

УДК 621.039.7:504.5

40-ЛЕТНЯЯ ИСТОРИЯ ЭВОЛЮЦИИ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ПРЕДПРИЯТИИ ПО ХРАНЕНИЮ И ПЕРЕРАБОТКЕ РАО ЛЕНИНГРАДСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ ФИЛИАЛА «СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫЙ ОКРУГ» ФГУП «РОСРАО»

В. Г. Румынин^{1,2,*}, Д. Н. Замаскин^{3,**}, К. В. Владимиров^{1,*}, А. В. Плотников^{3,**},
И. А. Лелявин^{3,**}, А. М. Никуленков^{1,2,*}, Е. М. Каплан^{1,2,*}, В. А. Ходина^{1,*}

¹Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН;
Средний пр., 41, Санкт-Петербург, 199004 Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле,
Университетская наб., д. 7–9, Санкт-Петербург, 199034 Россия

³Ленинградское отделение филиала «Северо-западный территориальный округ» ФГУП «РосРАО». Промзона,
а/я 5, г. Сосновый Бор, 188540 Ленинградская область, Россия

*E-mail: office@hgepro.ru

**E-mail: len.szto@rosrao.ru

Поступила в редакцию 25.09.2018 г.

На основании анализа многолетних данных по радиационному составу и уровням подземных вод на территории пункта временного хранения радиоактивных отходов РАО, где после утечки РАО в подземные воды в начале 90-х гг. прошлого века сформировались интенсивные радиоактивные ореолы, изучена динамика формирования и эволюции тритиевого загрязнения и загрязнения по величине суммарной альфа- и бета-активности. Дана интерпретация наблюдаемой динамики радиоактивного загрязнения и показана ведущая роль локальных гидродинамических факторов в распространении тритиевого ореола. Отмечены запаздывание перемещения и более ограниченное развитие ореола по бета-активности за счет сорбционного взаимодействия бета-излучающих ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs с вмещающими породами. Показано, что на сегодняшний день территория Ленинградского отделения проходит стадию реабилитации от «исторического» загрязнения. Выполнен комплекс исследований по определению генезиса воды в зданиях-хранилищах твердых радиоактивных отходов и их взаимосвязи с подземными водами и доказано, что в настоящее время поступления радионуклидов в подземные воды из зданий-хранилищ не происходит.

Ключевые слова: мониторинг подземных вод, радиоактивное загрязнение, хранилище твердых радиоактивных отходов, тритиевый ореол, трансерные запуски.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-7809201913-16>

ВВЕДЕНИЕ

Одни из наиболее опасных объектов в отношении радиоактивного загрязнения подземных вод – пункты временного хранения твердых и жидких радиоактивных отходов (РАО), для которых критически важна герметичность и изолированность конструкций от внешней среды. Своевременный контроль состояния подземных вод на таких объектах требует наличия плотной сети мониторинговых скважин и регулярно проводимых в них наблюдений за радиационными показателями. Во многом уникальная ситуа-

ция сложилась на территории пункта хранения радиоактивных отходов (ПХРО) Ленинградского отделения филиала «Северо-западный территориальный округ» ФГУП «РосРАО» (далее – Ленинградское отделение) в Сосновоборском городском округе Ленинградской обл., где непрерывные наблюдения за подземными водами с 1982 г. позволили проследить эволюцию радиоактивных ореолов, сформировавшихся в конце 1980-х гг.

Ленинградское отделение специализируется на сборе, транспортировании, переработке, конди-

ционировании и хранении РАО. Строительство и ввод в эксплуатацию зданий-хранилищ происходили постепенно: первая серия хранилищ ПХРО была построена в 1960-е гг., последнее хранилище возвели в 2011 г. Загрузка отходов в хранилища ПХРО началась в 1963 г.

Большинство хранилищ, построенных в 1970–1980-х гг., представляют собой частично заглубленную конструкцию из сборного или монолитного железобетона, основанием которой служит железобетонная плита толщиной 60 см, уложенная на поверхность насыпного грунта. Каждое хранилище внутри разделено на отсеки (каньоны), которые и заполнялись отходами.

При строительстве вышеописанных хранилищ применялись материалы и технологии (в основном это касалось проекта зданий, качества материалов), которые не были рассчитаны на долговременную герметичность и полную изоляцию РАО от внешней среды. Подробнее конструктивные недостатки хранилищ описаны в работах [1] и [4]. Во время заполнения хранилищ ПХРО сверху в них попадали атмосферные осадки, а в периоды паводков фундаменты хранилищ эпизодически подтапливались подземными водами. В связи с этим факты повышения радиоактивности подземных вод вблизи хранилищ ПХРО отмечались уже через 2-5 лет после их ввода в эксплуатацию [1].

Принятые в 1990-е гг. меры по реконструкции хранилищ и локализации последствий утечек жидких РАО включали в себя строительство подземного дренажа и глубокой дренажной канавы по контуру границы площадки ПХРО. Скопившаяся в хранилищах вода выкачивалась через пробуренные в стенах хранилищ наклонные и горизонтальные скважины. Для предотвращения попадания в хранилища атмосферных осадков над ними была дополнительно сооружена двускатная кровля, проведена дополнительная гидроизоляция перекрытий и стен. Осуществленные мероприятия помогли существенно сократить поступление радионуклидов в подземные воды.

Тем не менее данные радиационного мониторинга показывают, что и после реконструкции хранилищ на протяжении длительного срока в некоторых контрольно-наблюдательных скважинах, расположенных в непосредственной близости от хранилищ ПХРО, фиксируются устойчиво высокие значения объемной активности трития и суммарной удельной бета-активности. Рост активности трития обнаруживается и в ряде скважин, удаленных от хранилищ.

По этой причине в настоящее время доминируют две в значительной степени противоречащие друг другу точки зрения на причины наблюдае-

мой динамики радиационной обстановки в районе площадки Ленинградского отделения ФГУП «РосРАО». Согласно первой из них, наблюдаемые поля радионуклидного загрязнения являются следствием произошедшего более 40 лет назад аварийного выхода радионуклидов из хранилищ ПХРО, в текущий период времени происходит реабилитация территории, и система мониторинга фиксирует следы «исторического» загрязнения», т.е. медленное перемещение радиоактивных ореолов под влиянием естественного потока подземных вод. Вторая точка зрения объясняет современный рост активности радионуклидов в подземных водах ряда скважин продолжающимися утечками из негерметичных хранилищ ПХРО.

Для оценки сложившейся ситуации на территории площадки и выявления причин наблюдаемых тенденций в изменении радиационного фона подземных вод необходимо было:

1) определить на основе анализа всего массива данных (1982-2017 гг.) режимных наблюдений за радиоактивностью и уровнями подземных вод ведущие закономерности распространения загрязнения в плане и разрезе площадки, в первую очередь проанализировав распределение напоров и направления фильтрации подземных вод;

2) оценить современное состояние фона, выполнив для этого, если необходимо, ряд дополнительных исследований;

3) оценить герметичность хранилищ ПХРО и их взаимосвязь с подземными водами.

Это позволило проследить историю развития и причины современного распределения ореолов загрязнения на площадке, а также в более общем виде определить факторы и процессы, которые влияют на эволюцию ореолов загрязнения подземных вод в местах расположения пунктов хранения радиоактивных отходов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Начиная с 1982 г. на площадке ПХРО Ленинградского отделения «ФГУП «РосРАО»» службой радиационной безопасности ведутся непрерывные измерения радиационных показателей в подземных водах, а с 2003 г. проводятся замеры уровней воды. Помимо этого, детальные исследования проблемы радиоактивного загрязнения подземных вод промышленной зоны г. Сосновый Бор (включая ПХРО) проводили в начале 1990-х гг. несколько научных и производственных организаций: НПО «Радиевый институт», ФГУП «Гидроспецгеология», СПбО ИГЭ РАН,

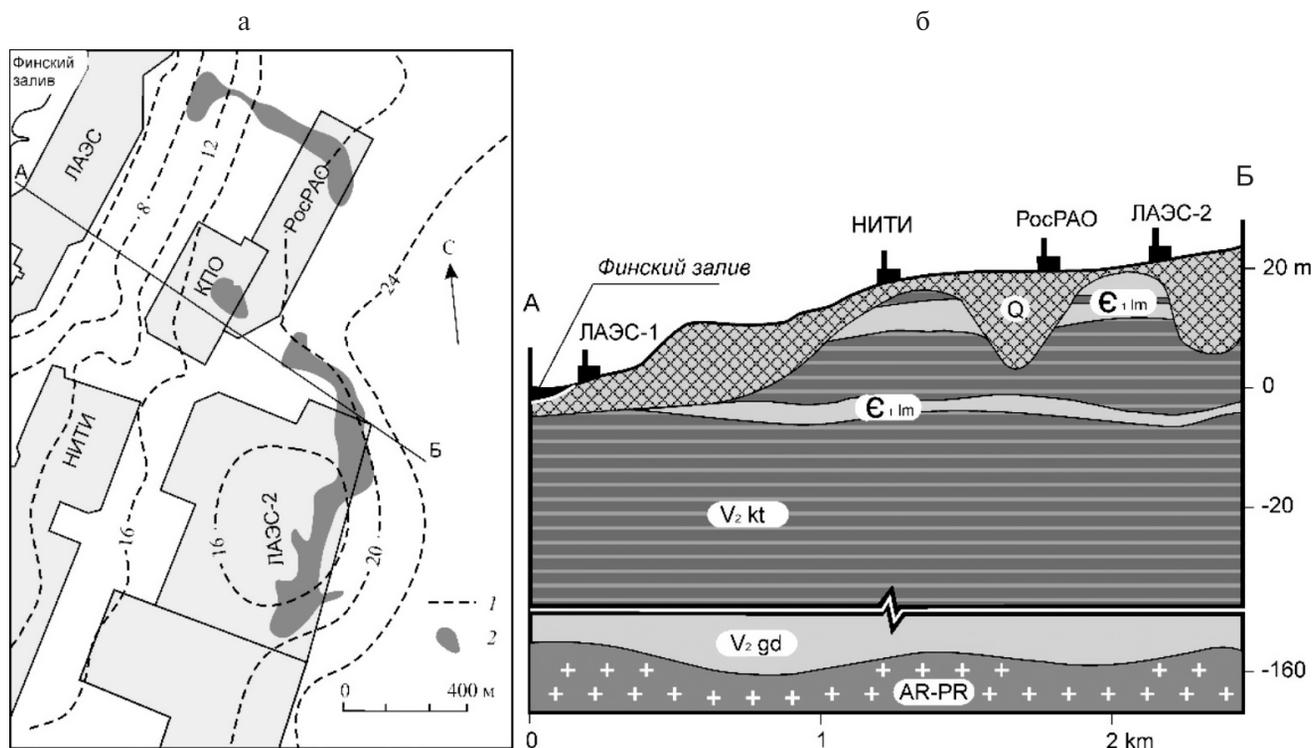


Рис. 1. Схема расположения площадки ПХРО и близлежащих промышленных предприятий (а) и схематический геологический разрез (б) территории: 1 – изолинии равных напоров верхнего водоносного комплекса; 2 – контуры палеодолин. Названия предприятий даны в тексте.

ВО ВНИПИЭТ, ГПП «Севзапгеология», МНЦ Гидрогеоэкологии СПбГУ. Результаты этих исследований были проанализированы и систематизированы в работах [1, 2, 5]. Несмотря на значительный объем выполненных определений, хорошую методическую и лабораторную базу проведенных исследований, не было достигнуто целостного представления о развитии процесса радиоактивного загрязнения площадки, и вопрос об источнике современного загрязнения подземных вод оставался открытым.

Методика проведения настоящего исследования включала:

- анализ ранее выполненных работ по мониторингу подземных вод на площадке Ленинградского отделения ФГУП «РосРАО» и сопредельной территории;
- постановку и проведение наблюдений за радиационным и уровнем режимом подземных вод площадки по имеющейся сети мониторинга;
- бурение и опробование дополнительных наблюдательных скважин;
- обобщение всех имеющихся наблюдений и качественный анализ динамики радиоактивных ореолов по составленным картам и графикам;

- постановку и проведение полевых работ с целью исследования герметичности хранилищ твердых радиоактивных отходов.

ОСОБЕННОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Геологический разрез района исследований представлен осадочным чехлом мощностью 160–180 м, который залегает на кристаллическом фундаменте (рис. 1). До глубины 30 м разрез представлен пестрым чередованием песков, супесей и суглинков четвертичного возраста, а также кембрийскими глинами, песками и песчаниками.

В гидрогеологическом отношении до глубин 30 м можно выделить водоносный горизонт четвертичных отложений (Q_{III-IV}) и нижнекембрийский (ломоносовский) водоносный горизонт (E_{1m}). Четвертичный грунтовый водоносный горизонт имеет мощность не более 7 м и приурочен к надморенному комплексу песков различного генезиса. Максимальные суммарные мощности (до 30 м) четвертичных отложений приурочены к руслам палеодолин. Невыдержанные в разрезе суглинистые прослой в нижней части четвертичных отложений служат локальными относительными

Состав и объемная активность радионуклидов жидкой фазы хранилищ РАО

| Год | Объемная активность, Бк/л | | | | |
|------|---------------------------|-----------------------|------------------|---|----------------------|
| | ¹³⁷ Cs | ⁶⁰ Co | ⁹⁰ Sr | ²³⁹ Pu, ²⁴⁰ Pu/ ²³⁸ Pu | ³ H |
| 1998 | 74 000 (1 036)* | 23.3 | 8 500 | - | 3.7·10 ⁷ |
| 2010 | 12 | - | 110 | 0.1/0.25 | 1.0·10 ⁶ |
| 2011 | 2217 | - | 986 | - | 2.9·10 ⁷ |
| 2013 | 483 | - | 13 | - | 2.0·10 ⁶ |
| 2014 | 229 | - | 94 | 11.8/27.2 | 3.5·10 ⁵ |
| 2015 | 510 | - | 3 300 | - | - |
| 2017 | 357 | <1х10 ^{-2**} | 359 | 0.23/0.19 | 7.6 ·10 ⁵ |

* – активность ¹³⁴Cs. ** – ниже порога определения. «-» – нет данных.

водоупорами. Глубина залегания уровня грунтовых вод составляет в среднем 1.0-2.0 м.

В районе площадки ПХРО ломоносовский водоносный горизонт представлен тремя зонами, сложными, преимущественно, мелкозернистыми кварцевыми песчаниками, разделенными плотными тонкослоистыми глинами. Две верхние зоны вскрыты скважинами в центральной части площадки. К югу и юго-востоку две зоны объединяются в единый водопроницающий слой мощностью до 13 м. Нижняя зона мощностью до 2 м, залегающая на глубинах более 20 м, надежно изолирована от поверхностного загрязнения и не рассматривается в данной работе.

Четвертичный и ломоносовский горизонт гидравлически связаны через гидрогеологические окна, например четвертичные отложения палеодолин, прорезающие все три водоносные зоны ломоносовского горизонта. В районе хранилищ ПХРО за счет инфильтрационного питания уровни подземных вод в четвертичном горизонте устанавливаются выше, чем в ломоносовском. Это формирует предпосылки к нисходящей фильтрации подземных вод на этом участке. В южной части площадки, напротив, четвертичный горизонт сильно сдренирован, здесь наблюдается инверсия уровней.

СОСТАВ РАДИОНУКЛИДОВ В ИСТОЧНИКЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ И ФОНОВЫЕ РАДИАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Обследование каньонов хранилищ ПХРО показывает, что в составе отходов присутствуют как горючие (битум), так и негорючие (грунт, металл, цемент и т.д.) РАО, относящиеся, как правило, к низко- и среднеактивным отходам.

Проникновение влаги в каньоны способствовало формированию внутри хранилищ ПХРО

жидкой радиоактивной фазы (растворов выщелачивания радионуклидов). Исследования качественного и количественного состава радионуклидов жидкой фазы хранилищ проводились с 1998 г. [1]. Гамма-спектрометрический анализ фильтрата проб из каньонов показал наличие изотопов ³H, ¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs, ⁶⁰Co, ⁹⁰Sr, а проведенные альфа-спектрометрические исследования установили в воде каньонов наличие следов изотопов ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu, ²³⁸Pu (табл.).

Из представленных в таблице радионуклидов наиболее короткие периоды полураспада имеют изотопы ⁶⁰Co (5.3 года) и ³H (12.3 года). Таким образом, за время эксплуатации хранилищ ПХРО (50 лет) активность в источнике ⁶⁰Co уменьшилась более чем в 250 раз, а трития – более чем в 8 раз. Это хорошо согласуется с наблюдаемой динамикой содержания техногенных изотопов в воде каньонов хранилищ ПХРО. Так, в 2017 г. ⁶⁰Co уже не регистрировался в пробах, взятых из хранилищ, а активность трития имела нисходящий тренд.

Допустимое содержание (активность) радионуклидов в подземных водах, используемых для водоснабжения, установлено нормами радиационной безопасности (НРБ-99/2009¹) (рис. 2). В то же время для оценки влияния любого объекта обращения с РАО на подземные воды важно понимать, как соотносятся регистрируемая в пробах активность с природными фоновыми значениями, характерными для исследуемого региона.

На формирование радиационного фона в пределах промышленной зоны г. Сосновый Бор и прилегающей территории, помимо ПХРО ФГУП «РосРАО», может влиять целый ряд предприятий, чья деятельность связана с обращением с РАО: Ленинградская атомная станция (ЛАЭС), комплекс по переработке отходов (КПО) ЛАЭС, НИТИ

¹ СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. <http://docs.cntd.ru/document/902170553>.

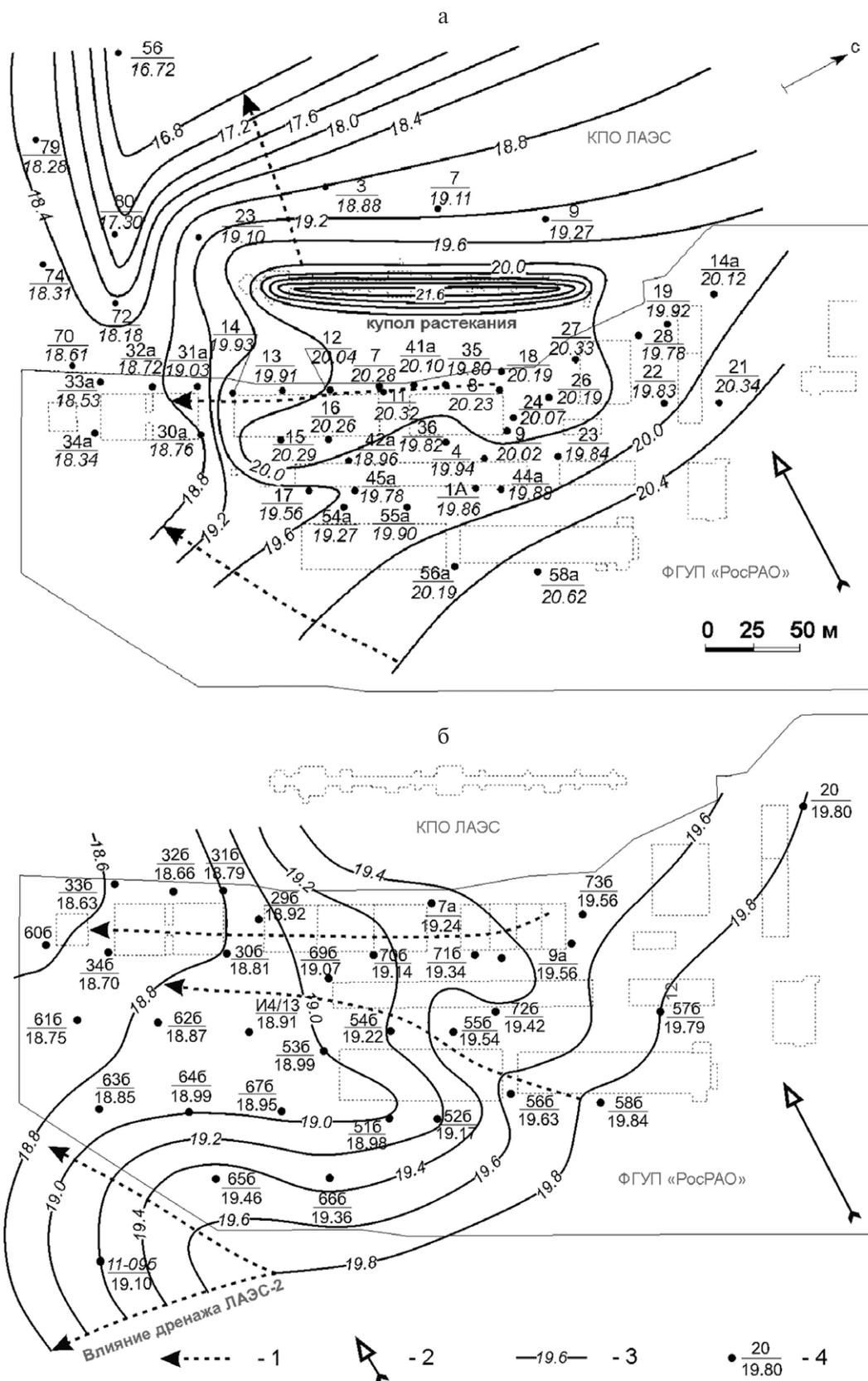


Рис. 2. Карты линий равных напоров: *а* – четвертичного горизонта (март 2015 г.); *б* – ломоносовского горизонта (сентябрь 2017 г.). 1 – линии тока подземных вод, 2 – региональное направление потока подземных вод; 3 – гидро- и пьезоизогипсы; 4 – наблюдательная скважина: в числителе – номер скважины, в знаменателе – абсолютная отметка уровня, м.

им. А.П. Александрова (см. рис. 1). Не затронута техногенным влиянием была лишь юго-восточная часть территории – площадка ЛАЭС-2, до введения в эксплуатацию последней в марте 2018 г.

Многолетние наблюдения за радиационными показателями подземных вод с высокоточными лабораторными измерениями на уровне глобального фона в рамках предоперационного мониторинга на площадке строящейся ЛАЭС-2 и прилегающих территориях позволили получить обоснованные данные о фоновых величинах активности техногенных радионуклидов, характерных для региона в целом [3], которые составили (Бк/л) для ^3H – 1.1-3.5, ^{90}Sr – 0.004-0.030, ^{137}Cs – 0.004-0.040, альфа-активности – 0.01-0.3, бета-активности – 0.1-0.35. Изучение компонентов фонового состава природных радионуклидов в этих водоносных горизонтах выявило следующие характерные значения природных изотопов (Бк/л): ^{222}Rn – 9, ^{226}Ra – 0.06, ^{224}Ra – 0.01, ^{228}Ra – 0.024, ^{210}Po – 0.004, ^{210}Pb – 0.004, ^{232}Th – 0.002, ^{40}K – 0.1, ^{238}U – 0.005, ^{234}U – 0.007.

НАПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

На основании единовременных замеров уровней подземных вод в двух водоносных горизонтах были построены карты гидроизогипс (рис. 2). Из рисунка в первом приближении видно, что фильтрационные потоки четвертичного и ломоносовского горизонтов направлены с востока на запад к Финскому заливу, подчиняясь общей региональной закономерности. Однако, при более детальном рассмотрении, зеркало грунтовых вод имеет крайне сложную форму с отдельными куполами и депрессиями, обусловленными воздействием как техногенных, так и природных факторов. Например, на карте выделяется характерная куполообразная структура на территории КПО ЛАЭС, которая возникла вследствие подпора подземных вод искусственной насыпью под зданием-хранилищем жидких РАО. В результате подпора уровни подземных вод на площадке Ленинградского

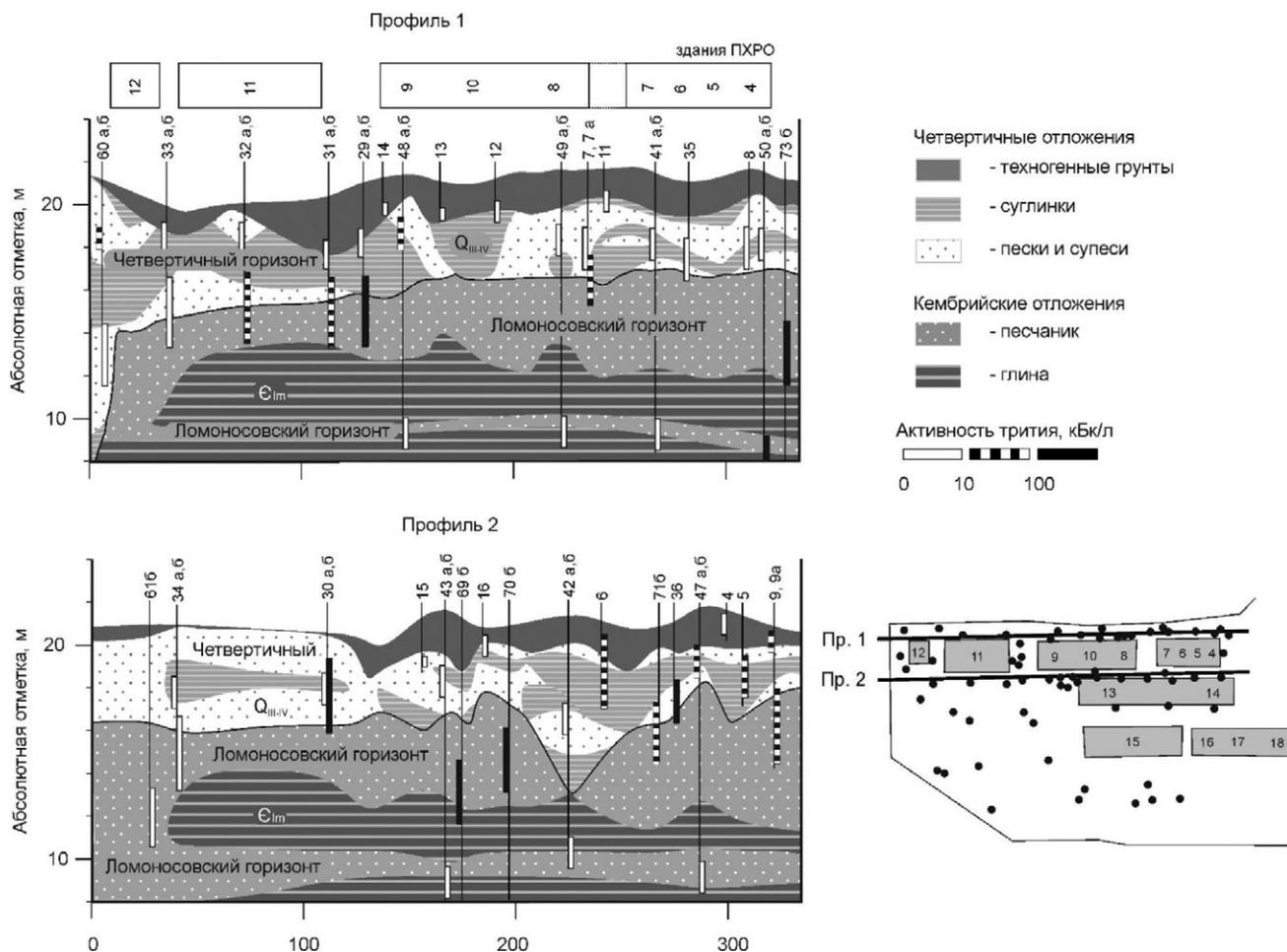


Рис. 3. Распределение трития по скважинам, оборудованным на различные интервалы разреза площадки ПХРО (среднегодовые значения объемной активности за 2017 г.).

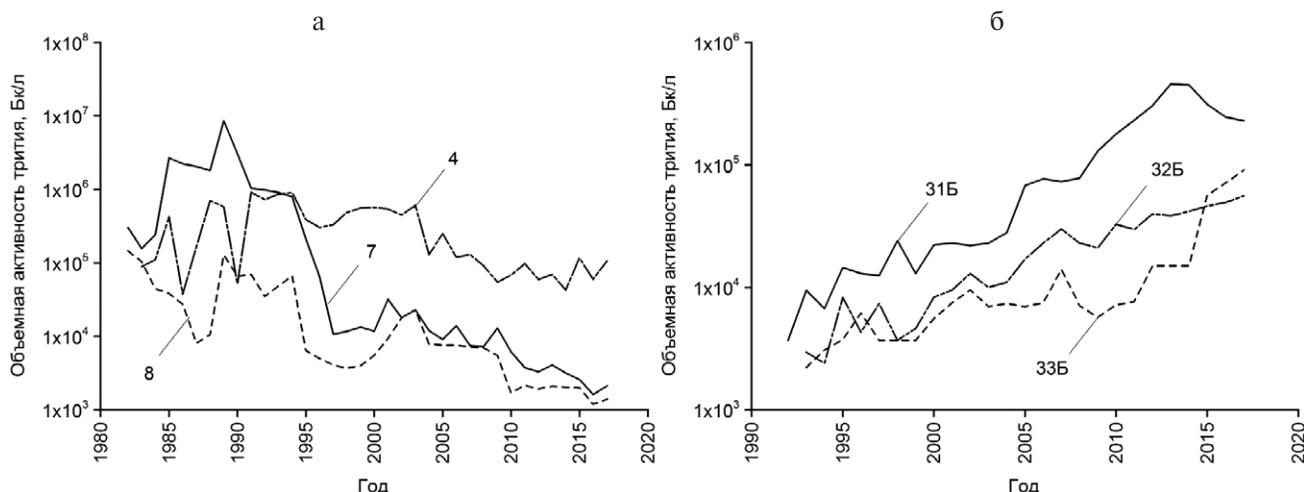


Рис. 4. Характерная динамика изменения среднегодовой активности трития в наблюдательных скважинах в четвертичном (а) и ломоносовском (б) водоносных горизонтах.

отделения стоят высоко и периодически подтапливают фундаменты зданий. Дренажные сооружения самой площадки и соседних предприятий (ЛАЭС-2) также оказывают влияние на направление движения подземных вод. Так, например, граница обширной депрессионной воронки, сформированной под действием строительного водоотлива ЛАЭС-2, радиусом более 500 м, находится в районе южных ворот ПХРО Ленинградского отделения.

Таким образом, оказалось, что направление движения подземных вод, а следовательно, и перемещение ореола загрязнения от зданий ПХРО определяются преимущественно локальными гидрогеологическими факторами и могут отклоняться от регионального направления на 90 и даже 180 градусов.

Наряду с горизонтальным движением подземных вод изучалась и вертикальная составляющая потока. Ее вектор определяется разницей напоров в смежных водоносных горизонтах, при этом переток будет происходить из горизонта с более высокими напорами. Гидродинамические наблюдения показали, что на большей части зоны возможного загрязнения на площадке уровни подземных вод в четвертичном горизонте выше, чем в ломоносовском, что предопределяет нисходящее направление вертикального перетока подземных вод. Максимальный разрыв уровней наблюдается в районе хранилищ №8-10 со стороны площадки КПО и достигает 1 м. Инверсия уровней в водоносных горизонтах происходит южнее хранилища №11 и связана с работой дренажной системы площадки.

ДИНАМИКА ФОРМИРОВАНИЯ ТРИТИЕВОГО ОРЕОЛА

Для анализа динамики изменения активности трития в подземных водах на площадке ПХРО использовались данные службы радиационной безопасности, полученные в период с 1982 по 2017 гг. До начала 1990-х гг. режимная сеть на площадке была развита недостаточно, что не позволяет построить карты распределения ореола загрязнения на ранние этапы эксплуатации. Наиболее продолжительный ряд наблюдений (1982-2017 гг.) доступен только по семи контрольно-наблюдательным скважинам (КНС). Все они вскрывают 1-й от поверхности (четвертичный) водоносный горизонт. Начиная с 1990-х гг. в режимной сети уже находилось около 50 скважин на различные водоносные горизонты, а на сегодняшний день мониторинг ведется более чем в 80 скважинах.

По данным службы радиационной безопасности ПХРО Ленинградского отделения на 2017 г., в подавляющем большинстве КНС регистрируемая активность трития не превышает уровня вмешательства по НРБ-99/2009 (7600 Бк/л). Однако в 20% скважин, которые расположены в непосредственной близости от зданий ПХРО, фиксируется превышение уровня вмешательства для питьевых вод.

Положение интервалов установки фильтров наблюдательных скважин в геологическом разрезе приведено на рис. 3, из которого видно, что существующая на 2017 г. режимная сеть достаточно равномерно покрывает исследуемую территорию и охватывает разные водоносные горизонты. Интересно, что поинтервальный анализ распределения трития указывает на то, что наибольшие его активности сегодня сосредоточены не в верхнем

четвертичном водоносном горизонте, а в нижнем ломоносовском. Наиболее вероятно, что тритий попадает в ломоносовский горизонт из верхнего слоя через гидрогеологические окна (см. рис. 3) с нисходящим потоком подземных вод, обусловленным превышением уровня воды в четвертичном горизонте по сравнению с ломоносовским.

Анализ наиболее продолжительных рядов наблюдений (рис. 4а) в четвертичном водоносном горизонте указывает на то, что в районе площадки Ленинградского отделения сформировалась устойчивая тенденция к падению активности трития. Так, например, за период наблюдения активность трития в КНС 7 упала на 4 порядка.

Рассмотрим основные закономерности эволюции площадного ореола трития за период с 1991 по 2017 г. (рис. 5). Для идентификации источников загрязнения наиболее интересны ранние этапы формирования тритиевых ореолов. Так, в 1991 г. в четвертичном горизонте наблюдалось как минимум три очага утечек радионуклидов, расположенных у хранилищ №10, 9 и 8 (самый интенсивный), №4 и у №1, 2 и 3 (наименее интенсивный). Номера зданий-хранилищ показаны на рис. 3 выше по тексту. Кардинальным образом конфигурация ореола начала меняться после реконструкции хранилищ ПХРО и ввода в эксплуатацию подземного дренажа по их контуру. В период с 1994 по 1997 г. тритиевый ореол стремительно сокращался как по площади, так и по контрастности (регистрируемым значениям активности трития). Со временем конфигурация ореола стала полностью контролироваться дренажной сетью. Можно констатировать, что на сегодняшний момент тритиевый ореол в четвертичном горизонте имеет наименьшую площадь за всю историю наблюдений. Такая картина свидетельствует о наступившей фазе реабилитации территории после проведенных мероприятий по реконструкции хранилищ ПХРО, а также прямо подтверждает отсутствие поступления новых порций трития из хранилищ ПХРО в подземные воды.

Обратная картина наблюдается в ломоносовском водоносном горизонте. На рис. 4 можно видеть, что за последние 30 лет произошло значительное перераспределение активности между двумя горизонтами. Из-за нисходящего потока подземных вод основная активность тритиевого ореола опустилась из четвертичного горизонта в ломоносовский. Именно этим объясняется постоянный рост активности трития в нижнем горизонте. Данный эффект необходимо расценивать как благоприятный, поскольку нижний водоносный горизонт более изолирован.

Интересно также отметить, что неуклонный рост активности трития в ломоносовском горизонте от-

мечается преимущественно в юго-западной части площадки. Увеличение активности здесь объясняется постепенным продвижением вниз по потоку в юго-западном направлении «исторического» ореола, захватывающего в свой контур все новые чистые скважины. Наиболее ярко этот эффект проявляется в скважинах КНС 31Б – КНС 33Б (рис. 4б). Последовательный рост активности трития в скважинах, расположенных вниз по потоку подземных вод, показывает, что скорость миграции тритиевого ореола в ломоносовском горизонте составляет примерно 5–8 м/год.

ФАКТОРЫ И ДИНАМИКА ФОРМИРОВАНИЯ ОРЕОЛА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПО ВЕЛИЧИНЕ СУММАРНОЙ АЛЬФА- И БЕТА-АКТИВНОСТИ

В Ленинградском отделении наряду с мониторингом трития в подземных водах также проводятся измерения суммарной удельной альфа- и бета-активности. Определение этих показателей необходимо рассматривать как экспресс-метод, который позволяет в оперативном режиме качественно (не количественно) отследить возможные аварийные утечки в подземные воды техногенных альфа- и бета-излучающих радионуклидов. Основной вклад в величину бета-активности на площадке Ленинградского отделения «ФГУП «РосРАО» вносят природный изотоп ^{40}K , а также техногенные ^{90}Sr и ^{137}Cs . На значения альфа-активности, помимо природных изотопов, может повлиять наличие изотопов плутония в подземных водах.

Измерение удельной суммарной альфа-активности показывает отсутствие в подземных водах Ленинградского отделения «ФГУП «РосРАО» значимых количеств альфа-излучающих техногенных радионуклидов. Повышенные ее значения регистрируются только в воде каньонов хранилищ ПХРО.

Анализ многолетних режимных наблюдений за показателями суммарной бета-активности в подземных водах площадки (рис. 6, 7) свидетельствует о том же времени, характере и источнике утечек, что и в случае с тритием.

Так, в четвертичном горизонте максимальные значения бета-активности регистрируются в конце 1980-х гг. в районе хранилищ №8 и 4, а начиная с середины 1990-х гг. по всем скважинам площадки фиксируется постепенное уменьшение его активности в подземных водах. В нижний (ломоносовский) водоносный горизонт загрязнение начинает проникать одновременно с его появлением в четвертичном горизонте, однако его рост отстает от показателей в верхнем горизонте.

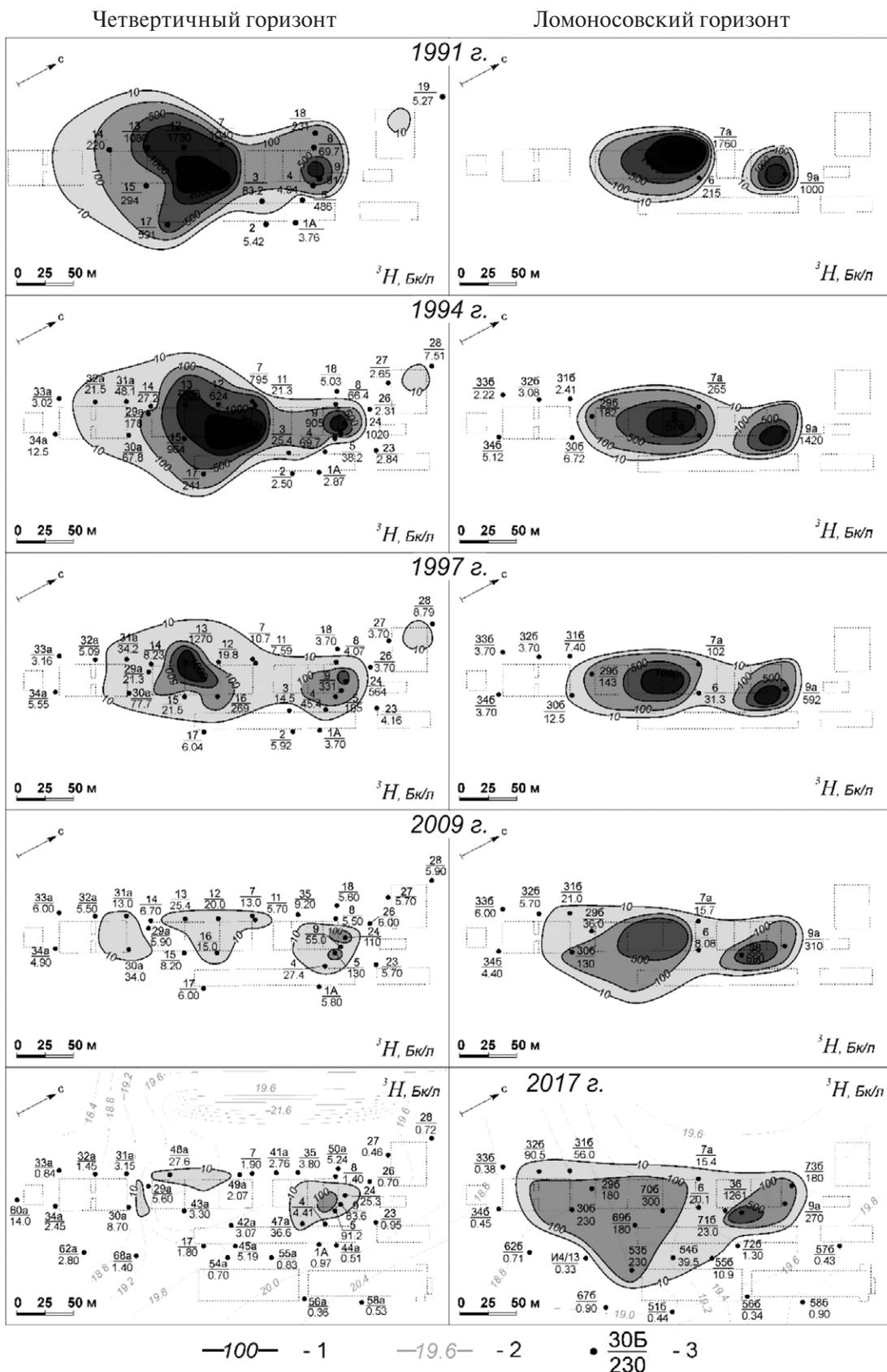


Рис. 5. Эволюция ореолов тритиевого загрязнения подземных вод в четвертичном и ломоносовском водоносных горизонтах: 1 – линии равных концентраций трития (кБк/л); 2 – гидро- и пьезоизогипсы; 3 – наблюдательная скважина: в числителе – номер скважины, в знаменателе – величина объемной активности трития (кБк/л).

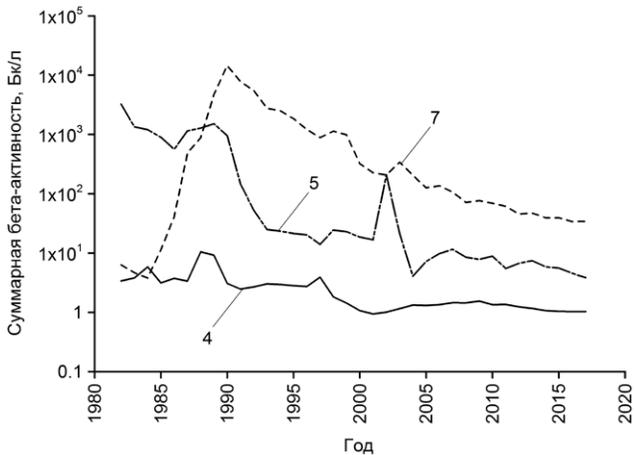


Рис. 6. Динамика изменения среднегодовой удельной суммарной бета-активности в наблюдательных скважинах (четвертичный водоносный горизонт).

Спустя 30 лет абсолютные значения суммарной бета-активности в обоих водоносных горизонтах упали на несколько порядков за счет процессов разбавления подземными водами и атмосферными осадками, а также радиоактивного распада (см. рис. 7).

Несмотря на то, что в поведении ореолов трития и бета-активности на ПХРО Ленинградского отделения «ФГУП «РосРАО» обнаруживается много общего, можно выделить и некоторые коренные отличия. Главным образом они касаются масштаба загрязнения. Как было показано ранее, инертный тритий формирует обширные ореолы загрязнения в водоносных пластах. Напротив, участки с повышенной бета-активностью локализуются вблизи источников и занимают гораздо меньшие площади (см. рис. 7).

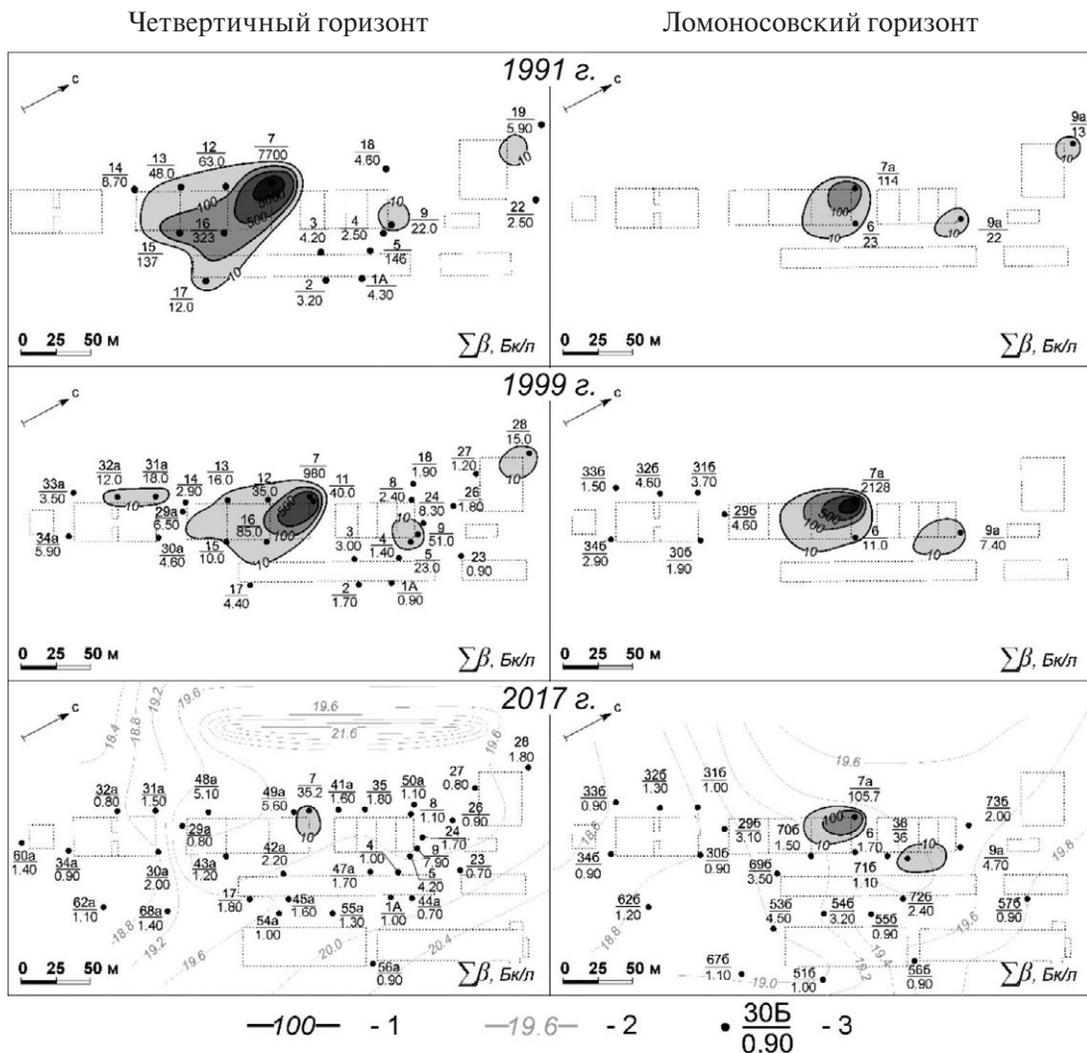


Рис. 7. Эволюция ореолов загрязнения подземных вод по бета-активности в четвертичном и ломоносовском водоносных горизонтах: 1 – линии равных значений суммарной удельной бета-активности (Бк/л); 2 – гидро- и пьезоизогипсы; 3 – наблюдательная скважина: в числителе – номер скважины, в знаменателе – величина суммарной удельной бета-активности (Бк/л).

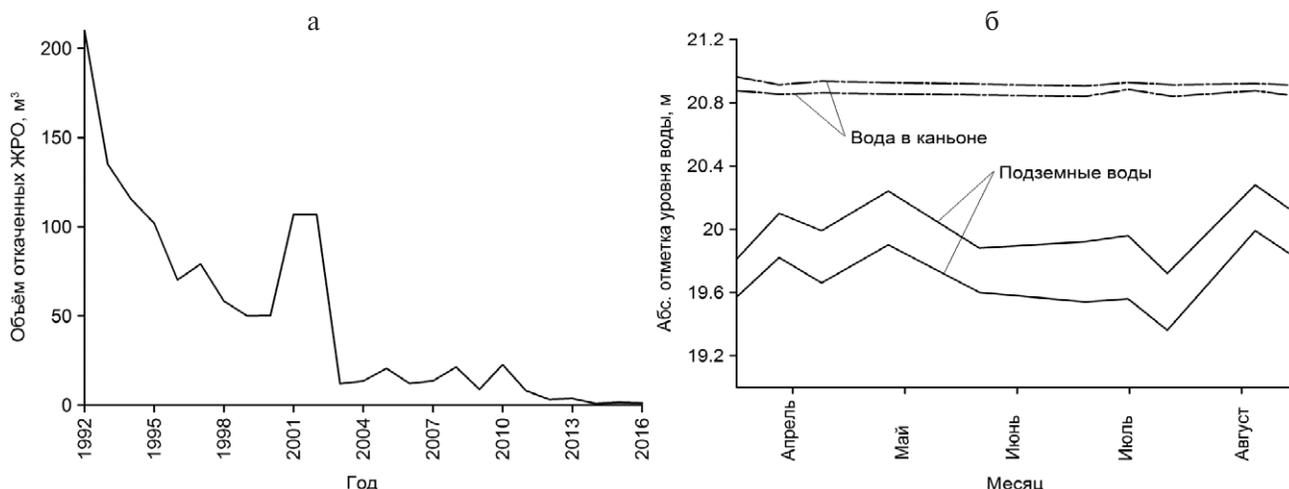


Рис. 8. Графики, иллюстрирующие обводненность каньонов хранилищ ПХРО и их связь с подземными водами: *а* – объемы жидких радиоактивных отходов (ЖРО), откачиваемых через скважины из каньонов хранилищ №4-7, №8-10 за период 1992–2016 гг.; *б* – колебания уровней подземных вод и воды в каньонах хранилища №10 в 2017 г.

Низкие скорости миграции бета-излучающих радионуклидов объясняются их способностью сорбироваться на песчано-глинистых частицах вмещающих пород. В работе [6] изложены результаты изучения сорбционных свойств основных литологических разностей на площадке Ленинградского отделения. Они показывают, что слагающие площадку породы выполняют функции природного барьера, уменьшая скорость миграции бета-излучающих радионуклидов более чем на порядок по сравнению с инертным тритием. Так, основываясь на времени смещения пиковых значений бета-активности в близкорасположенных друг к другу скважинах (КНС 7 и 7А), скорости миграции по потоку подземных вод ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs в районе площадки не превышают 10 см/год.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕНЕЗИСА ВОДЫ ИЗ ХРАНИЛИЩ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Данные радиационного мониторинга подземных вод показывают, что источником загрязнения подземных вод являлись утечки из зданий хранилищ. Это подтверждают данные радиохимических анализов проб воды из каньонов – активность радиоактивных изотопов в растворах выщелачивания каньонов хранилищ всегда на несколько порядков превышает их активность в пробах подземных вод. Необходимо отметить, что наличие воды в каньонах фиксируется и в настоящее время. Ответственный за эксплуатацию ПХРО персонал Ленинградского отделения «ФГУП «РосРАО» ежегодно проводит мероприятия по откачке воды из каньонов через наклонные скважины с помощью специальной

вакуумной установки. Однако каждый год вода в каньонах, представляющая по своим радиационным показателям жидкие радиоактивные отходы, появляется вновь (рис. 8а).

Чтобы установить генезис воды в каньонах (подземная, атмосферная, конденсат), а также степень герметичности хранилищ ПХРО, был проведен комплекс мероприятий, который включал:

- годовой цикл режимных наблюдений за уровнями воды в каньонах зданий ПХРО и подземных вод в скважинах, расположенных в непосредственной близости от зданий ПХРО, часть из которых были пробурены специально;
- наблюдения за температурой и влажностью воздуха внутри хранилищ ПХРО;
- видеообследование каньонов через наклонные скважины;
- трассерные запуски в каньоны.

Многолетние ряды режимных наблюдений за положением уровней подземных вод были соотнесены с глубиной заложения фундаментов хранилищ ПХРО. Было установлено, что в некоторые годы в паводковый период уровни подземных вод могут подниматься выше отметок заложения фундаментов и кратковременно подтапливать хранилища. В то же время данные мониторинга за 2017 г. показывают, что характер изменения уровней подземных вод и уровней воды в каньонах существенно различается (рис. 8б): амплитуды колебаний уровней воды в каньонах гораздо меньше; более того, вода в каньонах на протяжении всего года держится на более высоких отметках. Наблюдаемый разрыв уровней прямо свиде-

тельствует о хорошей герметичности каньонов хранилищ ПХРО.

Для оценки возможной гидравлической связи между каньонами хранилищ ПХРО и водоносными горизонтами, а также картирования мест утечек были проведены трассерные эксперименты (окрашивание воды в каньонах). В качестве индикаторов были выбраны флуоресцеин (зеленый цвет) и родамин (красный цвет), которые обладают хорошей растворимостью в воде и сравнительно с другими органическими красителями слабо сорбируются породой. Кроме того, данные индикаторы легко визуально регистрируются в малых концентрациях в ультрафиолетовом свете. После закачки красителей в каньоны хранилищ ПХРО на протяжении нескольких дней проводились откачки из скважин, расположенных в непосредственной близости от каньонов. Краситель в откачиваемой воде не был зарегистрирован. Более того, дальнейшие режимные наблюдения в течение года не выявили факта окрашивания подземных вод ни в одной из наблюдательных скважин на территории площадки. Такой результат может рассматриваться как еще один довод в пользу герметичности хранилищ.

Видеообследование каньонов через наклонные скважины показало наличие большого количества поверхностного конденсата даже внутри сухих хранилищ ПХРО. Согласно измерениям гигрографа, 100% влажность воздуха внутри зданий держится на протяжении всего года. По нашим оценкам, ежегодные объемы образования конденсата внутри хранилищ ПХРО могут достигать 100 л.

Чтобы установить генезис воды в каньонах вновь обратимся к графику объемов откачек воды из хранилищ ПХРО (см. рис. 8а). Он показывает неуклонное снижение количества откачиваемой воды от года к году с 200 м³ в 1992 г. до 1 м³ в 2016 г. В последнее время этот объем стабилизировался около величины 1 м³. Такой вид графика может объясняться постепенным отжатием воды из влажных отходов: сначала вода выходила из отходов свободно, но с течением времени ее запасы истощаются.

Кондуктометрические исследования воды каньонов показали, что вода в них обладает минерализацией почти в 2 раза большей, нежели подземные воды четвертичного или ломоносовского горизонта, не говоря уже об ультрапресном конденсате. Все эти данные свидетельствуют в пользу того, что, скорее всего, вода, извлекаемая из каньонов, — «старая», т.е. находилась в контакте с РАО довольно продолжительное время и не вовлечена в водообмен с окружающей средой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многолетний опыт работы на участках загрязнения подземных вод говорит о том, что, как правило, точная информация о загрязнении — его объемах, составе, продолжительности и месте поступления в водоносный горизонт — отсутствует. Это вызвано рядом объективных причин: слишком поздним обнаружением утечки, отсутствием системы мониторинга или просто сокрытием информации.

Уникальность площадки Ленинградского отделения ФГУП «РосРАО» заключается в том, что на протяжении более 40 лет на ее территории с необходимой детальностью и точностью осуществляются режимные наблюдения за ореолами радиоактивного загрязнения подземных вод, сформированными на начальном этапе эксплуатации ПХРО. В связи с этим исследуемая площадка является своего рода научным полигоном для изучения закономерностей и механизмов миграции радионуклидов в подземной гидросфере.

При вводе в эксплуатацию хранилищ №1–10 (1963–1985 гг.) в условиях неполной герметичности хранилищ атмосферные осадки вступали в контакт со складываемыми радиоактивными отходами. Это привело к тому, что уже через несколько лет в подземных водах были зафиксированы повышенные активности техногенных изотопов. Результаты настоящей работы показывают, что подземные воды площадки сегодня проходят стадию реабилитации от «исторического» загрязнения. Современных поступлений радионуклидов в подземные воды не обнаруживается, что является результатом продуманных действий и инженерных решений, которые были применены для устранения причин протечек в начале 1990-х гг.

Несмотря на то, что на протяжении уже более, чем 20 лет из зданий-хранилищ не наблюдается новых поступлений техногенных радионуклидов в водоносный горизонт, ореол загрязнения сегодня все еще фиксируется, но постепенно изменяя свою конфигурацию и контрастность. Анализ материалов многолетних наблюдений за контурами ореола позволил выявить следующие закономерности его эволюции.

Во-первых, тритий, как практически несорбируемый компонент, образует наиболее обширные ореолы загрязнения на исследуемой площадке. Миграция изотопов ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs осложняется физико-химическим (сорбционным) взаимодействием между растворенным веществом и вмещающей породой, что приводит к замедлению миграции этих изотопов в десятки и сотни раз по сравнению с тритием. Высокие сорбционные свойства глинистых грунтов, характерных для площадки

исследований, способствуют тому, что сформированные ореолы загрязнения по суммарной бета-активности на территории площадки имеют локальное распространение и сосредоточены в непосредственной близости от источника.

Во-вторых, как позволили установить построенные детальные карты гидроизогипс, направление движения подземных вод, а, следовательно, и ореола загрязнения от хранилищ ПХРО на площадке, определяется преимущественно локальными гидрогеологическими и техногенными факторами и может отклоняться от регионального направления потока на 90 и даже 180 градусов.

В-третьих, определяющую роль в распределении радиоактивного загрязнения в разрезе играют гидрогеологические условия площадки, формирующие предпосылки к образованию нисходящих фильтрационных потоков. Наличие гидрогеологических окон в геологическом разрезе привело к тому, что через некоторое время после формирования ореола загрязнения в верхнем четвертичном водоносном горизонте, основная активность тритиевого ореола постепенно опустилась в нижний ломоносовский водоносный горизонт, где мигрирует вниз по потоку со скоростями 5-8 м/год.

Отдельно отметим, что поставленная работа позволила оценить степень герметичности каньонов хранилищ ПХРО. Результаты разносторонних исследований, свидетельствуют об отсутствии на данный момент гидравлической связи каньонов с окружающей средой. Тем не менее, наличие радиоактивных растворов внутри каньона необходимо рассматривать как неблагоприятный фактор, создающий риск появления радиоактивных утечек в будущем. В связи с этим, целесообразно строительство дополнительных дренажных сооружений, а также организация систем принудительного вентилирования каньонов хранилищ ПХРО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Румынин В.Г., Панкина Е.Б., Якушев М.Ф., Боронина А.В., Кузнецова Е.Л., Кукушкина Т.А., Хархордин И.Л., Потапов А.А., Токарев И.В., Коносавский П.К., Абрамов В.Ю., Епимахов В.Н., Переверзева С.А., Харьковский К.С. Оценка влияния атомно-промышленного комплекса на подземные воды и смежные природные объекты (г. Сосновый Бор Ленинградской области). СПб.: Изд-во СПбУ, 2002. 249 с.
2. Румынин В.Г. Геомиграционные модели в гидрогеологии. СПб.: Наука, 2011. 1158 с.
3. Румынин В.Г., Каплан Е.М., Шварц А.А., Никуленков А.М., Панкина Е.Б., Глухова М.П., Лулева Е.В. Мониторинг подземных вод в зоне влияния строящейся ЛАЭС-2: методические аспекты и результаты // Экология и атомная энергетика. Сосновый Бор: ОАО «Российский концерн по производству электрической и тепловой энергии на атомных станциях», 2015. №2. С. 124-134.
4. Спешилов С.Л., Баринов А.С., Лобанов Н.Ф., Ткаченко А.В., Ситников С.А., Черкесов А.Э. Предварительные материалы по оценке воздействия на окружающую среду. Пункт захоронения радиоактивных отходов низкого и среднего уровня активности в районе расположения Ленинградского отделения филиала «Северо-Западного территориального округа ФГУП «РосРАО». М.: ФГУП «НО РАО», 2013. 220 с.
5. Rumynin V.G. Subsurface solute transport models and case histories with application to radionuclide migration. Springer, 2011. 860 p.
6. Rumynin V.G., Nikulenkov A.M. Geological and physicochemical controls of the spatial distribution of partition coefficients for radionuclides (Sr-90, Cs-137, Co-60, Pu-239,240 and Am-241) at a site of nuclear reactors and radioactive waste disposal (St. Petersburg region, Russian Federation) // J. of Environmental Radioactivity [Internet]. Elsevier BV; 2016 Oct; 162-163:205–18. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.05.030>.

REFERENCES

1. Rumynin, V.G., Pankina, E.B., Yakushev, M.F., Boronina, A.V., Kuznetsova, E.L., Kukushkina, T.A., Kharkhordin, I.L., Potapov, A.A., Tokarev, I.V., Konosavsky, P.K., Abramov, V.Yu., Epimakhov, V.N., Pereverzeva, S.A., Kharkovsky, K.S. *Otsenka vliyaniya atomno-promyshlennogo kompleksa na podzemnye vody i smezhnye prirodnye ob'ekty (g. Sosnovyi Bor Leningradskoi oblasti)* [Assessment of the influence of the atomic-industrial complex on groundwater and adjacent natural bodies (Sosnovy Bor, Leningrad oblast)]. St.Petersburg, St.Petersburg St. Univ. Publ., 2002, 249 p. (in Russian)
2. Rumynin, V.G. *Geomigratsionnye modeli v gidrogeologii* [Geomigration models in hydrogeology]. St.Petersburg, Nauka Publ., 2011. 1158 p. (in Russian)
3. Rumynin, V.G., Kaplan, E.M., Schwartz, A.A., Nikulenkov, A.M., Pankina, E.B., Glukhova, M.P., Luлева, E.V. *Monitoring podzemnykh vod v zone vliyaniya stroyashcheysya LAES-2: metodicheskie aspekty i rezul'taty* [Groundwater monitoring in the zone of influence of LNPP-2 under construction: methodological aspects and results]. Ecology and Atomic Energy, 2015, no. 2, pp. 124–134. (in Russian)
4. Speshilov, S.L., Barinov, A.S., Lobanov, N.F., Tkachenko, A.V., Sitnikov, S.A., Cherkesov, A.E. *Predvaritel'nye*

materialy po otsenke vozdeistviya na okruzhayushchuyu sredu. Punkt zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov nizkogo i srednego urovnya aktivnosti v raione raspolozheniya Leningradskogo otdeleniya filiala «Severo-Zapadnogo territorial'nogo okruga FGUP «RosRAO» [Preliminary materials on environmental impact assessment. Burial site for low and medium level radioactive waste in the area of the Leningrad division of the Northwest region of FSUE “RosRAO”]. Moscow, FSUE “NO RAO”, 2013. 220 p. (in Russian)

5. Rumynin, V.G. Subsurface solute transport models and case histories with application to radionuclide migration. Springer, 2011. 860 p.
6. Rumynin, V.G., Nikulenkov, A.M. Geological and physicochemical controls of the spatial distribution of partition coefficients for radionuclides (Sr-90, Cs-137, Co-60, Pu-239,240 and Am-241) at a site of nuclear reactors and radioactive waste disposal (St. Petersburg region, Russian Federation). *Journal of Environmental Radioactivity* [Internet]. Elsevier BV; 2016 Oct; 162–163:205–18. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.05.030>.

FORTY-YEAR EVOLUTION OF RADIOACTIVE GROUNDWATER CONTAMINATION AT THE SITE OF RADIOACTIVE WASTE STORAGE (ST. PETERSBURG REGION, RUSSIAN FEDERATION)

V. G. Rumynin^{1,2*}, D. N. Zamaskin^{3**}, K. V. Vladimirov^{1*}, A. V. Plotnikov^{3**},
I. A. Lelyavin^{3**}, A. M. Nikulenkov^{1,2*}, E. M. Kaplan^{1,2*}, V. A. Khodina^{1*}

¹St. Petersburg Division, Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences; Srednii pr. 41, St. Petersburg, 199004 Russia.

²Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University, Universitetskaya nab. 7-9, St. Petersburg, 199004 Russia.

³RosRAO Federal State Unitary Enterprise, Northwest region, Leningrad division, Sosnovy Bor, Industrial zone, P.O. Box 5, Leningrad oblast, 188540 Russia.

*E-mail: office@hgepro.ru

**E-mail: len.szto@rosrao.ru

Evolution of tritium and beta contamination plumes resulted from radioactive waste leakage in the 1990s has been studied based on 40-year-long monitoring data at the site of radioactive waste (RW) storage. Local- and regional-scale hydrodynamics are found to be the main features controlling the spreading of tritium contamination in the aquifer system, while spatial distribution of beta-activity plume is strongly restricted by sorption of ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs isotopes onto rock matrix. The study performed proves that groundwater system at the site is actually in the stage of rehabilitation from the «historical» contamination. Special complex investigation program aimed on examination of water accumulated in repository buildings and its interconnection with groundwater, demonstrated good isolation of the buildings from the surrounding aquifers and no evidence of RW release to the subsurface environment nowadays.

Keywords: *groundwater monitoring, radioactive contamination, radioactive waste storage, tritium plume, tracer test.*

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-7809201913-16>