DOI: 10.25283/2587-9707-2026-1-79-87 УДК 556.3.06; 621.311.25;504.064

ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ БРЫЗГАЛЬНЫХ БАССЕЙНОВ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ НА ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Д. А. Петров, А. А. Кульянова, Д. В. Коннов

ФГБУ «Гидроспецгеология», Москва

Статья поступила в редакцию 27 января 2026 г.

В статье представлен подход к оценке воздействия брызгальных бассейнов атомной электростанции (АЭС) на подземные воды с использованием численного моделирования. Для этих целей разработана геофильтрационная модель на основе данных объектного мониторинга состояния недр и архивных материалов исследуемой территории, которая откалибрована по результатам многолетних наблюдений за уровнями подземных вод на промплощадке АЭС. В качестве источника радиационного воздействия принято аэрозольно-паровое облако рассеивания, формирующееся при эксплуатации брызгальных бассейнов (ББ) и содержащее тритиевую воду (НТО). *Определение формы источника его поступления в подземные воды определялось в ходе решения обратной задачи. По результатам геомиграционного моделирования массовый поток трития в подземные воды составил около 292 ГБк/год, что соответствует примерно 4% от суммарных выбросов из ББ в атмосферу. Ореолы распространения трития стабилизируются через 20—25 лет от их современного состояния, при этом его максимальные концентрации в подземных водах не превышают 1 800 Бк/л. Сделан вывод о необходимости учета ББ как источника радиационного воздействия на подземные воды. Предложены направления совершенствования подхода к оценке, включающие в себя верификацию на других площадках АЭС, сопряженное моделирование воздушных и подземных потоков.*

Ключевые слова: *подземные воды, брызгальные бассейны АЭС, аэрозольно-паровое облако, тритий, геофильтрационное моделирование, геомиграция радионуклидов, радиационная безопасность, радиоактивные отходы.*

Введение

При эксплуатации ББ АЭС за счет капельного уноса и испарения формируются аэрозольно-паровые облака, содержащие в себе радионуклиды, при этом выпадение аэрозольных частиц на дневную поверхность и их дальнейшее просачивание до уровня грунтовых вод остается практически неизученным и недооцененным в рамках оценки радиационной безопасности. Недостаточное понимание этого процесса снижает достоверность прогнозов миграции радионуклидов в геофильтрационном потоке и может приводить к занижению комплексной оценки радиационного загрязнения подземных вод. В действующих подходах влияние на них объектов АЭС рассматривается преимущественно как следствие фильтрационных потерь

или воздействия источников, имеющих прямой контакт с грунтовыми водами. Для повышения обоснованности оценки радиационной безопасности подземных вод необходим подход, учитывающий воздействие на них ББ.

Пренебрежение данным потенциальным воздействием может привести к неконтролируемому радиационному загрязнению подземных вод, которые впоследствии могут использоваться для питьевого водоснабжения или разгружаться в поверхностные водоемы и стоки. На 5 из 11 существующих в России АЭС (45 %) эксплуатируются ББ, что делает их потенциальным источником загрязнения подземных вод.

При оценке влияния на них атомных электростанций традиционно рассматриваются объекты использования атомной энергии (ОИАЭ), такие как хранилища отходов, реакторные сооружения и др. [1]. Учет ББ в рамках комплексной оценки воздействия АЭС на подземные воды позволяет получить более полное представление об экологической обстановке исследуемой территории, а также ее результаты могут использоваться при дальнейшем формировании программ радиационного мониторинга, что, в свою очередь, способствует увеличению достоверности прогнозных оценок.

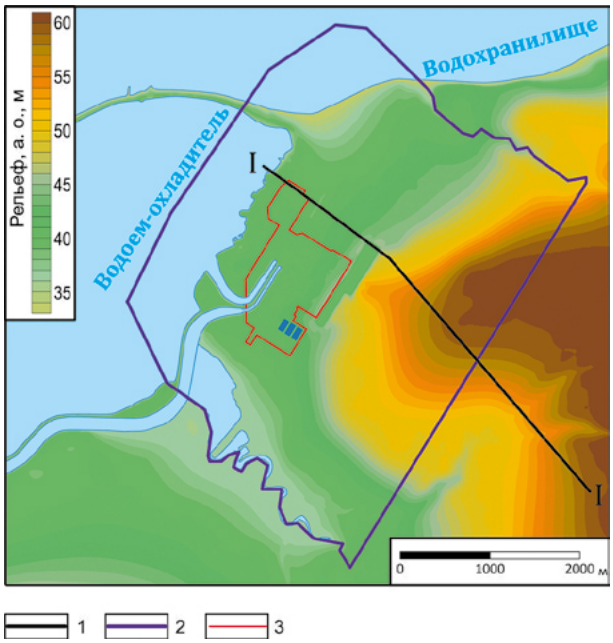
В работах Э. Г. Братуты и Т. И. Ярошенко (1988 г.) [2] представлен расчет выноса капельной влаги из ББ, который в среднем для станции мощностью около 6 ГВт может соответствовать потерям воды до $3 \cdot 10^5$ м^3/сут. По данным, приведенным в статье А. А. Екидина (2022 г.) [3], он составляет порядка 1,5 % от общего объема воды, участвующего в циркуляции. В исследовании А. А. Строганова (2014 г.) [4] отмечается, что около 80 % выбросов из брызгальных бассейнов обусловлено ветровым уносом в виде капель и около 20 % в виде пара.

В указанных выше работах прежде всего сделан упор на воздействие ББ на атмосферу и оценку дозовых нагрузок на население вследствие воздушного переноса радионуклидов, что является важнейшим аспектом радиационной безопасности. Однако авторы не рассматривают влияние уносимой влаги на подземные воды, хотя, несмотря на то что их объемы существенно меньше той части, которая рассеивается в атмосфере, их радиационное воздействие может быть недооценено. Для решения данной проблемы, а также прогнозирования распространения радионуклидов в геофильтрационном потоке в текущем исследовании предлагается методика оценки воздействия ББ АЭС на подземные воды с использованием численного моделирования.

Характеристика исследуемой территории

Атомная электростанция расположена на юге Российской Федерации.

Территория имеет плавное понижение рельефа в сторону водоемов и рек (рис. 1).

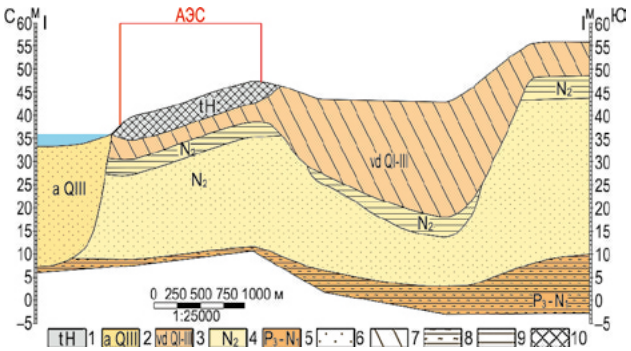


1 — линия разреза I—I; 2 — граница области моделирования; 3 — граница промплощадки АЭС

Рис. 1. Карта рельефа исследуемой территории

Гидрогеологические условия района промплощадки АЭС характеризуются наличием двух водоносных горизонтов (рис. 2).

Первый от поверхности водоносный горизонт эолово-делювиальных четвертичных отложений имеет повсеместное распространение. Он сложен слабопроницаемыми суглинками с коэффициентами фильтрации около 0,5 м/сут.



1 – техногенный насыпной слой; 2 – верхнечетвертичный аллювиальный водоносный горизонт; 3 – слабоводоносный нижне-верхнечетвертичный эолово-делювиальный водоносный горизонт; 4 – неогеновые отложения; 5 – водоупорный олигоцен-нижнемиоценовый горизонт; 6 – пески; 7 – суглинки лессовидные, легкие, средние; 8 – глины с прослоями алевритов и песков; 9 – глины; 10 – щебень, галька, суглинок

Рис. 2. Геолого-гидрогеологический разрез по линии I–I

Второй водоносный горизонт также имеет повсеместное распространение и сложен хорошо проницаемыми неоген-четвертичными песками с коэффициентом фильтрации около 10 м/сут.

Их питание происходит в основном за счет атмосферных осадков, а разгрузка — преимущественно в акваторию водохранилища и водоема-охладителя.

Между горизонтами залегают водоупорные глины, однако они характеризуются спорадическим распространением, что создает гидравлическую связь между ними. Нижняя граница второго водоносного горизонта представлена глинистой толщей мощностью до 100 м, имеющей региональное распространение.

На АЭС ведется постоянный объектный мониторинг состояния недр (ОМСН) по более 100 скважинам, оборудованным на оба водоносных горизонта. В рамках программы мониторинга фиксируются данные об уровнях, температурах, химическом и радионуклидном составе подземных вод.

Обработка и анализ исходных данных

По результатам обработки данных мониторинга установлено, что воздействия на поверхностные воды не происходит; а в подземных выявлено превышение фоновых значений трития (^{3}H), при этом его активность не превышала нормативного уровня вмешательства, равного 7 600 Бк/л (НРБ-99/2009 [5]).

За фоновое содержание трития принимается значение 1,7 Бк/л, соответствующее его среднегодовой активности в основных реках центра Европейской территории России, согласно данным ежегодника о радиационной обстановке в стране [6].

В первом от поверхности водоносном горизонте, сложенном эолово-делювиальными суглинками с низкими фильтрационными параметрами, фильтрация подземных вод носит преимущественно вертикальный характер.

Повышенное содержание трития в нем фиксируется периодически в отдельных скважинах. Источниками такого воздействия могут быть возможные утечки из водонесущих коммуникаций.

Во втором от поверхности водоносном горизонте, сложенном хорошо проницаемыми неоген-четвертичными песками, формируется латеральный геофильтрационный поток. Здесь фиксируются устойчивые превышения содержания трития относительно фоновых значений с небольшим трендом на повышение (рис. 3), что указывает на постоянное радиационное воздействие на подземные воды.

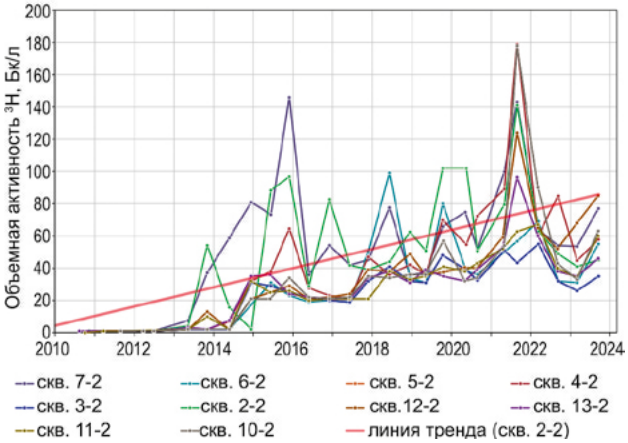


Рис. 3. Объемная активность трития в скважинах, оборудованных на второй водоносный горизонт

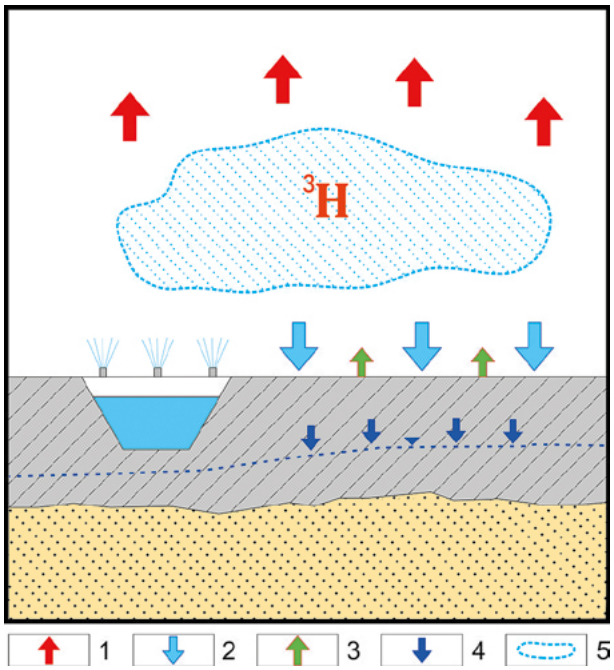
Рост объемной активности трития в пробах воды из скважин, оборудованных на второй водоносный горизонт, связан с эксплуатацией ББ. Охлаждение технических вод происходит путем разбрызгивания воды через систему сопел над бассейном. В процессе разбрызгивания часть воды выносится ветром и испаряется, что приводит к образованию аэрозольно-парового облака вблизи сооружений. При этом определенное количество уносимой воды рассеивается в атмосфере, а остальное выпадает с каплями на дневную поверхность. Аэрозольные частицы с тритием частично испаряются, а оставшаяся фаза инфильтруется на уровень грунтовых вод и мигрируют в геофильтрационом потоке (рис. 4).

Согласно данным Э. Г. Братуты (1988 г.) и А. А. Екидина (2022 г.), суммарный вынос воды из ББ составляет порядка 1–1,5 % от циркулирующего объёма, что для АЭС мощностью около 6 ГВт соответствует потерям до $3{\cdot}10^5$ м^3/сут. При этом объемная активность трития в их воде может достигать 56 000 Бк/л, превышая нормативный уровень вмешательства примерно в 7 раз [2], [3].

Для учета разделения выбросов из брызгальных бассейнов на капельную и паровую фазы использовались данные из публикации А. А. Строганова [4], согласно которым около 80 % из них обусловлено ветровым уносом воды в виде капель, а около 20 % – в виде пара. Значения выбросов трития при эксплуатации резервуаров приведены в табл. 1.

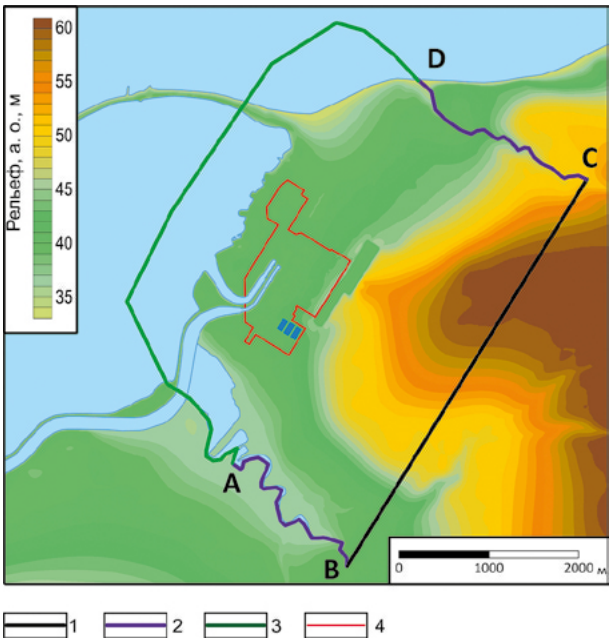
Таблица 1. Выбросы трития в атмосферу при эксплуатации брызгальных бассейнов [4]

Вид выброса	Активность трития, ГБк/год
Унос с паром	1 300
Капельный унос	5 800
Всего	7 100



1 – рассеивание влаги в атмосфере; 2 – оседание влаги на дневной поверхности; 3 – процесс испарения и транспирации влаги с дневной поверхности; 4 – инфильтрация влаги до уровня подземных вод; 5 – аэрозольно-паровое облако с тритием

Рис. 4. Схематизация процесса формирования аэрозольно-парового облака рассеивания в процессе эксплуатации ББ и пути его разгрузки



1 — внешнее граничное условие II рода по контуру BC (Q=const); 2, 3 — внешние граничные условия III рода ($Q=f(h)$ по контурам AB, CD (балки) и AD (водохранилище); 4 — граница промплощадки АЭС

Рис. 5. Граничные условия геофильтрационной модели

Можно предположить, что некоторое поступление трития в грунтовые воды происходит вследствие фильтрационных потерь из ББ, однако, как отмечено в статье А. А. Строганова (2014) [4], его выход определяется преимущественно ветровым разносом. Также по данным наблюдений, вблизи брызгальных бассейнов поднятия уровня грунтовых вод, вследствие возможных фильтрационных потерь, не наблюдается.

Геофильтрационное моделирование

Численное моделирование выполнялось в программном комплексе Processing Modflow 8 (Simcore Software) [7], который позволяет проводить трехмерное моделирование потока подземных вод и миграции компонентов, учитывая геологические условия и различные геофильтрационные параметры грунтов (на модели приняты в соответствии с данными изысканий), с использованием расчетного кода MODFLOW-2005.

Для суглинков первого от поверхности водоносного горизонта коэффициент фильтрации составляет 0,5 м/сут, для песков второго — 10 м/сут, для разделяющих водоносные горизонты глин – 0,005 м/сут.

Граничные условия геофильтрационной модели представлены на рис. 5. По всему периметру модели за исключением контура BC, задано граничное условие III рода с реализацией линейной связи напора и расхода: вдоль балок (AB, DC) водохранилища и водоема-охладителя (AD).

По контуру BC задано граничное условие II рода (Q=const), так как через эту границу с юго-востока формируется региональный поток от водораздела. Его значение определено в процессе калибровки. В качестве внутренних граничных условий III рода с реализацией линейной связи напора и расхода заданы водные каналы, расположенные на территории АЭС.

Геофильтрационная модель калибровалась в стационарной постановке по осредненным значениям уровней первого и второго от поверхности водоносных горизонтов в более 100 наблюдательных скважинах, расположенных на промплощадке АЭС. Стандартное отклонение модельных значений от натурных составило 0,31 м. В результате данного процесса были уточнены модули инфильтрационного питания и эвапотранспирации, вертикальные проводимости донных отложений балок, а также водоприток с юго-восточной границы.

Моделирование миграции трития в потоке подземных вод

Геомиграционные расчеты проводились на основе геофильтрационной модели. Как описывалось ранее, источником поступления трития в подземные воды являются не сами бассейны, а

аэрозольно-паровое облако рассеивания, образующееся в процессе их эксплуатации.

Для всех слоев геомиграционной модели учитывалась пористость грунтов, заданная равной 0,35, что является характерным значением для песчано-глинистых отложений [8].

В рассматриваемых условиях зоны активного водообмена диффузионный механизм миграции компонентов в подземных водах и грунтах имеет подчиненное значение. В соответствии с этим при моделировании диффузионный массоперенос не учитывался.

Параметр продольной гидродинамической дисперсии (δ_L) оценивался согласно общепринятому подходу, описанному в работе Schulze-Makuch D. (2005) [9], и в рассматриваемых условиях составлял 13 м. Значение параметра поперечной гидродинамической дисперсии (δ_T) задано как 10 % от параметра δ_L.

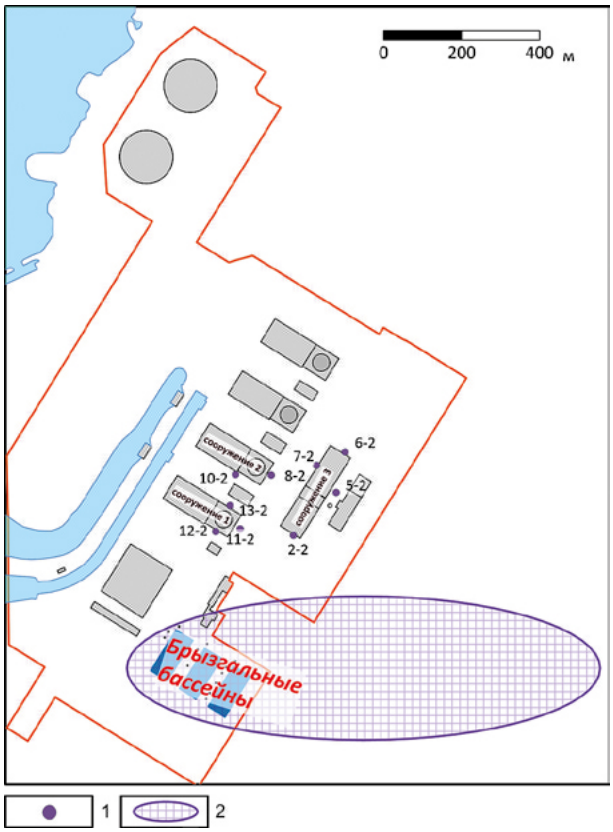
Постоянная распада трития составляет $1{,}5 \cdot 10^{-4}$ (1/сут). Также он рассматривался при геомиграционных расчетах как несорбируемый контаминант.

В первом приближении область поступления трития в зону аэрации и подземные воды была представлена в виде эллипса рассеивания. Ориентация области принималась исходя из предположения о преимущественно ветровом переносе аэрозольно-парового облака ББ и анализа космоснимков, без детального учета климатических характеристик. Окончательные параметры источника (рис. 6) определялись путем решения обратной геомиграционной задачи на основе подбора конфигурации и интенсивности источника, обеспечивающих наилучшее соответствие модельных и натурных значений объемной активности трития в контрольных скважинах.

Геомиграционное моделирование проводилось в стационарной постановке. Принят консервативный вариант, предполагающий стабильный режим работы ББ и отсутствие критических климатических изменений. Процессы просачивания воды в зоне аэрации в данном сценарии не учитывались. Все слои на модели рассматривались как полностью насыщенные.

По результатам геомиграционных расчетов построены графики сопоставления натурных и модельных объемных активностей трития в контрольных скважинах, по которым оценивалась корректность конфигурации и интенсивности источника. Пример такого сравнения приведен на рис. 7.

Результаты моделирования в целом свидетельствуют об удовлетворительном совпадении натурных и модельных данных. Суммарный массовый поток трития, поступающий в



1 — скважина, оборудованная на второй водоносный горизонт и используемая для калибровки геомиграционной модели;
2 — модельный участок поступления трития в подземные воды

Рис. 6. Конфигурация модельного источника (эллипс рассеивания)

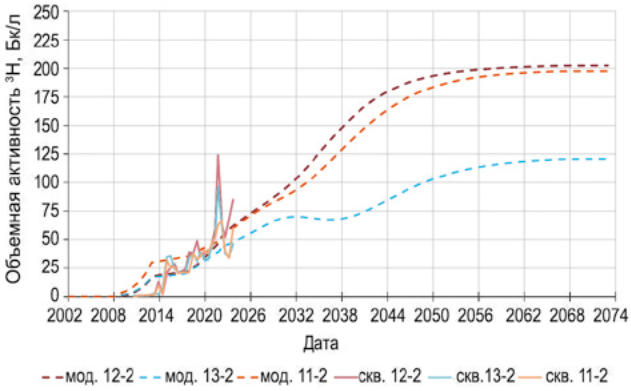
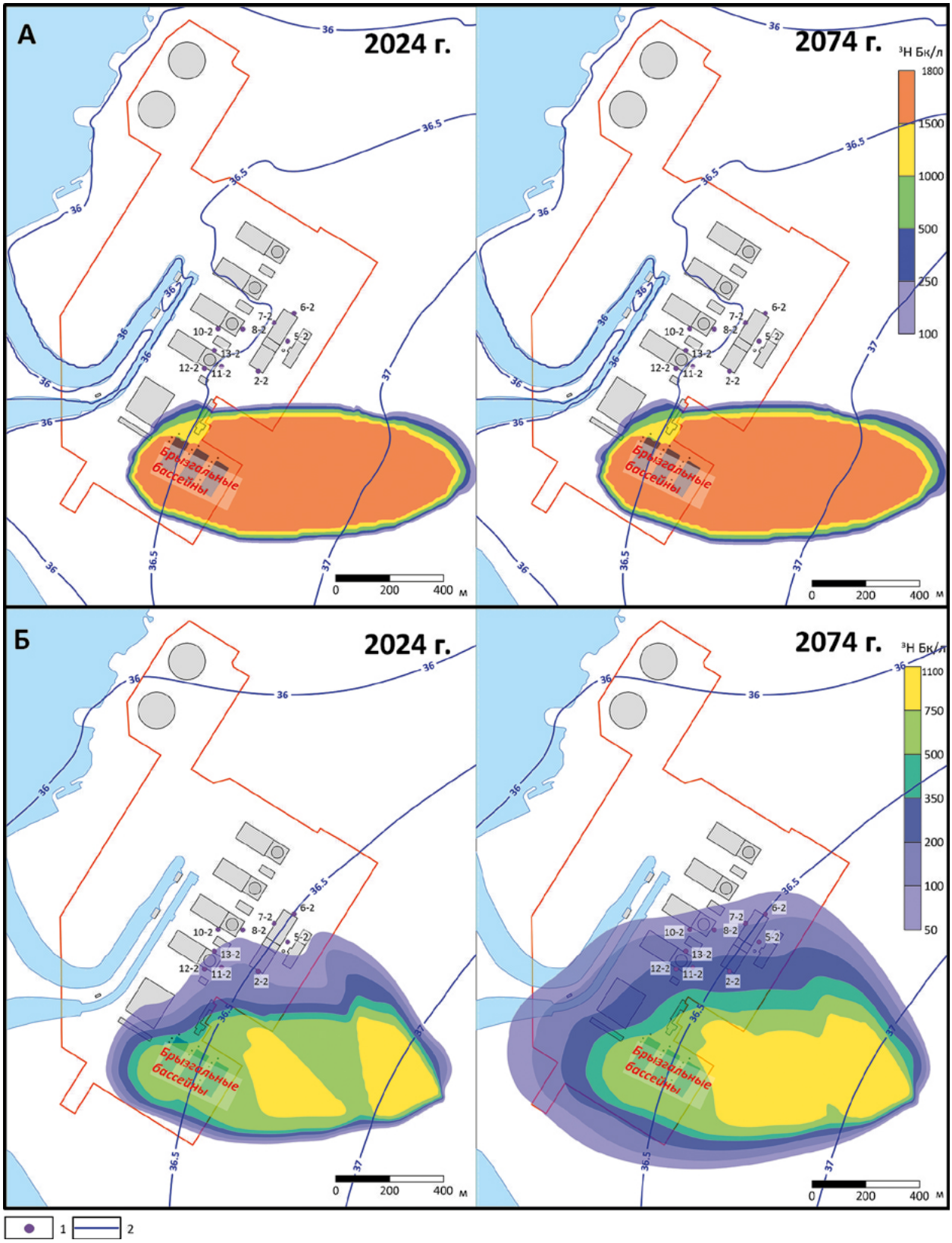


Рис. 7. Графики сопоставления натурных и модельных объемных активностей трития в скважинах

грунтовые воды из ББ, равен около 800 МБк/сут (292 ГБк/год). Полученный результат составляет порядка 4 % от суммарного выхода трития из ББ по данным, представленным в табл. 1 [4].

Ореол трития в первом водоносном горизонте практически не меняется в плане со временем, что связано с низкими фильтрационными параметрами водовмещающих пород, обуславливающих преимущественно вертикальную фильтрацию. Во втором от поверхности водоносном горизонте, сложенном хорошо

проницаемыми песками, преобладает горизонтальное движение подземных вод, вследствие чего ореол со временем распространяется в сторону водохранилища.



1 — скважина, оборудованная на второй водоносный горизонт, используемая для калибровки геомиграционной модели;
2 — модельные гидроизогипсы, с шагом 0,5 м

Рис. 8. Модельные ореолы трития: а) в первом; б) во втором водоносном горизонте

При постоянном режиме работы ББ происходит стабилизация ореолов трития в обоих водоносных горизонтах в плане и разрезе через 20—25 лет относительно их современного состояния. При этом его объемная активность в геофильтрационнном потоке не превышает величины 1 800 Бк/л (рис. 8).

Деградация ореола трития происходит преимущественно вследствие его радиоактивного распада (около 90 %). Оставшиеся 10 % разгружаются за счет эвапотранспирации в грунтах зоны аэрации. Выход трития в поверхностные воды составляет менее 0,01 %, что соизмеримо с погрешностью модельных расчетов.

Моделирование на данном объекте показало, что тритий, поступающий из облака рассеивания, образованного в процессе эксплуатации ББ, не оказывает и не окажет в долгосрочной перспективе существенного влияния на подземные и поверхностные воды в рамках действующих нормативов при сохранении текущего режима эксплуатации резервуаров. Однако для уточнения исходных параметров и верификации модельного источника необходимо провести бурение наблюдательных скважин в зоне прогнозируемого выпадения аэрозольно-паровых частиц, что позволит натурно подтвердить пространственные границы источника.

Выводы

В результате анализа и обработки данных мониторинга, а также научных публикаций [2] — [4], установлен механизм поступления трития в подземные воды в процессе эксплуатации ББ. Это обусловлено капельным и паровым выносом в процессе работы сопел распылителей и испарения с бассейнов, что приводит к образованию аэрозольно-парового облака, содержащего тритий. По результатам расчетов 96 % данного облака рассеивается в атмосфере, а оставшиеся 4 % поступают в грунтовые воды, где далее мигрируют с подземным потоком. При этом часть воды в зоне аэрации может разгружаться в процессе эвапотранспирации. Стоит отметить, что в рамках настоящего исследования процессы фильтрации в зоне аэрации не моделировались.

Хотя на рассматриваемой АЭС воздействие ББ на подземные воды минимально и не превышает нормативных значений, их учет является важным аспектом комплексной оценки влияния объектов АЭС на окружающую среду. Условия эксплуатации и режим работы сооружений могут меняться, что потенциально способно увеличить масштабы радиационного воздействия на подземные воды. Наличие постоянно действующей геомиграционной модели и применение предложенного в статье подхода позволяют своевременно реагировать на возможные изменения источников, а также прогнозировать их влияние. Учитывая, что ББ используются на нескольких АЭС не только в России, но и в мире, и являются потенциальным источником радиационного загрязнения подземных вод, их вклад при комплексной оценке следует рассматривать как обязательный фактор.

Сложность оценки воздействия аэрозольно-парового облака на подземные воды заключается в непостоянстве конфигурации источника, его движении и изменении размеров в зависимости от погодных условий. В данном исследовании на модели он воспроизведен в виде эллипса рассеивания, форма которого в первом приближении определялась на основе анализа космоснимков, без детального учета климатических характеристик. Окончательные параметры источника определялись путем решения обратной геомиграционной задачи.

Несмотря на то, что в рамках настоящего исследования предложен консервативный подход оценки радиационного воздействия ББ на подземные воды, не учитывающий изменения конфигурации и интенсивности источника во времени, а также детальных климатических данных, уже на данном этапе такой подход позволяет получать количественные результаты, на основе которых возможно формировать управляющие решения.

Наиболее перспективным аспектом развития данного подхода является сопряженное моделирование атмосферных и гидрогеологических процессов, а также учет инфильтрации воды в зоне аэрации. Применение моделей воздушных потоков позволит более точно определять область выпадения аэрозольно-паровых частиц на дневную поверхность и задавать ее в качестве источника на геомиграционной модели. В свою очередь, учет процесса просачивания воды в зоне аэрации обеспечивает более обоснованную оценку параметров поступления трития в грунтовые воды.

Дополнительно сопряженное моделирование создает возможность учитывать нестационарный характер источника поступления, обусловленный изменчивостью метеорологических факторов и режимов эксплуатации ББ. Однако на настоящем этапе такой подход требует обширной базы данных климатических условий в непосредственной близости к брызгальным бассейнам, а также увеличивает временные затраты при решении производственных задач.

Для окончательного формирования методики и подтверждения ее практической применимости необходимо выполнение серии расчетов для других АЭС, использующих ББ.

Литература

1. Федеральный закон от 21.11.1995 № 170-ФЗ (ред. от 26.12.2024) «Об использовании атомной энергии».
2. *Братута Э. Г., Ярошенко Т. И.* Расчет выноса капельной влаги из брызгального бассейна АЭС // Известия Академии наук СССР. Энергетика и транспорт. 1988. № 6. С. 99—105.
3. *Екидин А. А., Антонов К. Л., Васянович М. Е., Пышкина М. Д., Меркулов А. Ф., Фоменко П. А.* Обоснование метода оценки поступления трития в атмосферу при охлаждении воды в брызгальных бассейнах Ростовской АЭС // Траектория исследований — человек, природа, технологии. 2022. № 1 (1). С. 86—101.
4. *Строганов А. А., Курындин А. В., Шапалов А. С.* О радиационном воздействии выбросов брызгальных бассейнов атомных станций // Ядерная и радиационная безопасность. 2014. № 4 (74). С. 11—17.
5. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009.
6. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2022 г. : ежегодник / под ред. В. С. Косых, В. М. Шершакова, В. Г. Булгакова и др. — Обнинск : ФГБУ «НПО Тайфун», 2023. 350 с.
7. Simcore Software. Processing Modflow: An Integrated Modeling Environment for the Simulation of Groundwater Flow, Transport and Reactive Processes. 2012.
8. *Шестаков В. М.* Гидрогеодинамика. — М. : КДУ, 2009. 334 с.
9. *Schulze-Makuch D.* Longitudinal Dispersivity Data and Implications for Scaling Behavior // Ground Water. 2005. Vol. 43. No. 3. Pp. 443—456.

Информация об авторах

Петров Даниил Афанасьевич, ведущий специалист отдела математического моделирования, ФГБУ «Гидроспецгеология» (123060, Москва, ул. Маршала Рыбалко, д. 4), e-mail: leroy-danpetrov@yandex.ru, e-mail: petrovda@msnr.ru.

Кульянова Анна Александровна, главный специалист отдела математического моделирования, ФГБУ «Гидроспецгеология» (123060, Москва, ул. Маршала Рыбалко, д. 4), e-mail: kulyanova@msnr.ru.

Коннов Дмитрий Владимирович, заместитель начальника отдела математического моделирования, ФГБУ «Гидроспецгеология» (123060, Москва, ул. Маршала Рыбалко, д. 4), e-mail: konnov@msnr.ru.

Библиографическое описание статьи

Петров Д. А., Кульянова А. А., Коннов Д. В. Оценка радиационного воздействия брызгальных бассейнов атомной электростанции на подземные воды с использованием численного моделирования // Радиоактивные отходы. 2026. № 1 (34). С. 79—87. DOI: 10.25283/2587-9707-2026-1-79-87.

NUCLEAR POWER PLANT SPRAY PONDS: NUMERICAL MODELING ASSESSMENT OF THEIR RADIATION IMPACT ON GROUNDWATER

Petrov D. A., Kulyanova A. A., Konnov D. V.

FSBI "Gidrospetzgeologiya", Moscow, Russia

Article received on January 27, 2026

This paper presents a numerical modeling approach to assessing the impact of nuclear power plant (NPP) spray ponds on groundwater. It elaborates on a hydrogeological flow model developed based on site-specific subsurface monitoring data and records available on the studied area calibrated based on long-term observations over

groundwater levels at the NPP site. The paper considers an aerosol-steam dispersion cloud containing tritium formed during spray pond operation as a source of radiation exposure. It elaborates on the shape of the modeled source of tritium releases into groundwater calculated via inverse modeling. Model data on radionuclide transport in geological environment showed that annual tritium mass flux into groundwater was approximately 292 GBq/year, which corresponded to about 4% of the total atmospheric releases from spray ponds. In 20—25 years, tritium dispersion plumes tend to stabilize as compared to their current state with maximum tritium concentrations in groundwater not exceeding 1800 Bq/L. The study concludes that spray ponds should be treated as sources of radiation impact on groundwater. It proposes some focus areas to improve the assessment approach, including its verification at other NPP sites and coupled modeling of atmospheric and subsurface flows.

Keywords: *groundwater, NPP spray ponds, aerosol-steam cloud, tritium, hydrogeological flow modeling, radionuclide transport in geological environment, radiation safety, radioactive waste.*

References

1. Federal Law of November 21, 1995 No. 170-FZ (as amended on December 26, 2024) *Ob ispol'zovanii atomnoy energii* [On Atomic Energy Use].
2. Bratuta E. G., Yaroshenko T. I. Raschet vynosa kapel'noy vlagi iz bryzgal'nogo basseyna AES [Calculation of Droplet Moisture Removal from a NPP Spray Pond]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Energetika i transport — Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Power Engineering and Transport,* 1988, no. 6, pp. 99—105.
3. Ekidin A. A., Antonov K. L., Vasyanovich M. E., Pyshkina M. D., Merkulov A. F., Fomenko P. A. Obosnovaniye metoda otsenki postupleniya tritiya v atmosferu pri okhlazhdenii vody v bryzgal'nykh basseynakh Rostovskoy AES [Substantiation of the Method for Assessing the Tritium Release into the Atmosphere When Cooling Water in the Spray Ponds of the Rostov NPP]. *Trayektoriya issledovaniy — chelovek, priroda, tekhnologii — Research Trajectory — Human, Nature,* Technology, 2022, no. 1 (1), pp. 86—101.
4. Stroganov A. A., Kuryndin A. V., Shapalov A. S. O radiatsionnom vozdeystvii vybrosov bryzgal'nykh basseynov atomnykh stantsiy [The Radiation Exposure Due to Discharges of Nuclear Power Plants Spray Ponds]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' — Nuclear and Radiation Safety Journal,* 2014, no. 4 (74), pp. 11—17.
5. SanPiN 2.6.1.2523-09. *Normy radiatsionnoy bezopasnosti* [Radiation Safety Standards] NRB-99/2009.
6. *Radiatsionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nykh gosudarstv v 2022 g.: yezhegodnik* [Radiation Environment in Russia and Adjacent States in 2022: Yearbook]. Edited by V. S. Kosykh, V. M. Shershakov, V. G. Bulgakov et al. Obninsk, FGBU NPO Tayfun Publ., 2023. 350 p.
7. Simcore Software. Processing Modflow: An Integrated Modeling Environment for the Simulation of Groundwater Flow, Transport and Reactive Processes. 2012.
8. Shestakov V. M. *Gidrogeodinamika* [Hydrogeodynamics]. Moscow, KDU Publ., 2009. 334 p.
9. Schulze-Makuch D. Longitudinal Dispersivity Data and Implications for Scaling Behavior. *Ground Water,* 2005, vol. 43, no. 3, pp. 443—456.

Information about the authors

Petrov Daniil Afanasievich, Leading Specialist in the Mathematical Modeling Department, FSBI "Gidrospetzgeologiya" (4, Marshal Rybalko st., Moscow, 123060, Russia), e-mail: leroy-danpetrov@yandex.ru, e-mail: petrovda@msnr.ru.

Kulyanova Anna Alexandrovna, Chief Specialist of the Mathematical Modeling Department, FSBI "Gidrospetzgeologiya" (4, Marshal Rybalko st., Moscow, 123060, Russia), e-mail: kulyanova@msnr.ru.

Konnov Dmitry Vladimirovich, Deputy Head of the Mathematical Modeling Department, FSBI "Gidrospetzgeologiya" (4, Marshal Rybalko st., Moscow, 123060, Russia), e-mail: konnov@msnr.ru.

Bibliographic description

Petrov D. A., Kulyanova A. A., Konnov D. V. Nuclear Power Plant Spray Ponds: Numerical Modeling Assessment of their Radiation Impact on Groundwaterr. *Radioactive Waste,* 2026, no. 1 (34), pp. 79—87. DOI: 10.25283/2587-9707-2026-1-79-87. (In Russian).