоактивности, обуславливает актуальность исследований потенциального радиационного воздействия на население при возникновении указанных неблагоприятных метеорологических условий. В долгосрочной перспективе анализ потенциального облучения населения из-за природных и техногенных воздействий на ТКВ является центральной в проблеме безопасности населения с позиции современной международной системы радиационной защиты [16]. Опубликованные результаты исследований содержат информацию об оценках ветрового выноса радиоактивных веществ, депонированных в илах промышленных водоемов ФГУП «ПО «МАЯК», при возникновении экстремальных ветровых нагрузок, но не включают оценку эффективных доз на население в результате ветрового выноса радиоактивных веществ [6].

**Цель исследования** – оценка радиационного воздействия на население в близлежащих населенных пунктах, формируемого ветровым переносом  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  с береговой линии ТКВ в условиях засухи. Для достижения поставленной цели определены и реализованы задачи:

- оценены осушаемые площади и запас радиоактивных веществ в прибрежной зоне каждого водоема;
- определена вероятность возникновения неблагоприятных метеоусловий, заключающихся одновременно в наличии сильного ветра и засухливости на рассматриваемой территории;
- разработана цифровая модель потенциального источника выброса для береговой линии каждого водоема ТКВ;
- рассчитаны эффективные дозы от ветрового выноса радиоактивных веществ с осушенной береговой линии ТКВ;
- обоснованы численные значения выбранных индикаторов безопасности, сигнализирующих о вероятном нарушении пределов безопасной эксплуатации ТКВ.

## Материалы и методы

### Объект исследования

ТКВ – изолированный от открытой гидрографической системы гидрогеологический природно-техногенный объект: открытое поверхностное хранилище жидких радиоактивных отходов площадью 67,4 км<sup>2</sup> и объемом 357,9 млн. м<sup>3</sup>, состоящий из четырех водоемов (В-3, В-4, В-10, В-11) и плотин (П-3, П-4, П-10 и П-11), системы обводных каналов и ряда гидротехнических сооружений, включающих ограждающие дамбы и подпорные сооружения [17–19]. Длина береговой линии ТКВ при нормальном подпорном уровне составляет 108,4 км [1]. В водный баланс водоемов, помимо естественных составляющих (осадки, испарение, поверхностный и подземный сток, фильтрационный приток и отток), существенный вклад вносят сбросы сточных вод (в водоёмы В-3 и В-4) и перетоки через водопропускные устройства плотин (В-3, В-4, В-10) [20]. В теплый период года открытая поверхность промышленных водоемов создает условия для поступления радиоактивных веществ в атмосферу при капельном уносе вод-

ного аэрозоля, испарении воды, выбросе метана, содержащего тритий [4, 5, 21, 22].

### Оценка запасенной активности в осушаемой береговой линии ТКВ

Размеры осушаемой площади каждого водоема рассчитывались для условий безопасной эксплуатации ТКВ на заданных проектных отметках водоема В-11 от 215,0 до 217,32 м [1]. Большая часть радиоактивных веществ накапливается в донных отложениях [23]. По удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  загрязнение донных отложений в пространстве относительно равномерное [1]. В расчетах запаса активности в осушаемой береговой линии каждого водоема ТКВ принято равномерное пространственное распределение загрязнения донных отложений. Для оценки эффективных доз используются опубликованные значения удельной активности в донных отложениях ТКВ [20].

Известные значения удельной активности донных отложений и полученные в настоящей работе размеры вероятной площади осушенной береговой линии каждого водоема позволили оценить запасенную активность в береговой линии ТКВ для толщины отложений до 10 см. Величина поднятой активности с поверхности береговой линии определена на основе теории ветровой эрозии почв, согласно которой количество поднятой пыли зависит от скорости ветра [6].

### Вероятности неблагоприятных событий

Вероятности неблагоприятных событий оцениваются для совместного появления засухливости и экстремальных ветровых нагрузок в районе ТКВ. Частота засухливости определялась на основе метеорологических данных метеостанции Аргаяш (WMO ID: 28548) с использованием индексов засухливости: гидротермического коэффициента Селянинова, стандартизированного индекса осадков, плювиометрического коэффициента [24]. Оценка вероятности реализации экстремальных ветровых нагрузок определялась как частота повторяемости скорости ветра, зарегистрированной на метеостанции Аргаяш в период наблюдений с 2006 по 2023 год [25].

### Цифровая модель источников выбросов

Для визуализации существующих границ ТКВ со значениями активности, содержащейся в осушенной береговой линии, была разработана цифровая модель водоемов ТКВ. На рисунке 1 представлено разбиение береговой линии на множество единичных квадратных сегментов.

При расчете мощности выброса и рассеивания радиоактивных аэрозолей в атмосфере приняты следующие допущения<sup>1</sup>:

- источник с единичной площадью центрирован и имеет форму квадрата со стороной 2а;
- использованные модели рассеивания применимы для расчета на расстояниях до 50 км;
- принято равномерное распределение активности радионуклидов по площади осушенной береговой линии.

В модельных расчетах установлено, что величина эффективной дозы на расстояниях расположения близлежащих населенных пунктов не зависит от размера стороны единичного квадратного сегмента береговой линии. Поэтому в последующих расчетах используется величина 2а = 300 м.

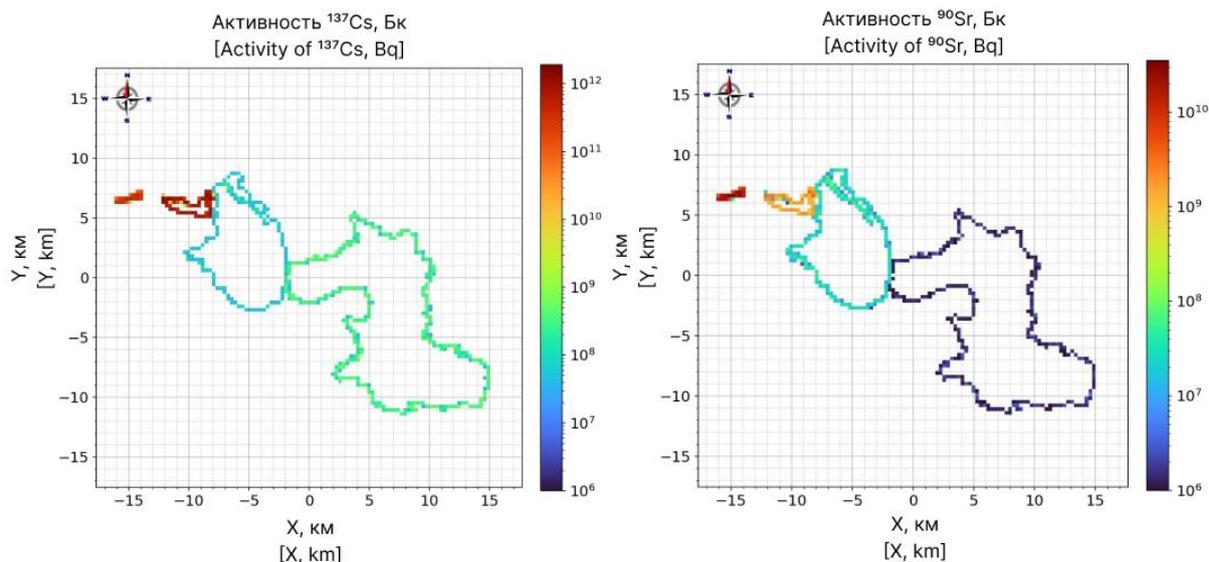


Рис. 1. Цифровая модель карты активности береговой линии ТКВ для  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$   
 [Fig. 1. Digital model of the TRC coastline activity map for  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$ ]

*Оценка эффективной дозы от ветрового выноса активности*

В настоящей работе оценивается радиационное воздействие на жителей населенных пунктов вблизи ТКВ в случае загрязнения атмосферы, сформированного разовым ветровым подъёмом радиоактивной пыли суммарно с каждого единичного квадратного сегмента береговой линии промышленных водоемов. Консервативно предполагается, что в момент подъёма пыли с любого квадратного сегмента ветер направлен в сторону рассматриваемого населенного пункта. Значение объемной активности радионуклидов в приземном слое атмосферы на участке воздействия принимается как суперпозиция активности, перенесенной с каждого квадратного сегмента береговой линии с учетом истощения радиоактивного облака. Оценка эффективной дозы на население учитывает внутреннее облучение при поступлении радионуклидов от ингаляции и с продуктами питания и внешнее облучение от облака и по-

верхности почвы<sup>1</sup>.

В расчетах приняты соответствующие коэффициенты дозового преобразования для каждого радионуклида  $r$  из нормативных документов:

- при внешнем облучении от радиоактивного облака<sup>2</sup>,  $\text{Зв} \cdot \text{м}^3 / (\text{Бк} \cdot \text{с})$ ;
- при внешнем облучении от поверхности почвы<sup>2</sup>,  $\text{Зв} \cdot \text{м}^2 / (\text{Бк} \cdot \text{с})$ ;
- при ингаляционном поступлении радионуклида<sup>3</sup>,  $\text{Зв} / \text{Бк}$ ;
- при поступлении радионуклида с пищей<sup>3</sup>,  $\text{Зв} / \text{Бк}$ .

Годовое потребление пищевых продуктов молочного, растительного или животного происхождения принималось для лиц критической группы.

С учетом вероятности неблагоприятных метеоусловий проведено моделирование максимально возможных уровней радиационного воздействия на население ближайших населенных пунктов в начальный период (за первые 10 суток,  $E_{total10}^{j,r}(x)$ ) и за первый год ( $E_{total>10}^{j,r}(x)$ ) после однора-

<sup>1</sup> Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендуемые методы оценки и прогнозирования радиационных последствий аварий на объектах ядерного топливного цикла» (РБ-134-17): утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 16 ноября 2017 № 479. М.: ФБУ НТЦ ЯРБ, 2017 [Safety Guidelines for the Use of Atomic Energy "Recommended methods for assessing and predicting the radiation consequences of accidents at nuclear fuel cycle facilities" (SG-134-17): approved by the Ord. No.479 of Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service of Russia on the 16th November 2017. Moscow: Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, 2017 (in Russ.)]

<sup>2</sup> Руководство по безопасности «Рекомендуемые методы расчета параметров, необходимых для разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух» (РБ-106-21): утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 30 авг. 2021 № 288. М.: ФБУ НТЦ ЯРБ, 2021 [Safety Guidelines "Recommended methods for calculating the parameters necessary for the development and establishment of standards for maximum permissible emissions of radioactive substances into the atmospheric air" (SG-106-21): approved by the Ord. No.288 of Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service of Russia on the 30<sup>th</sup> August 2021. Moscow: Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, 2015 (in Russ.)]

<sup>3</sup> Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 №47. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 14.08.2009, регистрационный No 14534 [Norms of radiation safety (NRB-99/2009). Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.1.2523-09. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 07.07.2009 No. 47. Registered with the Ministry of justice of the Russian Federation on August 14, 2009, registration No. 14534. (In Russ.)]

зового ветрового подъёма и переноса радиоактивной пыли с поверхности осушенных участков прибрежной зоны ТКВ. Оценки радиационного воздействия выполнены для радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  ( $r$ ) на различных расстояниях от источника выброса ( $x$ ). Величина эффективной дозы принимается равной максимальному из значений доз, рассчитанных для шести категорий устойчивости атмосферы ( $j$ ) по параметризации Пасквилла–Гиффорда ( $A, B, C, D, E, F$ ).

В расчетах эффективной дозы использовались различные значения выбранных индикаторов безопасности: ветровые нагрузки, площадь и запас активности осушенной береговой линии. Процедура расчета реализована в программном коде с учетом рекомендаций и справочных данных документа<sup>4</sup>. Для оценки поднятой активности с поверхности береговой линии использованы справочные данные, которые соответствуют составу донных отложений ТКВ [6].

*Оценка численных значений индикаторов безопасности состояния береговой линии ТКВ*

Первоначальными проектами создания промышленных водоемов на реке Теча и в последующей практике их эксплуатации не предусматривалось обоснование нормативов поступления радиоактивных веществ в атмосферный воздух, что объясняет отсутствие установленных эксплуатационных пределов и пределов безопасной эксплуатации для выбросов из ТКВ. Учитывая требование не превышения 0,1 мЗв годовой эффективной дозы облучения критической группы населения при всех видах обращения с радиоактивными отходами до их захоронения<sup>5</sup>, целесообразно рассмотреть:

- предел безопасной эксплуатации для условий формирования годовой дозы  $E_{total>10}^{j,r}(x) = 1$  мЗв;
- эксплуатационный предел для условий формирования годовой дозы  $E_{total>10}^{j,r}(x) = 100$  мкЗв.

Рассматриваемые сценарии облучения населения однозначно связывают величину годовой эффективной дозы и активность выброса в атмосферу с осушенной поверхностью водоемов ТКВ. Чем больше площадь осушенной береговой линии, тем больший запас активности лишается барьера безопасности в виде водной поверхности, способный формировать загрязнение атмосферы в случае ветрового подъёма. Для демонстрации возможности использования индикаторов безопасности принимаются условия равномерного поверхностного загрязнения грунтов береговой линии.

При осушении принимается одинаковое изменение ширины береговой линии каждого водоема без учета уклона поверхности к горизонту. Длина береговой линии принимается постоянной, поэтому площадь осушения и активность  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , способная поступить в атмосферу, будут

пропорциональны ширине осушенной береговой линии. В этом случае ширина линии осушения может служить одним из индикаторов вероятного масштаба облучения. Другим фактором, влияющим на дозу облучения, является скорость ветра над осушенной поверхностью. При известной площади осушения ветровая нагрузка также может сигнализировать, служить индикатором, возможного достижения или превышения выбранного порогового уровня облучения критической группы населения.

Оценки  $E_{total>10}^{j,r}(x)$  для фиксированных значений скорости ветра и ширины осушения береговой линии ТКВ, а, следовательно, площади и запаса активности, способных создать годовую дозу критической группы населения 100 мкЗв и 1 мЗв могут служить индикаторами вероятного превышения эксплуатационных пределов и пределов безопасной эксплуатации ТКВ.

**Результаты и обсуждение**

*Оценка вероятности неблагоприятных событий*

Анализ метеорологических данных с метеостанции Аргаяш с 2006 по 2021 годы позволил оценить частоту реализации засушливости (таблица 1) в виде индексов засушливости: гидротермического коэффициента Селянинова, стандартизированного индекса осадков, глювиометрического коэффициента [24]. Полученные значения используются для оценки вероятности реализации засушливости на территории ТКВ.

Таблица 1

**Частота реализации засушливости**

[Table 1

**Aridity occurrence]**

Индекс засушливости [Drought index]	Число случаев за время наблюдения* [Occurrences rate during the period of monitoring*]	Принятая в расчет вероятность [Assumed probability]
Коэффициент Селянинова [the Selyaninov's coefficient]	0	–
Стандартизированный индекс осадков [Standardized pluviometric index]	1	$6,4 \cdot 10^{-3}$
Глювиометрический коэффициент [Pluviometric coefficient]	1	$6,2 \cdot 10^{-2}$

\*время наблюдения 15 лет  
[\*the period of monitoring is 15 years]

<sup>4</sup>РБ-134-17 [SG-134-17 (In Russ.)]

<sup>5</sup> Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010): Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26.04.2010 No 40 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 11.08.2010, регистрационный No 18115), с изменениями, внесенными постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 16.09.2013 No 43 (зарегистрировано Минюстом России 05.11.2013, регистрационный No 30309) (далее – ОСПОРБ 99/2010). [Basic sanitary rules for the provision of radiation safety (OSPORB 99/2010). Sanitary rules and norms SP 2.6.1.2612-10. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 26.04.2010 No. 40 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 11.08.2010, registration No. 18155), as amended by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 16.09.2013 No. 43 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 05.11.2013, registration No. 30309) (hereinafter – OSPORB 99/2010). (In Russ.)]

Вероятность реализации экстремальных ветровых нагрузок в районе расположения водоемов ТКВ оценена ниже (см. таблицу 3). В расчетах радиационного воздействия в рамках данного исследования используются оценки вероятности одновременного возникновения засушливости и экстремальных ветровых нагрузок как произведение вероятностей каждого из этих событий в отдельности.

*Оценка площади осушенной береговой линии ТКВ*

С целью определения запасенной активности по данным инструментальных измерений, смоделированы площади осушаемой береговой линии ТКВ. Зависимости площади осушенной береговой линии при падении уровня воды на 2,32 м представлены на рисунке 2 для всех водоемов в виде диаграмм размаха с указанием средних и медианных значений. Ожидаемые площади осушения береговой линии находятся в диапазонах от 0,02 до 0,08 км<sup>2</sup> для водоема В-3, от 0,06 до 0,3 км<sup>2</sup> для водоема В-4, от 0,2 до 0,9 км<sup>2</sup> для водоема В-10 и от 0,5 до 2,2 км<sup>2</sup> для водоема В-11.

*Оценка запасенной активности в литоральной области ТКВ*

Для расчета запасенной активности использовались минимальные значения удельной активности радионуклидов в донных отложениях водоемов, так как в пределах береговой линии концентрация радионуклидов в водоеме будет меньше. Консервативная оценка запаса активности в береговой линии ТКВ проводилась для максимального значения перепада уровня воды в ТКВ – 2,32 метров (таблица 2). При падении уровня воды в водоемах ТКВ от 217,32 до 215,00 метров, ожидаемые величины запасенной активности в осушенной береговой линии составят от  $1,3 \cdot 10^{11}$  Бк до  $4,2 \cdot 10^{14}$  Бк для <sup>137</sup>Cs и от  $5,7 \cdot 10^9$  Бк до  $2,5 \cdot 10^{12}$  Бк для <sup>90</sup>Sr.

По запасенной активности <sup>90</sup>Sr в береговой линии водоемы ТКВ расположились в порядке убывания следующим образом: В-3 > В-4 > В-10 > В-11. По запасенной активности <sup>137</sup>Cs последовательность водоемов иная: В-4 > В-3 > В-11 > В-10.

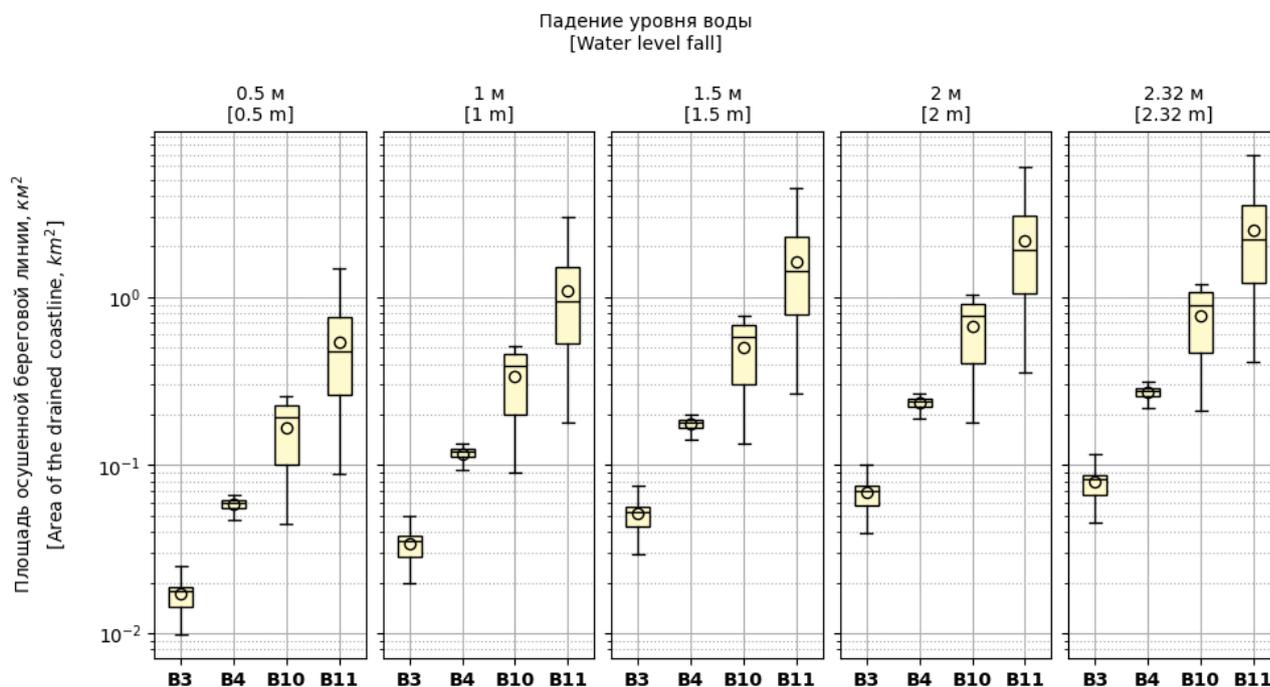


Рис. 2. Площадь осушенной береговой линии водоема В-3, В-4 и В-10, В-11 при изменении уровня воды в логарифмическом масштабе

[Fig. 2. The area of the drained coastline of the reservoir V-3, V-4 and V-10, V-11 on the water level change on logarithmic scale]

Таблица 2

Оценка запасенной активности в литоральной области водоемов ТКВ

[Table 2

Cumulative activity assessment in TRC littoral zone]

Водоем [Reservoir]	Площадь водоема, км <sup>2</sup> [Overall reservoir area, km <sup>2</sup> ]	Длина береговой линии, м [Coastline length, m]	Осушенная площадь*, км <sup>2</sup> [Drained coastline area, km <sup>2</sup> ]	Запасенная активность осушенной площади, Бк [Cumulative activity in drained coastline, Bq]	
				<sup>90</sup> Sr	<sup>137</sup> Cs
В-3 [V-3]	0,5	$6,2 \cdot 10^3$	0,08	$2,5 \cdot 10^{12}$	$3,7 \cdot 10^{13}$
В-4 [V-4]	1,3	$1,5 \cdot 10^4$	0,3	$8,3 \cdot 10^{11}$	$4,2 \cdot 10^{14}$
В-10 [V-10]	19,0	$6,4 \cdot 10^4$	0,9	$4,4 \cdot 10^{10}$	$1,3 \cdot 10^{11}$
В-11 [V-11]	44,0	$1,3 \cdot 10^5$	2,2	$5,7 \cdot 10^9$	$1,3 \cdot 10^{12}$

\*Медианное значение [The median value]

Поступление активности в атмосферу

Результаты расчета поднявшейся активности от ветровых нагрузок продолжительностью 3600 секунд и 60 секунд, а также оценка вероятности превышения заданной скорости ветра представлены в таблице 3. Оценка вероятности превышения заданной скорости ветра определялась как частота появления данного события в год с использованием данных о скоростях ветра метеостанции Аргаяш с 2006 по 2023 год.

Эффективная доза для населения от разового ветрового подъема активности осушенной береговой линии ТКВ

В оценке возможного радиационного воздействия на население при эксплуатации ТКВ рассматривался сценарий нарушения нормальной эксплуатации в результате

ветрового переноса радиоактивных веществ с береговой линии. Под таким сценарием понимается реализация засушливой погоды, которая способствует понижению уровня водоема, в сочетании с высокими значениями скорости ветра. Поступление активности в атмосферный воздух и вклад в дозу от каждого единичного элемента береговой линии площадью 22,5 тыс. м<sup>2</sup> оценивались отдельно. При расчетах эффективных доз исходным параметром являлось значение поднявшейся активности при экстремальных ветровых нагрузках со скоростью ветра 5 м/с и 20 м/с (см. таблицу 3). Полученные оценки эффективных доз облучения населения ближайших населенных пунктов за счет ветрового переноса радиоактивных веществ с береговой линии ТКВ с продолжительностью ветровой нагрузки 3600 с представлены в таблице 4.

Таблица 3

Величина поднятой активности в зависимости от скорости ветра

[Table 3]

Removed activity values dependence of wind speed]

Скорость ветра, м/с [Wind speed, m/s]	Активность, выброса, Бк [Activity released into the atmospheric air, Bq]		Вероятность превышения ветра заданной скорости [Wind speed limit exceedance probability]
	t = 3600 сек. [t = 3600 s]	t = 60 сек. [t = 60 s]	
5	3,7 · 10 <sup>8</sup>	6,1 · 10 <sup>6</sup>	6 · 10 <sup>-2</sup>
10	2,7 · 10 <sup>11</sup>	4,6 · 10 <sup>9</sup>	2 · 10 <sup>-4</sup>
15	7,0 · 10 <sup>11</sup>	1,2 · 10 <sup>10</sup>	2 · 10 <sup>-5</sup>
20	8,5 · 10 <sup>11</sup>	1,4 · 10 <sup>10</sup>	2 · 10 <sup>-5</sup>

Таблица 4

Результаты расчета эффективных доз облучения населения ближайших населенных пунктов за первые 10 суток и первый год после разового выброса

[Table 4]

Results of calculation of effective doses to the population of the nearest settlements for 10 days after incident and 1 year after incident]

Населенный пункт [Settlement]	Эффективная доза от разового выброса, мкЗв [Effective dose from single release, μSv]			
	Первые 10 суток [First 10 days after release]		Первый год [First year after release]	
	Скорость ветра 20 м/с [Wind speed 20 m/s]	Скорость ветра 5 м/с [Wind speed 5 m/s]	Скорость ветра 20 м/с [Wind speed 20 m/s]	Скорость ветра 5 м/с [Wind speed 5 m/s]
Метлино [Metlino]	3,9	4,7 · 10 <sup>-3</sup>	2,5 · 10 <sup>2</sup>	3,2 · 10 <sup>-1</sup>
Озерск [Ozersk]	2,9	3,2 · 10 <sup>-3</sup>	2,5 · 10 <sup>2</sup>	3,2 · 10 <sup>-1</sup>
Худайбердинский [Khudayberdinskiy]	2,7	2,8 · 10 <sup>-3</sup>	2,5 · 10 <sup>2</sup>	3,1 · 10 <sup>-1</sup>
Новогорный [Novogornyy]	2,7	2,9 · 10 <sup>-3</sup>	2,5 · 10 <sup>2</sup>	3,1 · 10 <sup>-1</sup>
Ибрагимова, Башакуль [Ibragimova, Bashakul']	2,2	2,0 · 10 <sup>-3</sup>	2,5 · 10 <sup>2</sup>	3,1 · 10 <sup>-1</sup>
Новая Теча [Novaya Techa]	3,1	3,4 · 10 <sup>-3</sup>	2,5 · 10 <sup>2</sup>	3,2 · 10 <sup>-1</sup>
Большой Куяш, [Bol'shoy Kuyash]	2,3	2,2 · 10 <sup>-3</sup>	2,5 · 10 <sup>2</sup>	3,1 · 10 <sup>-1</sup>
Татыш [Tatysh]	2,3	2,1 · 10 <sup>-3</sup>	2,5 · 10 <sup>2</sup>	3,1 · 10 <sup>-1</sup>
Касли [Kasli]	2,1	1,8 · 10 <sup>-3</sup>	2,5 · 10 <sup>2</sup>	3,1 · 10 <sup>-1</sup>
Кыштым [Kyshtym]	1,9	1,5 · 10 <sup>-3</sup>	2,5 · 10 <sup>2</sup>	3,1 · 10 <sup>-1</sup>

Для с. Метлино представлены гистограммы вкладов значений эффективных доз облучения населения, формируемых в результате поступления радионуклидов от ингаляции и с продуктами питания, внешнего облучения от облака и поверхности почвы от радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  (рисунок 3), а также гистограммы вкладов в суммарное значение эффективной дозы от береговой линии водоемов (рисунок 4) при скорости ветра 20 м/с.

Для консервативной оценки вероятности прогнозируемых эффективных доз при возникновении разового загрязнения атмосферы  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , при ветровом переносе радиоактивных веществ с береговой линии ТКВ, были использованы:

- арифметическое среднее значений вероятности реализации засушливости, полученных на основе данных из таблицы 1;
- значения вероятности превышения заданной скорости ветра из таблицы 3.

При условии взаимной независимости этих событий (реализации засушливости и превышения скорости ветра заданной скорости) вероятность их совместного появления равна произведению вероятностей каждого из них в отдельности. Таким образом, вероятность реализации засушливости совместно с появлением ветра со скоростью 20 м/с составляет  $6,8 \cdot 10^{-7}$  в год, а с появлением ветра со скоростью 5 м/с –  $2,1 \cdot 10^{-3}$  в год.

#### *Численные значения индикаторов безопасности состояния береговой линии ТКВ*

Оценка площади осушенной поверхности водоемов производилась умножением ширины осушения на длину береговой линии каждого водоема (см. таблицу 2). Расчеты годовой эффективной дозы при различной ширине осушения береговой линии и разового выброса  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  показали:

- ветер скоростью 5 м/с не сформирует такое загрязнение атмосферного воздуха и территории ближайших к ТКВ населенных пунктов, которое приводит к облучению населения дозой 1 мЗв даже при полном пересыхании всех водоемов;
- при скорости ветра 20 м/с достаточно осушения поверхности береговой линии шириной 22 м у каждого водоема ТКВ для формирования облучения населения ближайшего поселения (п. Метлино) величиной 1 мЗв.

Оценка возможной ширины осушения береговой линии показала, что для достижения в течение года облучения населения дозой 100 мкЗв от разового ветрового подъема требуется:

- для скорости ветра 5 м/с – полное высыхание водоемов В-3 и В-4, а ширина осушения береговой линии В-10 и В-11 должна быть не менее 1800 м;
- для скорости ветра 20 м/с достаточно 2 м ширины осушенной береговой линии.

Облучение дозой 100 мкЗв за первые 10 дней после разового ветрового подъема возможно при осушении береговой линии водоемов шириной не менее 370 и скорости ветра не менее 20 м/с.

В качестве скрининговой оценки потенциального радиационного воздействия на проживающее вблизи ТКВ насе-

ление могут применяться парные индикаторы – скорость ветра и ширина осушения береговой линии водоемов:

- ширина осушения 2 м, скорость ветра не менее 20 м/с – будет сигнализировать о возможности облучения населения дозой 100 мкЗв за год;
- ширина осушения 22 м, скорость ветра не менее 20 м/с – будет сигнализировать о возможности облучения населения дозой 1 мЗв за год;
- ширина осушения 370 м, скорость ветра не менее 20 м/с – будет сигнализировать о возможности облучения населения дозой 1 мЗв за первые 10 дней;
- полное осушение В-3 и В-4, ширина осушения В-10 и В-11 1800 м, скорость ветра 5 м/с – будет сигнализировать о возможности облучения населения дозой 100 мкЗв за год.

В случае одновременного достижения или превышения представленных парных индикаторов потребуется подтверждение по данным мониторинга отсутствия загрязнения атмосферного воздуха и территории населенных пунктов, способных сформировать облучение выше 100 мкЗв и 1 мЗв в год.

### **Заключение**

В рассмотренном сценарии падения уровня водоемов ТКВ на 2,32 м. максимальное значение площади осушенной береговой линии может составлять 3,5 км<sup>2</sup>. Запас активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  для максимального значения площади осушенной береговой линии составляет более  $10^{14}$  Бк и  $10^{12}$  Бк соответственно.

Согласно теории ветровой эрозии почв, при скорости ветра 5 м/с продолжительностью 3600 секунд величина поднятой активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  может достигать  $3,7 \cdot 10^8$  Бк, при скорости ветра 20 м/с –  $8,5 \cdot 10^{11}$  Бк. Вероятность события, связанного с переносом указанной для малых ветровых нагрузок (5 м/с) активности, составляет  $2,1 \cdot 10^{-3}$  в год. В этом случае максимальная эффективная доза для населения ближайших населенных пунктов за первые 10 суток и за первый год после разового выброса  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  не превышает  $10^{-3}$  мкЗв и  $10^{-1}$  мкЗв соответственно. По наблюдениям на метеостанции в с. Аргаяш с 2006 года скорость ветра 5 м/с реализуется в 6,6% случаев.

При экстремальных ветровых нагрузках (20 м/с) подъем активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  с вероятностью  $6,8 \cdot 10^{-7}$  в год формирует облучение населения за первые 10 суток и за первый год после разового выброса на уровне 1 мкЗв и 200 мкЗв соответственно. Основной вклад в эффективную дозу будет формироваться за счет ветрового подъема активности с осушенной поверхности береговые линии водоемов В-3 и В-4, так как содержание радиоактивных веществ в донных отложениях этих водоемов значительно выше, чем в В-10 и В-11. Для  $^{137}\text{Cs}$  основным источником поступления является водоем В-4 (более 80%), для  $^{90}\text{Sr}$  – водоем В-3 (более 75%). За первые 10 суток после разового выброса основной путь облучения населения для  $^{137}\text{Cs}$  – от поверхности почвы, для  $^{90}\text{Sr}$  – ингаляционное поступление. За первый год после разового выброса для обоих радионуклидов – облучение при поступлении с продуктами питания.

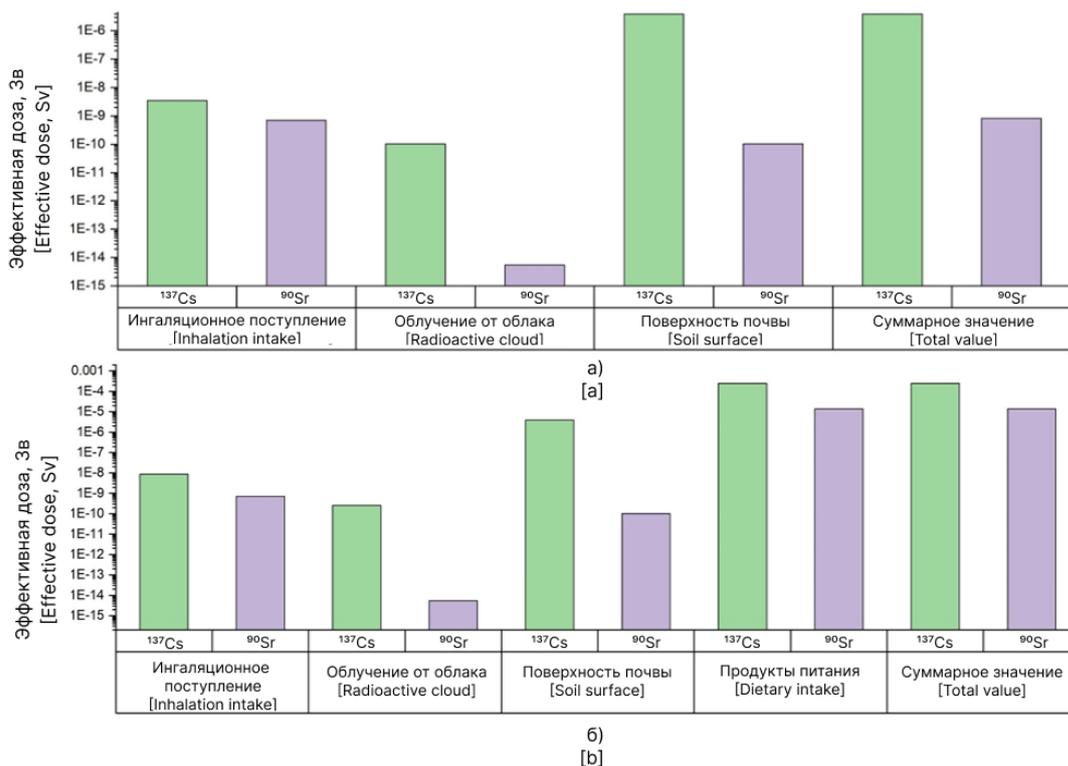


Рис. 3. Эффективные дозы для жителей с. Метлино за первые 10 суток (а) и за первый год (б) после разового выброса

[Fig. 3. Effective doses for villagers of Metlino for first the first 10 days (a) and first year (b) after single release]

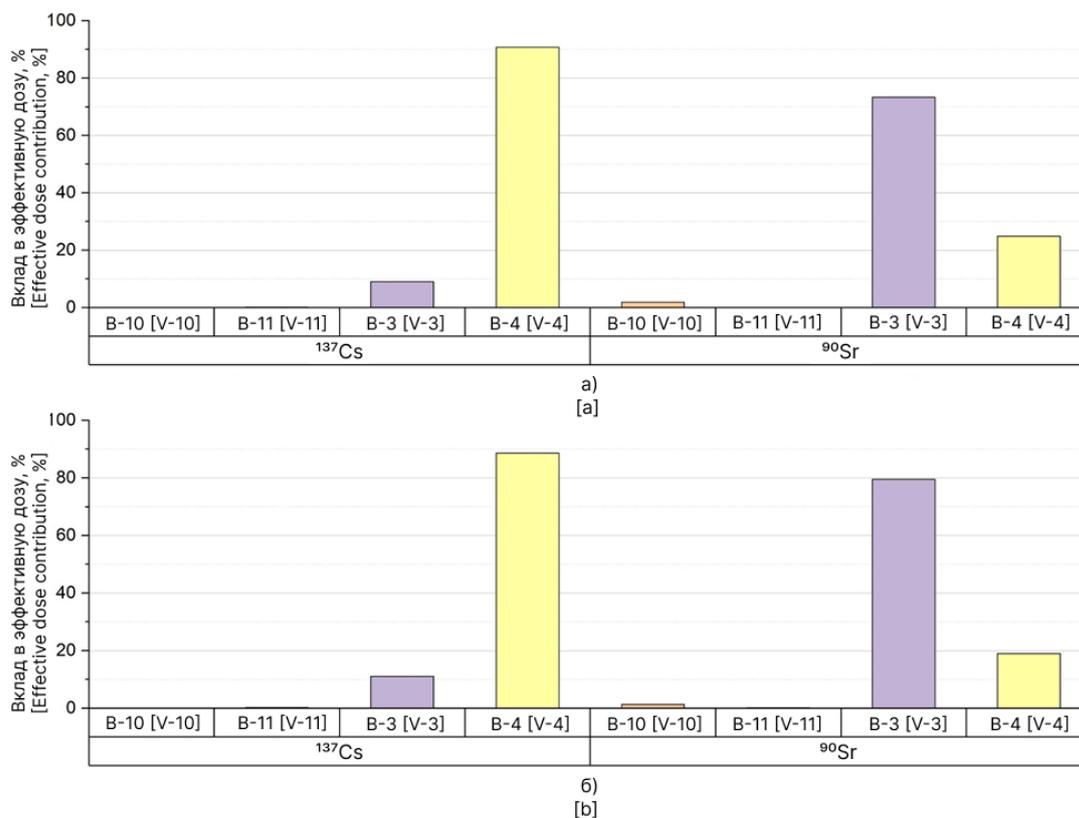


Рис. 4. Вклад водоемов в формирование эффективных доз для жителей с. Метлино за первые 10 суток (а) и за первый год (б) после разового выброса

[Fig. 4. Reservoirs contribution to the effective dose value for villagers of Metlino for the first 10 days (a) and first year (b) after single release]

Таким образом, наибольшие значения эффективной дозы для населения ближайших населенных пунктов, составляющие 1-3 мкЗв за первые 10 суток и более 200 мкЗв за первый год, достигаются при экстремальных ветровых нагрузках со скоростью ветра 20 м/с и более. Для скрининговой оценки потенциального радиационного воздействия на проживающее вблизи ТКВ население в результате разового ветрового подъема <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr определены значения парных индикаторов – скорость ветра и ширина осушения береговой линии. Достижение или превышение значений парных индикаторов потребует подтверждения отсутствия загрязнения атмосферного воздуха и территории населенных пунктов, способных сформировать облучение выше допустимых уровней 100 мкЗв и 1 мЗв в год.

#### Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Пыхова А.В. провела поиск и анализ литературных данных, определила цели и задачи, выполнила расчет эффективных доз, написала черновик рукописи и предоставила окончательный вариант рукописи в журнал.

Екидин А.А. осуществлял общее научное руководство исследованием, отредактировал промежуточный вариант рукописи, утвердил окончательный вариант рукописи для публикации.

Васянович М.Е. внес существенный вклад в разработку концепции исследования, отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Антонов К.Л. внес существенный вклад в анализ и интерпретацию данных, отредактировал промежуточный вариант рукописи.

#### Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов при выполнении работы и подготовки данной статьи.

#### Литература

1. Линге И.И., Мокров Ю.Г., Уткин С.С. и др. Теченский каскад водоемов ФГУП «ПО «Маяк»: текущее состояние и перспективы // Вопросы радиационной безопасности. 2011. № 1 (61). С. 5-14.
2. Мокров Ю.Г. Реконструкция и прогноз радиоактивного загрязнения реки Теча: дисс. ... д-ра техн. наук. Озерск, 2005. 297 с.
3. Мокров Ю.Г. Радиоактивное загрязнение прибрежных участков в результате уноса водного аэрозоля с акватории реки Течи // Вопросы радиационной безопасности. 2023. № 4 (112). С. 69-81.
4. Екидин А.А., Антонов К.Л., Васянович М.Е., Назарович А.В. Формирование загрязнения тритием атмосферного воздуха над акваториями промышленных водоемов // Радиоактивные отходы. 2022. № 4 (21). С. 103-113. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-4-103-113.
5. Востротин В.В., Янов А.Ю. Оценка уровня годового поступления трития в воздух с поверхности озера Кызылташ // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 88-96. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-88-96.
6. Мызникова О.Г., Панченко С.В., Уткин С.С. Оценка опасности ветрового выноса радиоактивных веществ с береговой линии промышленных водоемов ПО «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. 2011. № 2 (62). С. 56-66.
7. Шарафутдинов Р.Б., Кузнецов Л.А., Богданова Т.Ю. Использование систем индикаторов безопасности зарубежными органами регулирования ядерной и радиационной безопасности // Ядерная и радиационная безопасность. 2008. № 2 (48). С. 3-9.
8. IAEA Nuclear Safety and Security Glossary. Terminology used in nuclear safety, nuclear security, radiation protection

and emergency preparedness and response. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2022. 248 p.

9. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2023 год. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. М.: Росгидромет, 2024. 104 с.
10. Тетерин А.Ф. Смерчи в Челябинской области и в районе размещения ФГУП «Производственное объединение «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. 2016. № 3 (83). С. 25-35.
11. Александрович И.П., Маркелов Ю.И., Тетерин А.Ф. Оценка мезоклиматических условий региона Восточно-Уральского радиоактивного загрязнения степени их влияния на дефляцию радионуклидов // Экология урбанизированных территорий. 2009. № 2. С. 39-42.
12. Мокров Ю.Г., Алексахин А.И. Мониторинг – основа обеспечения безопасности при выполнении работ по консервации водоема Карачай // Радиоактивные отходы. 2018. № 3 (4). С. 60-68.
13. Семенов А.И., Дубровская Л.Л. Некоторые аспекты организация надзора за техногенными источниками ионизирующего излучения в Челябинской области // Радиационная гигиена. 2012. Т. 5, № 2. С. 48-51.
14. Последствия техногенного радиационного воздействия и проблем реабилитации Уральского региона / под ред. С.К.Шойгу. М.: Издательство «Комтехпринт», 2002. 287 с.
15. Зигангиров А.Р., Макеева Е.С., Екидин А.А. Радиационное воздействие на территориях с повышенным содержанием цезия-137 в почве // АНРИ. 2023. № 4 (115). С. 51-63. DOI: 10.37414/2075-1338-2023-115-4-51-63.
16. Уткин С.С. О роли Теченского каскада водоемов в долгосрочном прогнозе радиоактивного загрязнения реки Течи // Радиационная гигиена. 2016. Т. 9, № 3. С. 36-42. DOI: 10.21514/1998-426X-2016-9-3-36-42.
17. Официальный сайт Федерального Государственного Унитарного Предприятия «Производственное Объединение «Маяк». Отчет по экологической безопасности ФГУП «ПО «Маяк» за 2020 год. URL: [https://www.pomayak.ru/local/ОТЧЕТ\\_2020.pdf](https://www.pomayak.ru/local/ОТЧЕТ_2020.pdf) (Дата обращения 23.12.2021).
18. Садовников В.И., Глаголенко Ю.В., Дрожко Е.Г. и др. Современное состояние и пути решения проблем Теченского каскада водоемов // Вопросы радиационной безопасности. 2002. № 1 (26). С. 3-14.
19. Рерих В.И., Каргаполов В.С. Радиоэкологическая характеристика левобережного и правобережного каналов Теченского каскада водоемов ПО «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. 2002. № 3 (28). С. 61-66.
20. Мокров Ю.Г., Алексахин А.И. Деятельность ФГУП «ПО «Маяк» по обеспечению безопасной эксплуатации Теченского каскада водоемов // Вопросы радиационной безопасности. 2018. № 4 (92). С. 13-28.
21. Мокров К.Ю., Мокров Ю.Г. Изучение параметров источника генерации водного аэрозоля с акватории водоема Карачай // Вопросы радиационной безопасности. 2016. № 1 (81). С. 20-29.
22. Мокров К.Ю., Мокров Ю.Г. Изучение загрязнения атмосферы вблизи водоема Карачай в результате ветрового уноса водного аэрозоля с его поверхности // Вопросы радиационной безопасности. 2017. № 1 (85). С. 67-79.
23. Стукалов П.М. Радиоактивное загрязнение промышленного водоема ПО «Маяк» Старое Болото: обзор результатов исследовательских работ (1949-2006 годы). Озерск: Ред.-изд. центр ВРБ, 2007. 20 с.
24. Официальный сайт Всемирной Метеорологической Организации. Справочник по показателям и индексам засушливости. URL: [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=3192](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=3192) (Дата обращения 18.08.2023).
25. Сайт компании ООО «Расписание Погоды». URL: <https://rp5.ru> (Дата обращения 25.08.2023).

Поступила: 25.09.2023

**Пыхова Александра Владимировна** – аспирант, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Адрес для переписки: 620002, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19; E-mail: a.v.nazarovich@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8738-6054

**Екидин Алексей Акимович** – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

ORCID: 0000-0002-1204-5949

**Васянович Максим Евгеньевич** – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

ORCID: 0000-0002-2277-4512

**Антонов Константин Леонидович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

ORCID: 0000-0001-6583-9358

Для цитирования: Пыхова А.В., Екидин А.А., Васянович М.Е., Антонов К.Л. Анализ безопасности при ветровом подъеме радиоактивных веществ с береговой линии Теченского каскада водоемов // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 3. С. 114–124. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-114-124.

---

## Safety analysis of wind-induced resuspension of radioactive materials from the Techensky reservoir cascade coastline

Aleksandra V. Pykhova<sup>1</sup>, Aleksey A. Ekinin<sup>2</sup>, Maksim E. Vasyanovich<sup>2</sup>, Konstantin L. Antonov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Eltsin, Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

*The paper provides an assessment of the probability and consequences of external events capable of leading to an incident with a breach of established safety barriers restricting the spread of radioactive substances along the coastline of the Techensky reservoir cascade. The initiating events for such an incident could be adverse meteorological conditions resulting in a decrease in the water level in the cascade water bodies below the specified design levels. Drying out the surface of previously inundated sections of the coastline will create an extensive source of atmospheric contamination by technogenic radionuclides during wind-induced resuspension. The probable area of the dried-out sections will be 0.02 – 0.08 kmI for reservoir V-3, 0.06 – 0.28 kmI for reservoir V-4, 0.19 – 0.90 kmI for reservoir V-10, and 0.47 – 2.19 kmI for reservoir V-11. The cumulative inventory of <sup>137</sup>Cs and <sup>90</sup>Sr in the specified area exceeds 10<sup>6</sup> Bq/ml. The activity released into the atmosphere within an hour will range from 3.69·10<sup>8</sup> to 8.48·10<sup>11</sup> Bq for the wind speeds of 5 m/s and 20 m/s, respectively. The probabilities of joint occurrence of strong winds and drought conditions are 6.8·10<sup>-7</sup> per year for a wind speed of 20 m/s and 2.1·10<sup>-3</sup> per year for a wind speed of 5 m/s. The highest values of effective dose for the population of the nearest settlements, reaching 1–3 μSv in the first 10 days and over 200 μSv in the first year, are achieved under extreme wind loads with wind speeds of 20 m/s or more.*

**Key words:** Techensky reservoir cascade, technogenic radionuclides, wind-induced resuspension, atmospheric air, transport model, effective dose, safety indicators.

### Authors' personal contribution

Pykhova A.V. – search and analysis of literature data, defining goals and objectives, calculating effective doses, writing a draft of the manuscript and submitting the final version of the manuscript to the journal.

Ekinin A.A. – carrying out the general scientific management of the research, editing the intermediate version of the manuscript, approving the final version of the article for publication.

Vasyanovich M.E. – making significant contribution to the development of the research concept, editing the intermediate version of the manuscript.

Antonov K.L. – making significant contribution to the analysis and interpretation of the data, editing the intermediate version of the manuscript.

### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest in the performance of the work and preparation of this article.

---

**Aleksandra V. Pykhova**

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Eltsin

Адрес для переписки: Mira Str., 19, Ekaterinburg, 620002, Russia; E mail: a.v.nazarovich@mail.ru

References

- Linge II, Mokrov YuG, Utkin SS, Baranov SV, Batorshin GSh, Glinskii ML, et al. Techensky reservoir cascade of FGUP «PO «Mayak»: current condition and avenue. *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti = Radiation Safety Issues*. 2011;1: 5-14. (In Russian).
- Mokrov YuG. Techa the river radioactive contamination remodelment and prediction: diss. doctor of engineering science. Ozersk. 2005; 297 p. (In Russian).
- Mokrov YuG. Radioactive contamination of coastal areas as a result of the removal of water aerosol from the water area of the river Techa. *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti = Radiation Safety Issues*. 2023;4: 69-81. (In Russian).
- Ekidin AA, Antonov KL, Vasyanovich ME, Nazarovich AV. Formation of atmospheric air pollution with tritium over the water areas of industrial reservoirs. *Radioaktivnyye Otkhody = Radioactive Wastes*. 2022;4: 103-113. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-4-103-113. (In Russian).
- Vostrotin VV, Yanov AYu. Assessment of the level of annual income tritium into the air from the surface of Lake Kyzyltash. *Radiatsionnaya Gigiyena = Radiation Hygiene*. 2022;4(15): 88-96. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-88-96. (In Russian).
- Myznikova OG, Panchenko SV, Utkin SS. Hazard evaluation for wind removal of radioactive substances from the shoreline of industrial reservoirs "PO "Mayak". *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti = Radiation Safety Issues*. 2011;2: 56-66. (In Russian).
- Sharafutdinov RB, Kuznetsov LA, Bogdanova TYu. The use of safety indicator systems by foreign nuclear and radiation safety regulatory authorities. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost = Nuclear and radiation safety*. 2008;2: 3-9. (In Russian).
- IAEA Nuclear Safety and Security Glossary. Terminology used in nuclear safety, nuclear security, radiation protection and emergency preparedness and response. Vienna: IAEA; 2022. 248 p.
- A report on the peculiarities of the climate in the territory of the Russian Federation for 2023. Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring. Moscow: Rosgidromet; 2024. 104 p. (In Russian).
- Teterin AF. Tornadoes in the Chelyabinsk region and in the area of the FGUP «PO «Mayak». *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti = Radiation Safety Issues*. 2016;3: 25-35. (In Russian).
- Aleksandrychev IP, Markelov Yul, Teterin AF. Assessment of the mesoclimatic conditions of the East Ural radioactive contamination region and the degree of their influence on the deflation of radionuclides. *Ekologiya urbanizirovannykh territoriy = Ecology of urbanized territories*. 2009;2: 39-42. (In Russian).
- Mokrov YuG, Aleksakhin AI. Monitoring as a basis of ensuring safety of conservation process of the Karachai reservoir. *Radioaktivnyye Otkhody = Radioactive Wastes*. 2018;3: 60-8. (In Russian).
- Semenov AI, Dubrovskaya LL. Some aspects of organising supervision over artificial sources of ionizing radiation in Chelyabinsk region. *Radiatsionnaya Gigiyena = Radiation Hygiene*. 2012;5(2): 48-51. (In Russian).
- Consequences of man-made radiation exposure and problems of rehabilitation of the Ural region. Ed. by S.K. Shoigu. Moscow: Komtekhpriint; 2002. 287 p. (In Russian).
- Zigangirov AR, Makeeva ES, Ekidin AA. Radiation exposure in areas with a high content of caesium-137 in the soil. *Apparatura i novosti radiatsionnykh izmereniy = Radiation measurement equipment and news*. 2023;4: 51-63. DOI: 10.37414/2075-1338-2023-115-4-51-63. (In Russian).
- Utkin SS. On the Techa's reservoirs cascade influence on the long-term forecast of the Techa river radioactive contamination. *Radiatsionnaya Gigiyena = Radiation Hygiene*. 2016;3(9): 36-42. DOI: 10.21514/1998-426X-2016-9-3-36-42. (In Russian).
- Mayak Rosatom. Environmental Safety Report of FSUE "PO "Mayak" for 2020. Available from: [https://www.pomayak.ru/local/OTCHET\\_2020.pdf](https://www.pomayak.ru/local/OTCHET_2020.pdf) [Accessed: 23.12.2021]. (In Russian).
- Sadovnikov VI, Glagolenko YuV, Drozhko YeG, Mokrov YuG, Stukalov PM. The current state of the Techensky reservoirs cascade and ways to solve its' problems. *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti = Radiation Safety Issues*. 2002;1: 3-14. (In Russian).
- Rerikh VI, Kargapolov VS. Radioecological characteristics of the left-bank and right-bank channels of the Techensky reservoirs cascade of "PO "Mayak". *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti = Radiation Safety Issues*. 2002;3: 61-6. (In Russian).
- Mokrov YuG, Aleksakhin AI. The activities of FSUE "PO "Mayak" for the safe operation of the Techensky reservoirs cascade insurance. *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti = Radiation Safety Issues*. 2018;4: 13-28. (In Russian).
- Mokrov KYu, Mokrov YuG. Research on parameters of the source of water aerosol generation from the water area of the Karachai reservoir. *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti = Radiation Safety Issues*. 2016;1: 20-9. (In Russian).
- Mokrov KYu, Mokrov YuG. Research of atmospheric pollution near the Karachai reservoir as a result of wind uplift of water aerosol from its surface. *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti = Radiation Safety Issues*. 2017;1: 67-79. (In Russian).
- Stukalov PM. Radioactive contamination of an industrial reservoir named Staroye Boloto by FSUE "PO "Mayak": review of research results (1949-2006). Ozersk: Tsentr VRB; 2007. 20 p. (In Russian).
- World Meteorological Office. Handbook of indicators and indices of aridity. Available from: [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=3192](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=3192) [Accessed: 18.08.2023]. (In Russian).
- OOO «Weather Schedule». Available from: <https://rp5.ru>. [Accessed: 25.08.2023]. (In Russian).

Received: September 25, 2023

**For correspondence: Aleksandra V. Pykhova** – post-graduate student, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Eltsin (Mira Str., 19, Ekaterinburg, 620002, Russia; E-mail: [a.v.nazarovich@mail.ru](mailto:a.v.nazarovich@mail.ru))

ORCID: 0000-0001-8738-6054

**Aleksey A. Ekidin** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, lead research fellow, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

ORCID: 0000-0002-1204-5949

**Maksim E. Vasyanovich** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, research fellow, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

ORCID: 0000-0002-2277-4512

**Konstantin L. Antonov** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior research fellow, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

ORCID: 0000-0001-6583-9358

**For citation: Pykhova A.V., Ekidin A.A., Vasyanovich M.E., Antonov K.L. Safety analysis of wind resuspension of radioactive materials from the Techensky reservoir cascade coastline. *Radiatsionnaya Gigiyena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 3. P. 114–124. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-114-124.**