ГЕОЭКОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ, 2021, № 4, с. 53–66

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 550.422

ЕСТЕСТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ И ФОНОВОЕ СОДЕРЖАНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ РАЙОНА ЛЕНИНГРАДСКОЙ АЭС

© 2021 г. В. А. Ерзова^{1,*}, С. М. Судариков¹, В. Г. Румынин^{2,3}, А. А. Шварц^{2,3}

¹ Санкт-Петербургский горный университет, 21 Линия, 2, Санкт-Петербург, 199121 Россия ² Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Средний пр., 41, Санкт-Петербург, 199004 Россия

³ Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, Университетская наб., д. 7—9, Санкт-Петербург, 199034 Россия

> **E-mail: erzova.spmu@yandex.ru* Поступила в редакцию 01.03.2021 г. После доработки 09.03.2021 г. Принята к публикации 09.03.2021 г.

Ha основании анализа данных мониторинга по радиационному составу подземных вод в районе расположения Ленинградской АЭС изучена естественная радиоактивность и фоновое содержание техногенных радионуклидов в них. Проанализированы радиационные показатели в четвертичном и ломоносовском водоносных горизонтах и вендском водоносном комплексе. Определяемыми естественными радионуклидами в подземных водах являются суммарная альфа (α)- и бета (β)- активности, радионуклиды: радон (222 Rn), радий (224 Ra, 226 Ra, 228 Ra), полоний (210 Po), свинец (210 Pb), торий (232 Th), калий (40 K), уран (238 U, 234 U). Отмечена повышенная радиоактивность естественных радионуклидов в подземных водах вендского комплекса. Даны характерные значения естественной ра-диоактивности в подземных водах исследуемой территории. Среди техногенных радионуклидов определялись содержания суммарная α - и β -активности, радионуклиды цезия (137 Cs), стронция (90 Sr), трития (3 H). Определены и представлены фоновые значения техногенных радионуклидов в подземных водах рассматриваемого района.

Ключевые слова: Ленинградская АЭС, мониторинг подземных вод, естественная радиоактивность, техногенные радионуклиды, фоновое содержание радионуклидов, загрязнение подземных вод DOI: 10.31857/S0869780921040044

введение

В земной коре содержится относительно небольшое количество природных радиогенных элементов, которые не имеют стабильных изотопов и являются радиоактивными. К ним относятся изотопы урана (²³⁸U, ²³⁴U), тория (²³²Th) и радионуклиды, образованные в процессе их радиоактивного распада, – радий (²²⁴Ra, ²²⁶Ra, ²²⁸Ra), радон (²²²Rn), полоний (²¹⁰Po), свинец (²¹⁰Pb) и др. [16]. Также в земной коре содержатся долгоживущие радионуклиды, имеющие и стабильные изотопы. Среди них калий (⁴⁰К), рубидий (⁸⁷Rb) и радионуклиды космогенного происхождения - углерод (¹⁴С), тритий (³Н) и др. [1, 23]. Суммарная активность элементов природного происхождения составляет около 10²⁶ Бк, что примерно в 10 раз превышает активность техногенных радионуклидов [30].

Опасными для состояния здоровья населения являются техногенные радионуклиды, которые в отличие от природных, как правило, диспергированных в верхней части земной коры и не представляющих опасности, образуют радиотоксичные скопления. К источникам техногенных радионуклидов относятся испытания и разработка ядерного оружия, развитие атомной энергетики и ядерной медицины [3, 14, 26, 28, 29].

При работе атомных электростанций в штатном режиме в окружающую среду поступают, в основном, короткоживущие изотопы, в результате распада которых образуются более долгоживущие. К короткоживущим относятся изотопы ксенона, криптона и йода. Помимо упомянутых радионуклидов также образуются углерод (¹⁴C) и тритий (³H) [17, 19].

С выбросами и сбросами АЭС в окружающую среду могут поступать радионуклиды, образую-



Рис. 1. Схема расположения объектов атомной энергетики Сосновоборского промышленного района, совмещенная с картой гидроизогипс грунтового водоносного горизонта (синие штриховые линии) на 2009 г. 1 – действующая АЭС (ЛАЭС); 2 – строящаяся АЭС (ЛАЭС-2); 3 – научно-исследовательский институт им. А.П. Александрова (НИТИ); 4 – КПО ЛАЭС; 5 – предприятие по сбору, переработке и хранению радиоактивных отходов (СЗТО ФГУП "РосРАО"); АБ – линия гидрогеологического разреза (рис. 2).

щиеся при делении ядер урана (²³⁵U) — изотопы цезия (¹³⁷Cs), стронция (⁹⁰Sr) и др. [18, 32, 33]. Техногенная радиоактивность подземных вод района расположения Ленинградской АЭС (ЛАЭС) характеризуется присутствием долгоживущих β - и γ -излучающих радионуклидов: цезий (¹³⁷Cs), стронций (⁹⁰Sr), тритий (³H) [7, 15, 20].

Определение и оценка радиационного фона окружающей среды и, в частности, подземных вод, — важные задачи геолого-гидрогеологических работ на всех стадиях проектирования, строительства и эксплуатации объектов атомно-промышленного профиля.

Целью данного исследования является установление уровня радиоактивности и содержания природных и техногенных радионуклидов в подземных водах района расположения Ленинградской АЭС как основы для анализа данных мониторинга и прогноза воздействия радиационноопасных объектов на подземные воды.

МЕТОДЫ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В Ленинградской области в промышленной зоне г. Сосновый Бор сосредоточены объекты атомной промышленности (рис. 1), где уже долгие годы осуществляется радиационный мониторинг подземных вод [12]. Контроль ведется службами радиационного мониторинга каждого предприятия. В подземных водах в основном определяют содержания суммарную α- и β-активности, ³H, ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr.

Для дальнейшей оценки воздействия объектов "атомного" профиля на природную среду, в частности на подземные воды, и определения основных источников воздействия, в рамках настоящего исследования на основании данных мониторинга за период 2010—2015 гг. проведены:

 – анализ содержания в подземных водах естественных (природных) радионуклидов;

 – анализ содержания техногенных радионуклидов в подземных водах;



Рис. 2. Гидрогеологический разрез по линии АБ (см. рис. 1). Уровень воды в: 1 – четвертичном, 2 – ломоносовском, водоносных горизонтах, 3 – вендском водоносном комплексе.

 – определение фоновых значений естественных и техногенных радионуклидов в подземных водах рассматриваемого района.

ГЕОЛОГО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Геологический разрез на участке исследования представлен осадочными породами четвертичного, кембрийского и вендского возрастов, которые несогласно залегают на кристаллическом фундаменте [2, 8–11, 21, 31].

Один из основных природных объектов, содержащий естественные радионуклиды, – подземные воды. На исследуемой территории в осадочной толще выделяются подземные воды четвертичных и дочетвертичных отложений. Среди них можно выделить следующие водоносные горизонты: первыми от поверхности вскрываются – четвертичный (Q_{IV}) и ломоносовский (ε_1) водоносный горизонты, далее под мощной толщей глин (до 80 м) залегают подземные воды вендского водоносного комплекса (котлинский (V₂kt) и редкинский (V₂rd) водоносные горизонты) (см. рис. 2).

Четвертичный (Q_{IV}) водоносный горизонт развит практически повсеместно. Водовмещающие породы представлены надморенными песками различного генезиса. Горизонт подстилается слабопроницаемыми прослоями суглинков мощностью до 8 м, являющимися локальными водоупорами. Мощность четвертичного водоносного горизонта на большей части исследуемой территории не превышает 5 м. Максимальные мощности приурочены к палеодолинам (до 25 м).

Основным источником питания подземных вод четвертичных отложений является инфильтрация. Разгружаются воды в Копорскую губу Финского залива (см. рис. 1).

Региональное направление потока западное и северо-западное с градиентом 0.005—0.015. На исследуемой территории наблюдается инверсия потока, обусловленная локальными, в основном техногенными факторами, такими как дренажные системы действующих и строящихся здесь объектов.

Уровень грунтовых вод на рассматриваемой территории устанавливается на отметках 0.5—1.5 м от поверхности земли. Наблюдается гидравлическая связь подземных вод четвертичных отложений с нижележащим ломоносовским водоносным горизонтом. Грунтовые воды питают нижележащий водоносный горизонт и, как следствие, загрязняют его.

Ломоносовский (нижнекембрийский) водоносный горизонт ($€_1$) сложен песками и слабосцементированными песчаниками. На рассматриваемой территории выделяют три водоносные зоны, разделенные глинистыми водоупорами. На территории ЛАЭС-2 распространены три водоносные зоны, на территории филиала ФГУП "РосРАО" –

две, а за территорией КПО ломоносовский водоносный горизонт выклинивается. Его суммарная мощность постепенно уменьшается к зоне выклинивания на запад с 8–10 м до 0 м.

Основные источники питания подземных вод нижнекембрийских отложений — инфильтрация и перетекания из четвертичного горизонта. Область разгрузки находится в районе склона II приморской террасы, где происходит перетекание в вышележащий горизонт четвертичных отложений, который в свою очередь разгружается в Копорскую губу Финского залива. Региональный поток направлен на запад и северо-запад с градиентом 0.005–0.01. На исследуемой территории ломоносовский водоносный горизонт дренируется глубоким врезом долины р. Воронка и строительным карьером на территории ЛАЭС-2.

Уровень воды в скважинах, оборудованных на ломоносовский водоносный горизонт, устанавливается на отметках 1–2.5 м от земной поверхности.

Помимо уровней, о хорошей гидравлической связи первых двух водоносных горизонтов свидетельствует их химический состав (воды гидрокарбонатные кальциевые).

Непосредственно на исследуемой территории подземные воды четвертичного и ломоносовского горизонтов для водоснабжения не используются. Практическое значение для питьевого водоснабжения они имеют на границе Предглинтовой низменности.

Вендский водоносный комплекс подразделяется на два водоносных горизонта комплинский (V₂kt) и редкинский (V₂rd), гидравлически связанные друг с другом. От вышележащего ломоносовского водоносного горизонта он отделен мощной пачкой водоупорных котлинских глин (до 80 м), залегает на глубине 90–120 м. В верхней части разреза вендский комплекс сложен алевритами и глинами, в нижней – песчаниками [5, 10, 25, 27]. Мощность комплекса достигает 80 м.

Область современного питания горизонта приурочена к Центрально-Карельской возвышенности, где вендские отложения залегают близко к поверхности и перекрыты только четвертичными отложениями. Областью разгрузки этого горизонта принято считать Финский залив.

Комплекс содержит напорные воды и широко используется для централизованного и частного водоснабжения Санкт-Петербурга и Ленинградской области [4, 13]. В результате интенсивной его эксплуатации к 1977 г. напор вендского водоносного комплекса был снижен на 60–70 м, что привело к образованию обширной депрессионной воронки. В этот период в районе г. Сосновый Бор поток сменил свое направление в сторону Санкт-Петербурга. Затем суммарный водоотбор из вендского водоносного комплекса в СанктПетербурге и на Карельском перешейке стабилизировался, и началось постепенное восстановление уровней [6, 24, 31]. Направление движения поземных вод на участке исследований вернулось к естественному.

СОДЕРЖАНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ ИССЛЕДУЕМОГО РАЙОНА

Радиологическое опробование подземных вод четвертичного и ломоносовского водоносных горизонтов на содержание в них естественных радионуклидов проводилось в пределах территории ЛАЭС-2. В рамках радиационного мониторинга в 2010–2015 гг. были опробованы 8 скважин, 7 из которых оборудованы на ломоносовский водоносный горизонт (пробурены в период 2007– 2010 гг.), и 1 скважина – на четвертичный (пробурена в 2012 г.) (рис. 3).

Основные определяемые компоненты — суммарная α - и β -активности, радионуклиды: радон (²²²Rn), радий (²²⁴Ra, ²²⁶Ra, ²²⁸Ra), полоний (²¹⁰Po), свинец (²¹⁰Pb), торий (²³²Th), калий (⁴⁰K), уран (²³⁸U, ²³⁴U). Анализируя полученные данные, стоит отметить, что величины концентраций радионуклидов практически не изменялись из года в год, поэтому были рассчитаны средние значения за период наблюдений (табл. 1).

Удельные активности природных радионуклидов в четвертичном и ломоносовском водоносных горизонтах за весь период наблюдений не превышают нормативных значений по НРБ-99/2009.

Радиологическое опробование подземных вод вендского водоносного комплекса выполнялось с 2011 по 2015 г. в 3 скважинах, введенных в эксплуатацию в этот период (см. рис. 3, табл. 2). Определялось содержание тех же компонентов, что и в верхних горизонтах.

В период 2003–2010 гг. в районе г. Сосновый Бор были отобраны подземные воды на определение содержания в них природных радионуклидов (суммарная α - и β -активность, ²²⁶Ra, ²²²Rn, ⁴⁰K) (рис. 4, табл. 3).

Полученные результаты указывают на повышенную естественную радиоактивность, в том числе, повышенное содержание ²²⁸Ra (среднее значение по скв. 69/11 – 0.67 Бк/л, скв. 4/10 – 0.65 Бк/л), α -активности (до 3.87 Бк/л в скв. 69/11 в 2011 г., скв. 8 – 1.44 Бк/л, скв. 9 – 2.2 Бк/л в 2010 г.), β -активности (до 3.18 Бк/л в скв. 69/11 в 2011 г., скв. 8 – 4.05 Бк/л, скв. 9 – 3.05 Бк/л в 2010 г.). Указанные показатели превышают УВ по НРБ 99/09. Содержание ²²⁶Ra превышает в 3– 6 раз УВ по НРБ 99/09.

Сравнивая результаты опробования вендского водоносного комплекса в районе г. Сосновый Бор



Рис. 3. Места отбора проб на содержание в подземных водах четвертичного, ломоносовского водоносных горизонтов и вендского водоносного комплекса природных радионуклидов в районе ЛАЭС. Скважины, пробуренные на 1 – четвертичный водоносный горизонт; 2 – ломоносовский водоносный горизонт; 3 – вендский водоносный комплекс.

и промышленном районе, где расположены предприятия атомной энергетики, стоит отметить, что содержания природных радионуклидов превышают УВ и имеют один порядок.

В табл. 4 приведены корреляционные связи между измеренными радиологическими показателями в солоноватых водах вендских отложений.

Из представленных результатов видно, что суммарная α-активность подземных вод вендского водоносного комплекса в большей степени представлена ²²⁶Ra, суммарная β-активность ²²⁸Ra. Концентрации в воде ²²⁶Ra и его дочернего радионуклида ²²²Rn имеют низкую степень связи друг с другом (коэффициент корреляции -0.48). Относительно низкую взаимосвязь содержаний ²²⁶Ra и ²²²Rn можно объяснить принципиально различными механизмами их мобилизации подземными водами из породной матрицы. Оба покидают кристаллическую решетку материнских минералов за счет диффузии, однако для первого определяющими являются химические условия среды, а для второго – дисперсность твердого материала (породы и минералов). Для радия, находящегося в растворе, существенными оказываются механизмы сорбции-десорбции и соосаждения с барием, в то время как радон совершенно нечувствителен к этим процессам.

Низкая связь ²¹⁰Pb и ²¹⁰Po является следствием наличия промежуточного изотопа ²¹⁰Bi и эффектом большей доступности заключительных членов цепочки распада для выщелачивания. Незначимый коэффициент корреляции k = 0.05 для пары ²²²Rn – ²¹⁰Pb указывает на то, что свинец выщелачивается непосредственно из породы, а не является продуктом распада цепочки ²²⁶Ra \rightarrow ²²²Rn \rightarrow \rightarrow ²¹⁸Po \rightarrow ²¹⁴Pb \rightarrow ²¹⁴Bi \rightarrow ²¹⁴Po \rightarrow ²¹⁰Pb... в воде.

Высокая связь концентраций изотопов ²²⁶Ra и ²²⁸Ra, несмотря на их отношение к разным радиоактивным рядам (²³⁸U и ²³²Th соответственно), показывает, что содержание радия в воде контролируется не только наличием в водовмещающих породах минералов материнских радионуклидов, но и химическим составом воды. При этом соотношение их удельных активностей является важным показателем соотношения ²³⁸U и ²³²Th в породе.

Полученные результаты показывают, что в верхних (четвертичном и ломоносовском) водоносных горизонтах содержание природных радионуклидов в разы ниже УВ_в. Отметим также, что

1	· 1 · · · · · · · · · · · · · · · · · ·				
Радионуклид	Число определений	Среднее*, Бк/л	Мин.*, Бк/л	Макс.*, Бк/л	УВ _В ** по НРБ-99/2009, Бк/л [22]
Σα	27	0.11	0.032	0.28	0.2
Σβ	27	0.21	0.03	0.67	1
²²⁴ Ra	4	0.007	0.002	0.018	2.1
²²⁶ Ra	9	0.06	0.017	0.097	0.49
²²⁸ Ra	17	0.03	0.009	0.071	0.2
²¹⁰ Pb	17	0.01	0.002	0.06	0.2
²¹⁰ Po	9	0.004	0.002	0.01	0.11
²²² Rn	14	10.1	3	28	60
²³² Th	8	0.003	0.002	0.006	0.6
⁴⁰ K	9	0.18	0.04	0.59	
²³⁸ U	4	0.007	0.005	0.012	3
²³⁴ U	3	0.011	0.007	0.02	2.8

Таблица 1. Статистические данные по содержанию природных радионуклидов в верхних водоносных горизонтах в районе ЛАЭС (период наблюдений 2010–2014 гг.)

* — Среднее, медиана, максимальные и минимальные значения рассчитаны только по результатам определений со значениями выше детектируемой активности.

** УВ_В – Уровень вмешательства в питьевой воде.

Курсивом обозначен верхний предел измеренных значений, превышающих УВ_В.

Таблица 2. Статистические данные по содержанию природных радионуклидов в вендском водоносном комплексе в районе ЛАЭС (период наблюдений 2010–2015 гг.)

Радионуклид	Число определений	Среднее*, Бк/л	Мин.*, Бк/л	Макс.*, Бк/л	% превы- шений УВ _В	УВ _В ** по НРБ-99/2009, Бк/л [22]
Σα	11	0.44	0.07	1.84	63.64	0.2
Σβ	11	0.89	0.33	1.98	27.27	1.0
²²⁴ Ra	6	0.44	0.03	1.25	0	2.1
²²⁶ Ra	9	0.24	0.02	0.53	11.11	0.49
²²⁸ Ra	12	0.34	0.01	1.10	58.33	0.2
²¹⁰ Pb	11	0.01	0.002	0.01	0	0.2
²¹⁰ Po	9	0.01	0.002	0.02	0	0.11
²²² Rn	7	8.00	5.00	14.00	0	60
⁴⁰ K	8	0.7	0.35	1.34		

* — Среднее, максимальные и минимальные значения рассчитаны только по результатам определений со значениями выше детектируемой активности.

** УВ_В – Уровень вмешательства в питьевой воде.

Курсивом обозначен верхний предел измеренных значений, превышающих УВВ.

это содержание ниже, чем в вендском водоносном комплексе. Высокие содержания природных радионуклидов в последнем могут связаны с тем, что подземные воды вендского комплекса в региональном плане характеризуются повышенной радиоактивностью. Она связана в первую очередь с минералами урана и тория, встречающимися как в кристаллических породах фундамента, так и непосредственно в вендских водовмещающих породах.

СОДЕРЖАНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТАХ ИССЛЕДУЕМОГО РАЙОНА

Для того, чтобы корректно проинтерпретировать данные режимных радиационных наблюдений и проследить распространение полей загрязнения подземных вод, необходимо определить фоновые концентрации техногенных радионуклидов.



Рис. 4. Места отбора проб на содержание в подземных водах вендского водоносного комплекса природных радионуклидов в районе г. Сосновый Бор. 1 – скважины; 2 – границы г. Сосновый Бор.

Данные о фоновой радиоактивности (техногенной) подземных вод района Ленинградской АЭС крайне ограничены. До начала строительства объектов в районе г. Сосновый Бор в качестве ориентира принимались значения, полученные по речным водам и по единичным данным опробования подземных вод. Для ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs они не превышали единиц и первых десятков мБк/л [20]. Помимо содержания (активности) индивидуальных радионуклидов, определяемого радиохимическими или спектрометрическими методами, показателем радиоактивного загрязнения территории является определяемая радиометрически суммарная объемная β-активность подземных вод. Ее фоновые значения для территории Европейской части РФ составляют 1–4 Бк/л (без учета

Радионуклид	Число определений	Среднее*, Бк/л	Мин.*, Бк/л	Макс.*, Бк/л	% превы- шений УВ _В	УВ _В ** по НРБ-99/2009, Бк/л [22]
Σα	7	1.12	0.10	3.90	85.70	0.2
Σβ	7	2.58	0.95	4.80	71.40	1
²²⁶ Ra	4	2.53	1.40	3.10	100.00	0.49
²²² Rn	1	9.30	9.30	9.30	0	60
⁴⁰ K	1	1.40	1.40	1.40		

Таблица 3. Статистические данные по содержанию природных радионуклидов в вендском водоносном комплексе в районе г. Сосновый Бор (период наблюдений 2003–2010 гг.)

* — Среднее, максимальные и минимальные значения рассчитаны только по результатам определений со значениями выше детектируемой активности.

** – Уровень вмешательства в питьевой воде.

Курсивом обозначен верхний предел измеренных значений, превышающих УВВ.

Таблица 4. Корреляционные связи между радиологическими характеристиками подземных вод вендских отложений

	Σα	Σβ	²²² Rn	²²⁶ Ra	²²⁸ Ra	²¹⁰ Pb	²¹⁰ Po
Σα	1.00						
Σβ	0.76	1.00					
²²² Rn	0.42	0.20	1.00				
²²⁶ Ra	0.94	0.76	0.48	1.00			
²²⁸ Ra	0.70	0.80	0.26	0.77	1.00		
²¹⁰ Pb	-0.21	-0.21	0.05	-0.18	-0.28	1.00	
²¹⁰ Po	0.06	-0.19	0.36	0.00	-0.12	0.14	1.00

активности трития), из которых 50-80% обусловлены активностью 40 К.

Для определения содержания техногенных радионуклидов в подземных водах изучаемого района в качестве объекта исследования выбрана площадка ЛАЭС-2 по причинам: 1) ЛАЭС-2 располагается выше по потоку относительно других объектов "атомного" профиля (см. рис. 1); 2) на момент исследования на площадке ЛАЭС-2 не было действующих объектов, следовательно, ее можно считать неподверженной загрязнению по сравнению с площадками других объектов.

В период с 2010 по 2015 гг. на площадке ЛАЭС-2 и прилегающих территориях проводились исследования, которые позволили получить данные о величинах активности ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ³H, α - и β -активности (рис. 5). Нормативы качества (уровни вмешательства) подземных вод по радиационным показателям, согласно HPБ-99/2009 составляют для (Бк/л): ³H –7600; ⁹⁰Sr – 4.9; ¹³⁷Cs – 11; α – 0.2; β – 1.

Радиологическое опробование подземных вод выполнялось в 18 скважинах, оборудованных на четвертичный, ломоносовский и вендский водоносный комплекс (табл. 5).

Из представленных данных видно, что в целом в подземных водах содержание техногенных радионуклидов не превышает допустимых значений.

Распределение всего массива определений радионуклидов по интервалам значений, соответствующим различной степени превышения природного фона (загрязнения) подземных вод (рис. 6) показывает, что по техногенным радионуклидам, формирующим основные поля загрязнения (¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ³H), более 60% замеров находятся в пределах сотых и первых десятых долей, т.е. соот-



Рис. 5. Места отбора проб на содержание в подземных водах четвертичного, ломоносовского водоносных горизонтов и вендского водоносного комплекса техногенных радионуклидов в районе ЛАЭС. Скважины, пробуренные на: 1 – четвертичный водоносный горизонт; 2 – ломоносовский водоносный горизонт; 3 – вендский водоносный комплекс.

Радионуклид	Число определений	Среднее*, Бк/л	Мин.*, Бк/л	Макс.*, Бк/л	УВ _в ** по НРБ-99/2009, Бк/л [22]			
Четвертичный водоносный горизонт								
Σα	8	0.11	0.03	0.19	0.2			
Σβ	8	0.21	0.1	0.45	1.0			
¹³⁷ Cs	8	0.01	0.002	0.037	11			
⁹⁰ Sr	7	0.02	0.0036	0.11	4.9			
³ H	21	8.7	1.02	56	7600			
Ломоносовский водоносный горизонт								
Σα	28	0.11	0.02	0.28	0.2			
Σβ	28	0.22	0.03	0.67	1.0			
¹³⁷ Cs	26	0.010	0.002	0.03	11			
⁹⁰ Sr	29	0.009	0.001	0.027	4.9			
³ H	39	6.2	0.18	99.7	7600			
Вендский водоносный комплекс								
Σα	0.44	0.24	0.07	1.84	0.2			
$\Sigma \beta$	0.89	0.83	0.33	1.98	1.0			
¹³⁷ Cs	10	0.016	0.005	0.05	11			
⁹⁰ Sr	11	0.030	0.004	0.16	4.9			
³ H	13	71.5	0.07	870	7600			

Таблица 5. Статистические данные по содержанию техногенных радионуклидов в подземных водах района ЛАЭС (период наблюдений 2010–2015 гг.)

* — Среднее, максимальные и минимальные значения рассчитаны только по результатам определений со значениями выше детектируемой активности.

** УВ_В – Уровень вмешательства в питьевой воде.

Курсивом обозначен верхний предел измеренных значений, превышающих УВВ.

ветствуют фоновым концентрациям, а около 20% превышают их.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрен один из природных объектов, содержащий как естественные, так и техногенные радионуклиды, — подземные воды. В пределах исследуемой территории были определены содержания радионуклидов в подземных водах четвертичного, ломоносовского водоносных горизонтов и вендского водоносного комплекса.

Согласно полученным результатам, основными естественными радионуклидами, содержащимися в подземных водах изучаемой территории, являются радон (222 Rn), радий (224 Ra, 226 Ra, 228 Ra), полоний (210 Po), свинец (210 Pb), торий (232 Th), калий (40 K), уран (238 U, 234 U).

В вендском водоносном комплексе как в пределах г. Сосновый Бор, так и в районе Ленинградской АЭС содержание естественных радионуклидов превышает УВ и в 2–10 раз выше, чем в верхних горизонтах. В подземных водах четвертичного и ломоносовского горизонтов УВ по содержанию естественных радионуклидов не превышены.

Стоит отметить, что подземные воды первых от поверхности водоносных горизонтов в районе исследований не используются для водоснабжения. Наличие в кровле вендского водоносного комплекса регионально выдержанной мощной глинистой толщи характеризует его как изолированный в разрезе и свидетельствует о его защищенности от загрязнения. Подземные воды вендского комплекса могут быть использованы для водоснабжения только после водоподготовки.

Исходя из представленных результатов, можно заключить, что для подземных вод рассматриваемого района характерна естественная радиоактивность:

— в четвертичном и ломоносовском водоносных горизонтах по радию (224 Ra < 0.01 Бк/л, 226 Ra < < 0.1 Бк/л, 228 Ra < 0.3 Бк/л), свинцу (210 Pb < < 0.01 Бк/л), полонию (210 Po < 0.04 Бк/л), радону



ЕРЗОВА и др.

Рис. 6. Гистограммы распределения содержания ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ³H в подземных водах по результатам опробования 2010–2015 гг. на территории площадки ЛАЭС-2 и смежных территориях: (а) – четвертичный и ломоносовский водоносные горизонты; (б) – гдовский водоносный горизонт.

 $(^{222}\text{Rn} < 10 \ \text{Бк/л}),$ торию $(^{232}\text{Th} < 0.03 \ \text{Бк/л}),$ калию $(^{40}\text{K} < 0.2 \ \text{Бк/л}),$ урану $(^{238}\text{U} < 0.07 \ \text{Бк/л}, \ ^{234}\text{U} < < 0.01 \ \text{Бк/л});$

– в вендском водоносном комплексе по радию (224 Ra < 1.3 Бк/л, 226 Ra – 0.02–3.1 Бк/л, 228 Ra – 0.01–1.1 Бк/л), свинцу (210 Pb < 0.01 Бк/л), полонию (210 Po < 0.02 Бк/л), радону (222 Rn – 5–14 Бк/л), калию (40 K – 0.35–1.4 Бк/л).

Техногенная радиоактивность подземных вод представлена радионуклидами ³H, ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs. В целом их значения на рассматриваемой территории не превышают УВ. Таким образом, в районе расположения Ленинградской АЭС для техногенных радионуклидов характерны следующие фоновые значения: ³H – 1.0–4.0 Бк/л; ⁹⁰Sr – 0.004–0.030 Бк/л; ¹³⁷Cs – 0.003–0.040 Бк/л. Фон по β-активности, на основании вышеизложенного, при-

нимается равным 0.03–1.0 Бк/л, α-активности – 0.02–0.2 Бк/л.

Согласно полученным результатам, средние значения ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr на территории ЛАЭС-2 в целом лежат в пределах фоновых значений. Средняя объемная активность ³H не превышает 3.5 Бк/л в 60% исследуемых скважин, и в 16% скважин — 10 Бк/л. При этом высокие значения обусловлены единичными замерами, которые в дальнейшем вернулись на уровень фоновых значений. Таким образом, территорию площадки ЛАЭС-2 следует рассматривать в качестве "фоновой".

Полученные результаты будут положены в основу дальнейших исследований с целью оценки воздействия объектов "атомного" профиля на загрязнение подземных вод и определения основных источников воздействия в районе Ленинградской АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абрамов А.А., Бадун Г.А. Основы радиохимии и радиоэкологии: уч. пособие. Баку: Филиал Химического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, 2011. 138 с.
- Андерсон Е.Б., Савоненков В.Г., Шабалев С.И. Перспективы создания подземных могильников РАО в нижнекембрийских глинах Ленинградской области // Тр. Радиевого института им. В.Г. Хлопина. 2006. Т. XI. С. 105–132.
- 3. Артамонова С.Ю. Техногенные радионуклиды в природных водах районов мирных подземных ядерных взрывов "Кратон-3" и "Кратон-4" // Гео-экология. 2013. № 5. С. 417–428.
- 4. Виноград Н.А., Токарев И.В., Строганова Т.А. Особенности формирования подземных вод основных эксплуатируемых водоносных горизонтов Санкт-Петербурга и окрестностей по данным о химическом и изотопном составе // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2019. Т. 64. № 4. С. 575–597.
- 5. Воронов А.Н., Виноград Н.А. Гдовский водоносный комплекс источник пресных, минеральных и промышленных вод // Вестник СПбГУ. Сер. 7. Геология. География. 2006. № 4. С. 88–95.
- Воронюк Г.Ю., Бородулина Г.С, Крайнюкова И.А., Токарев И.В. Водообмен в краевых частях балтийского щита и прилегающих артезианских бассейнах по изотопным и химическим данным (научные и прикладные аспекты). Карельский перешеек // Тр. Карельского научного центра Российской академии наук, 2016. № 9. С. 46–56.
- 7. Григорьев А.Г., Владимиров М.В. Основные закономерности распределения главных природных и техногенных радионуклидов в донных осадках акватории восточной части Финского залива // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. 2010. № 4–2. С. 57–61.
- Дашко Р.Э., Коробко А.А. Инженерно-геологическое обоснование безопасности строительства и эксплуатации сооружений различного назначения в пределах Предглинтовой низменности (Западная часть Ленинградской области) // Записки Горного института. 2016. Т. 206. С. 22–25.
- Дашко Р.Э., Коробко А.А. Генетические особенности формирования и изменения физико-химических свойств нижнекембрийских глин в разрезе Санкт-Петербургского региона // Сергеевские чтения. Матер. годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Вып. 16. М.: РУДН, 2014. С. 23–29.
- 10. Дашко Р.Э., Котюков П.В. Инженерно-геологический и гидрогеологический анализ особенностей эксплуатации перегонных тоннелей петербургского метрополитена в водоупорной толще вендского водоносного комплекса // Сергиевские чтения. Инженерно-геологические и геоэкологические

проблемы городских агломераций. Вып. 17. М.: РУДН, 2015. С. 343–349.

- Дашко Р.Э., Котюков П.В., Шидловская А.В. Влияние гидрогеологических условий на безопасность освоения подземного пространства при строительстве транспортных тоннелей // Записки Горного института. 2012. Вып. 199. С. 9–16.
- 12. Ерзова В.А., Владимиров К.В., Румынин В.Г. Исследование поведения техногенных радиоактивных ореолов на участке исторического загрязнения подземных вод по данным мониторинга // Сб. тр. конференции "Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации". М.: Геомаркетинг, 2019. С. 388-398.
- 13. *Кармазинов* Ф.В. Водоснабжение Санкт-Петербурга. СПб.: Новый журнал. 2003. 670 с.
- Кудельский А.В., Смит Дж.Т, Пашкевич В.И. Постчернобыльская гидросфера Беларуси в районах радиоактивных выпадений (ретроспективный обзор) // Геоэкология. 2012. № 4. С. 293–309.
- Кулькова М.А., Лебедев С.В., Нестеров Е.М., Давыдочкина А.В. Радиоуглерод и тритий в водоносной системе Санкт-петербургского региона // Известия РГПУ им. А.И. Герцена. 2014. № 165. С. 93– 98.
- Куриленко В.В., Хайкович И.М., Лебедев С.В. Геофизические поля в экологической геологии // Вестник СПбГУ. 2016. № 1. С. 15–28.
- 17. Назаров Е.И., Екидин А.А., Васильев А.В. Оценка поступления углерода-14 в атмосферу, обусловленного выбросами АЭС // Известия высших учебных заведений. 2018. Т. 61. № 12/2. С. 67–73.
- 18. *Огородников Б.И.* Техногенные радиоактивные аэрозоли продукты аварии Чернобыльской АЭС // Безопасность труда в промышленности. 2011. № 4. С. 42–48.
- 19. Пышкина М.Д. Определение основных дозообразующих нуклидов в выбросах АЭС PWR и BBЭР // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2017. № 2 (18). С. 98–107.
- Румынин В.Г., Панкина Е.Б., Якушев М.Ф., Боронина А.В. и др. Оценка влияния атомно-промышленного комплекса на подземные воды и смежные природные объекты (г. Сосновый Бор Ленинградской области). СПб.: Изд-во СПбУ, 2002. 249 с.
- Румынин В.Г., Никуленков А.М. Зональность физических свойств котлинских глин вендской системы (северо-запад русской платформы) // Записки Горного института, 2012. Т. 197. С. 191–196.
- СанПиН 2.6.1. 2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). М.: Госстандарт, 2009. URL: http://docs.cntd.ru/document/902170553
- 23. Стамат И.П., Лисаченко Э.П. Эффективная удельная активность природных радионуклидов в средах с нарушенным радиоактивным равновесием в рядах урана и тория // Радиационная гигиена. 2008. Т. 1. № 1. С. 27–31.
- 24. Шварц А.А. Химический состав подземных вод Санкт-Петербургского региона в свете новых требований к качеству питьевой воды // Вестник СПбУ. Сер. 7. 2005. Вып. 1. С. 85–93.

- 25. Яхнин Э.Я., Томилин А.М., Шелемотов А.С. Оценка качества и химический состав подземных вод дочетвертичных отложений Ленинградской области // Разведка и охрана недр. 2005. № 5. С. 42–48.
- 26. Aquilina L., Matray J.M, Lancelot J. 25 years after the Chernobyl power plant explosion: Management of nuclear wastes and ra-dionuclide transfer in the environment // Applied Geochemistry, 2012, vol. 27 (7), pp. 1291–1296.

https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.04.010

 Dashko R.E., Lebedeva Y.A. Improving approaches to estimating hydrogeological investigations as a part of engineering survey in megacities: case study of St. Petersburg // Water resources, 2017, vol. 44, no.7, pp. 875–885. https://doi.org/10.1134/S009780781707003X

 Gallardo A.H., Marui A. The aftermath of the Fukushima nuclear accident: Measures to contain groundwater

ma nuclear accident: Measures to contain groundwater contamination // Science of The Total Environment, 2016, vol. 547, pp. 261–268. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.129

29. *Ho Song J.* An assessment on the environmental contamination caused by the Fukushima accident // Journal of Environmental Management, 2018, vol. 206, pp. 846–852. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.068

- Poinssot C., Geckeis H. Overview of Radionuclide Behavior in the Natural Environment. Radionuclide Behavior in the Natural Environment // Woodhead Publising Limited, 2012, pp. 1–12.
- Protosenya A.G., Lebedev M.O., Karasev M.A., Belyakov N.A. Geomechanics of low-subsidence construction during the development of underground space in large cities and megalopolises // Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development, 2019, vol. 9, no 5, pp. 1005-1014. https://doi.org/10.24247/ijmperdoct201989
- Russell B.C., Croudace Ian W., Warwick Phil E. Determination of ¹³⁵Cs and ¹³⁷Cs in environmental samples: A review // Analytica Chimica Acta, 2015, vol. 890, pp. 7–20. https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.06.037
- 33. Tondel M., Granath G., Wålinder R.¹³⁷Cs activity in Sweden after the Chernobyl Nuclear Power Plant accident in relation to quaternary geology and land use // Applied Geochemistry, 2017, vol. 87, pp. 38–43. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.10.012

NATURAL RADIOACTIVITY AND BACKGROUND VALUES OF ANTHROPOGENIC RADIONUCLIDES IN GROUNDWATER AROUND THE LENINGRAD NPP AREA

V. A. Erzova^{a, #}, S. M. Sudarikov^a, V. G. Rumynin^{b, c}, and A. A. Shvarts^{b, c}

 ^a St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, 21st Line V.O., 2, 199106, Russia
^b St.Petersburg Division, Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences; Srednii pr. 41, St. Petersburg, 199004 Russia

^c Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University, Universitetskaya nab. 7–9, St. Petersburg, 199004 Russia [#]E-mail: erzova.spmu@yandex.ru

The natural radioactivity and background content of anthropogenic radionuclides in groundwater near the Leningrad NPP was studied based on the results of monitoring observations. Radiation characteristics of the Quaternary, Lomonosov, and Vendian aquifer complexes were analyzed. The total alpha (α)- and beta (β) activities, as well as the content of radon (²²²Rn), radium (²²⁴Ra, ²²⁶Ra, ²²⁸Ra), polonium (²¹⁰Po), lead (²¹⁰Pb), thorium (²³²Th), potassium (40K), and uranium (²³⁸U, ²³⁴U) were measured. The increased activity of natural radionuclides in the the Vendian aquifer was noted. A typical level of natural radioactivity was estimated for the groundwater in the study area. The total alpha (α)- and beta (β) activities, the content of cesium (¹³⁷Cs), strontium (⁹⁰Sr), tritium (³H) were measured among the anthropogenic radionuclides. The background levels of anthropogenic radionuclides in groundwater in the study area were measured and provided.

Keywords: Leningrad NPP, groundwater monitoring, natural radioactivity, anthropogenic radionuclides, background values of radionuclides, groundwater pollution

REFERENCES

- 1. Abramov, A.A., Badun, G.A. *Osnovy radiokhimii i radioekologii: ucheb. posobie* [Fundamentals of radiochemistry and radioecology: textbook]. Baku, Branch of the Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University, 2011, 138 p. (in Russian)
- 2. Anderson, E.B., Savonenkov, V.G., Shabalev, S.I. Perspektivy sozdaniya podzemnykh mogil'nikov RAO v nizh-

nekembriiskikh glinakh Leningradskoi oblasti [Prospects for the creation of underground repositories for radioactive waste in the Lower Cambrian clays of the Leningrad region]. Proceedings of the Khlopin Radium Institute, 2006, vol. XI, pp. 105–132. (in Russian)

3. Artamonova, S.Yu. *Tekhnogennye radionuklidy v* prirodnykh vodakh raionov mirnykh podzemnykh yadernykh vzryvov "Kraton-3" i "Kraton-4" [Technogenic radionuclides in natural water in the areas of peaceful

ГЕОЭКОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ № 4 2021

64

underground nuclear explosions "Craton-3" and "Craton-4"]. *Geoekologiya*, 2013, no. 5, pp. 417–428. (in Russian)

- Vinograd, N.A., Tokarev, I.V., Stroganova, T.A. Osobennosti formirovaniya podzemnykh vod osnovnykh ekspluatiruemykh vodonosnykh gorizontov Sankt-Peterburga i okrestnostei po dannym o khimicheskom i izotopnom sostave [Specific features of groundwater formation in the main aquifers of St. Petersburg and suburbs based on data of chemical and isotope composition]. Vestnik SPbGU. Nauki o Zemle, 2019, vol. 64, no. 4, pp. 575– 597. (in Russian)
- Voronov, A.N., Vinograd, N.A. Gdovskii vodonosnyi kompleks – istochnik presnykh, mineral'nykhki promyshlennykh vod [Lower-kotlin aquifer as a source of potable water supply and mineral industrial waters]. Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 7. Geologiya. Geografiya. 2006, no. 4, pp. 88–95. (in Russian)
- 6. Voroniuk, G.Yu., Borodulina, G.S., Krainyukova, I.A. Tokarev, I.V. Vodoobmen v kraevykh chastyakh Baltiiskogo shchita i prilegayushchikh artezianskikh basseinakh po izotopnym i khimicheskim dannym (nauchnye i prikladnye aspekty). Karel'skii peresheek [Groundwater exchange in the Baltic shield marginal areas and adjacent artesian basins based on isotope and hydrochemistry data. Scientific problems and practical applications. Karelian isthmus]. Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk, 2016, no. 9, pp.46–56. (in Russian)
- Grigoriev, A.G., Vladimirov, M.V. Osnovnye zakonomernosti raspredeleniya glavnykh prirodnykh i tekhnogennykh radionuklidov v donnykh osadkakh akvatorii vostochnoi chasti Finskogo zaliva [Main tendencies in distribution of major natural and technogenic radionuclides in the bottom sediments in the eastern part of the Gulf of Finland]. Mediko-biologicheskie i sotsial'no-psikhologicheskie problemy bezopasnosti v chrezvychainykh situatsiyakh [Medical biological and socio-psychological safety problems in emergencies], 2010, no. 4–2, pp. 57–61. (in Russian)
- Dashko, R.E., Korobko, A.A. Inzhenerno-geologicheskoe obosnovanie bezopasnosti stroitel'stva i ekspluatatsii sooruzhenii razlichnogo naznacheniya v predelakh Predglintovoi nizmennosti (Zapadnaya chast' Leningradskoi oblasti) [Engineering geological substantiation of safety upon construction and operation of engineering structures of different purpose within the Predglintovaya Lowland (the Western part of the Leningrad region)]. Zapiski Gornogo instituta, 2016, vol. 206, pp. 22–25. (in Russian)
- Dashko, R.E., Korobko, A.A. Geneticheskie osobennosti formirovaniya i izmeneniya fiziko-khimicheskikh svoistv nizhnekembriiskikh glin v razreze Sankt-Peterburgskogo regiona [Genetic features of the formation and changes in the physicochemical properties of the Lower Cambrian clays in the section of the St. Petersburg region]. Sergeevskie chteniya. Materialy godichnoi sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoi geologii i gidrogeologii [Sergeev's readings. Proc. annual session of the Sci. Council RAS on the problems in environmental geoscience, engineering geology and hydrogeology]. 2014, vol. 16, pp. 23–29. (in Russian)

- Dashko, R.E., Kotyukov, P.V. Inzhenerno-geologicheskii i gidrogeologicheskii analiz osobennostei ekspluatatsii peregonnykh tonnelei peterburgskogo metropolitena v vodoupornoi tolshche vendskogo vodonosnogo kompleksa [Engineering geological and hydrogeological analysis of the specific features in the operation of the St. Petersburg metro running tunnels in the water-resistant strata of the Vendian aquifer complex]. Sergeevskie chteniya. Inzhenerno-geologicheskie i geoekologicheskie problemy gorodskikh aglomeratsii [Sergeev's readings. Engineering geological and geoecological problems of urban agglomerations]. 2015, vol. 17, pp. 343–349. (in Russian)
- Dashko, R.E., Kotyukov, P.V., Shidlovskaya, A.V. Vliyanie gidrogeologicheskikh uslovii na bezopasnost' osvoeniya podzemnogo prostranstva pri stroitel'stve transportnykh tonnelei [Influence of hydrogeological conditions on the subsurface development safety upon the construction of transport tunnels]. Zapiski Gornogo instituta, 2012, vol. 199, pp. 9–16. (in Russian)
- Erzova, V.A., Vladimirov, K.V., Rumynin, V.G. Issledovanie povedeniya tekhnogennykh radioaktivnykh oreolov na uchastke istoricheskogo zagryazneniya podzemnykh vod po dannym monitoringa [Investigation of technogenic radioactive halos behavior in the area of historical groundwater contamination according to monitoring data]. Perspektivy razvitiya inzhenernykh izyskanii v stroitel'stve v Rossiiskoi Federatsii, 2019, pp. 388–398. (in Russian)
- 13. Karmazinov, F.V. Vodosnabzhenie Sankt-Petersburga [Water supply in St. Petersburg]. St. Petersburg. Novyi zhurnal, 2003, pp. 670. (in Russian)
- Kudelskii, A.V., Smith, J.T., Pashkevich, V.I. Postchernobyl'skaya gidrosfera Belarusi v raionakh radioaktivnykh vypadenii (retrospektivnyi obzor) [Post-Chernobyl hydrosphere of Belarus within the radioactively contaminated territories (retrospective review)]. Geoekologiya, 2012, no. 4, pp. 293–309. (in Russian)
- Kul'kova, M.A., Lebedev, S.V., Nesterov, E.M., Davydochkina, A.V. *Radiouglerod i tritii v vodonosnoi sisteme Sankt-Peterburgskogo regiona* [Radiocarbon and tritium in the hydrosphere of St. Petersburg region]. *Izvestiya RGPU im A.I.Gertsena*, 2014, no. 165, pp. 93–98. (in Russian)
- Kurilenko, V.V., Khaikovich, I.M., Lebedev, S.V. Geofizicheskie polya v ekologicheskoi geologii [Geophysical fields in environmental geology]. Vestnik SPbGU, 2016, no. 1, pp. 15–28. (in Russian)
- Nazarov, E.I., Ekidin, A.A., Vasil'ev, A.V. Otsenka postupleniya ugleroda-14 v atmosferu, obuslovlennogo vybrosami AES [Assessment of the atmospheric carbon-14 caused by NPP emissions]. Izvestiya vuzov, 2018, vol. 61, no.12/2, pp. 67–73. (in Russian)
- Ogorodnikov, B.I. Tekhnogennye radioaktivnye aerozoli produkty avarii Chernobyl'skoi AES [Technogenic radioactive aerosols as the products of Chernobyl NPP accident]. Bezopasnost' truda v promyshlennosti, 2011, no. 4, pp. 42–48. (in Russian)
- Pyshkina, M.D. Opredelenie osnovnykh dozoobrazuyushchikh nuklidov v vybrosakh AES PWR i VVER [Determination of the main dose-forming nuclides in NPP PWR and VVER releases]. Biosfernaya sovmestimost':

chelovek, region, tekhnologii, 2017, no. 2 (18), pp. 98–107. (in Russian)

- Rumynin, V.G., Pankina, E.B., Yakushev, M.F., Boronina, A.V. et al. Otsenka vliyaniya atomno-promyshlennogo kompleksa na podzemnye vody i smezhnye prirodnye ob'ekty (g. Sosnovyi Bor Leningradskoi oblasti) [Assessment of the atomic-industrial complex influence on the groundwater and adjacent natural bodies (Sosnovyi Bor, Leningrad oblast)]. St. Petersburg, SPbU Publ., 2002, 249 p. (in Russian)
- Rumynin, V.G., Nikulenkov A.M. Zonal'nost' fizicheskikh svoistv kotlinskikh glin vendskoi sistemy (severozapad Russkoi platformy) [Zoning of physical properties of the Kotlin clays of the Vendian system (northwest of the Russian platform)]. Zapiski Gornogo instituta, 2012, vol. 197, pp. 191–196. (in Russian)
- SanPiN 2.6.1. 2523–09. Normy radiatsionnoi bezopasnosti (NRB-99/2009) [Radiation safety standards (NRB-99/2009)]. Moscow, Gosstandart Publ., 2009. (in Russian)
- 23. Stamat, I.P., Lisachenko, E.P. *Effektivnaya udel'naya aktivnost' prirodnykh radionuklidov v sredakh s narushennym radioaktivnym ravnovesiem v ryadakh ura-na i toriya* [Effective specific activity of natural radionuclides for the norm belonged to 238U and 232Th series being in the state of disturbed radioactive equilibrium]. *Radiatsionnaya gigiena*, 2008, vol. 1, no. 1, pp. 27–31. (in Russian)
- 24. Shvarts, A.A. Khimicheskii sostav podzemnykh vod Sankt-Peterburgskogo regiona v svete novykh trebovanii k kachestvu pit'evoi vody [Chemical composition of groundwater in the area of St. Petersburg in view of new requirements to the potable water quality]. Vestnik SPbGU, 2005, vol. 1, pp. 85–93. (in Russian)
- 25. Yakhnin, E.Ya., Tomilin, A.M., Shelemotov, A.S. Otsenka kachestva i khimicheskii sostav podzemnykh vod dochetvertichnykh otlozhenii Leningradskoi oblasti [Assessment of the quality and chemical composition of groundwater in pre-Quaternary sediments of the Leningrad region]. Razvedka i okhrana nedr, 2005, no. 5, pp. 42–48. (in Russian)
- 26. Aquilina, L., Matray, J.M., Lancelot, J. 25 years after the Chernobyl power plant explosion: management of

nuclear wastes and radionuclide transfer in the environment. *Applied Geochemistry*, 2012, vol. 27 (7), pp. 1291–1296.

https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.04.010.

 Dashko, R.E., Lebedeva, Y.A. Improving approaches to estimating hydrogeological investigations as a part of engineering survey in megacities: case study of St. Petersburg. *Water resources*, 2017, vol. 44, no.7, pp. 875– 885.

https://doi.org/10.1134/S009780781707003X

- Gallardo, A. H., Marui, A. The aftermath of the Fukushima nuclear accident: Measures to contain groundwater contamination. *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 547, pp. 261–268. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.129.
- 29. Ho, Song J. An assessment on the environmental contamination caused by the Fukushima accident. *Journal of Environmental Management*, 2018, vol. 206, pp. 846– 852.

https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.068.

- Poinssot, C., Geckeis, H. Overview of radionuclide behavior in the natural environment. In: Radionuclide behavior in the natural environment. Woodhead Publ. Ltd, 2012, pp. 1–12.
- Protosenya, A.G., Lebedev, M.O., Karasev, M.A., Belyakov, N.A. Geomechanics of low-subsidence construction during the development of underground space in large cities and megalopolices. *Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 2019, vol. 9, no. 5, pp. 1005–1014. https://doi.org/10.24247/jijmperdoct201989
- Russell, B.C., Croudace, Ian W., Warwick, Phil E. Determination of 135Cs and 137Cs in environmental samples: A review. *Analytica Chimica Acta*, 2015, vol. 890, pp. 7–20. https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.06.037.
- 33. Tondel, M., Granath, G., Wålinder, R.137Cs activity in Sweden after the Chernobyl Nuclear Power Plant accident in relation to Quaternary geology and land use. *Applied Geochemistry*, 2017, vol. 87, pp. 38–43. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.10.012.