

УДК 556.114.679

О ВОЗДЕЙСТВИИ ОБЪЕКТОВ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО АТОМНО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД (ЛЕНИНГРАДСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Ерзова Валентина Александровна^{1,2},
Erzova.spmu@yandex.ru

Румынин Вячеслав Геневич^{2,3},
rumynin@hgepro.ru

Судариков Сергей Михайлович¹,
Sudarikov_SM@pers.spmi.ru

Шварц Алексей Аркадьевич^{2,3},
alarshv@hgepro.ru

Владимиров Константин Владимирович^{2,3},
vladimirov@hgepro.ru

¹ Санкт-Петербургский горный университет,
Россия, 199121, г. Санкт-Петербург, 21 Линия, 2.

² Санкт-Петербургское отделение института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Россия, 199004, г. Санкт-Петербург, Средний пр., 41.

³ Санкт-Петербургский государственный университет Института наук о Земле,
Россия, 199004, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9.

Актуальность исследования. В связи с развитием атомной энергетики, наращиванием мощностей, ростом объемов радиоактивных материалов в районах расположения атомно-промышленных объектов все большее значение приобретает организация системы мониторинга окружающей среды, в частности, подземных вод. Объекты атомной энергетики являются источниками поступления техногенных радионуклидов в подземные воды, приводящего к формированию ореолов загрязнения. Основное внимание в работе уделено территории, где сосредоточено сразу несколько объектов атомной энергетики, которые оказывают воздействие на природные объекты.

Цель: определить содержание техногенных радионуклидов в подземных водах на территории Северо-западного атомно-промышленного комплекса Ленинградской области. На основе полученных данных выявить основные источники радиоактивного загрязнения и область его распространения.

Объекты и методы. Объектами исследования являются подземные воды четвертичного и нижнекембрийского горизонтов, частично загрязненные техногенными радионуклидами. В основу работы положены данные многочисленных инженерных изысканий, проводившихся в разные годы на территориях размещения действующей и строящейся Ленинградской АЭС, пункта хранения радиоактивных отходов и других площадках. Используются данные бурения, опытных гидрогеологических опробований и режимных наблюдений, в том числе радиологических.

Результаты. Выполнено районирование территории Северо-западного атомно-промышленного комплекса по степени воздействия источников загрязнения на радиационное состояние подземных вод, контролируемое присутствием в них нестабильных изотопов цезия (^{137}Cs), стронция (^{90}Sr) и трития (^3H). Превышение естественного радиационного фона подземных вод установлено на нескольких участках размещения предприятий Северо-западного атомно-промышленного комплекса. Максимально повышенные значения активности радионуклидов вплоть до значений выше уровня вмешательства отмечаются вблизи пункта хранения радиоактивных отходов.

Ключевые слова:

Мониторинг подземных вод, радиоактивное загрязнение, Ленинградская АЭС, хранилище радиоактивных отходов, радиационный фон.

Введение

Развитие промышленности влечет за собой риски загрязнения окружающей среды, в том числе загрязнение атмосферы, почв, поверхностных и подземных вод. В промышленно развитых районах основными загрязняющими элементами могут являться тяжелые металлы, радиоактивные вещества и др. [1–3], накопление которых может привести к негативным последствиям состояния экосистемы [4–7]. С целью оценки и минимизации техногенного воздействия промышленных объектов создают системы мониторинга по наблюдению за состоянием природных систем [8–11].

Основными контролируемыми средами являются воздушная, наземная, водная [12–24].

Развитие атомной энергетики, ввод в эксплуатацию новых мощностей атомных электростанций, увеличение объемов радиоактивных отходов приводят к изменению состояния окружающей среды [15–18]. Поэтому вблизи размещения объектов атомного профиля актуальна организация системы мониторинга за изменением состояния окружающей среды, в том числе подземных вод [19, 20]. Так, на всех предприятиях Государственной корпорации «Росатом» ведется объектный мониторинг состояния недр (ОМОН).

ОМСН позволяет получать достоверную информацию о воздействии ядерно- и радиационно-опасных объектов на состояние недр и сопредельные среды, необходимую для оценки радиоэкологической безопасности при эксплуатации и выводе из эксплуатации объектов, информационного обеспечения управляющих решений по реализации природоохранных мероприятий. Например, в случае аварийной ситуации, сопровождаемой попаданием радионуклидов в подземные воды, разрабатываются и внедряются следующие мероприятия: локализация радиоактивного загрязнения путем откачки загрязненных подземных вод, ограничения сброса радиоактивных вод, устранение проникновения атмосферных осадков, строительство или усовершенствование дренажной системы, строительство противодиффузионной завесы и др.

Несмотря на то, что подземные воды являются достаточно защищенным природным объектом, история обращения с радиоактивными материалами (Челябинск, ПО «Маяк» [21–23]) и последствия аварии на атомных электростанциях (Чернобыль, 1986 г. [24, 25]; Япония – Фукусима-1, 2011 г. [26, 27]) указывают, что процессы загрязнения окружающей среды могут принимать катастрофический характер и наблюдаться долгие годы [28–30].

На территориях размещения объектов атомной промышленности в рамках мониторинга подземных вод ведётся постоянный контроль за изменением их химического и радионуклидного состава [31, 32]. Это позволяет оперативно получать информацию для оценки радиационных рисков и при необходимости своевременно принимать меры для обеспечения безопасности населения [33–35].

В тех районах, где сосредоточено несколько объектов атомной энергетики, которые оказывают воздействие не только на окружающую среду, но и друг на друга, результаты мониторинга следует анализировать с особым вниманием. Показательным примером данного вида объектов являются объекты Госкорпорации «Росатом», сосредоточенные в г. Сосновый Бор (Ленинградская область).

Целью данной работы является оценка влияния каждого объекта Северо-западного атомно-промышленного комплекса (СЗАПК) на загрязнение окружающей среды, а именно подземных вод, определение основных источников загрязнения, выявление вероятных направлений распространения радиоактивного загрязнения на основе обобщения, интерпретации и анализа данных многолетнего мониторинга по содержанию радиоактивных веществ в подземных водах и гидрогеологических наблюдений в контрольно-наблюдательных скважинах площадки первой очереди Ленинградской АЭС (ЛАЭС-2) и прилегающих территорий.

Результаты настоящей работы могут быть использованы при проведении дальнейших гидрогеологических (гидродинамических и гидрохимических) наблюдений с отбором проб на определение содержания техногенных радионуклидов на исследуемых территориях, которые характеризуются двумя особенностями. Во-первых, наличием источников по-

ступления радионуклидов в подземные воды; во-вторых, нестабильной гидродинамической обстановкой, вызванной высокой техногенной нагрузкой (например, строительство второй очереди ЛАЭС-2).

Характеристика района исследования

На территории Ленинградской области основными объектами, являющимися источниками радиационного воздействия на подземную гидросферу, являются объекты СЗАПК. К ним относятся (рис. 1):

- Ленинградская АЭС с 4-мя реакторами типа РБМК-1000 (ЛАЭС);
- строящаяся Ленинградская АЭС с реакторами типа ВВЭР (ЛЭАС-2);
- научно-исследовательский технический институт им. А.П. Александрова с комплексом экспериментальных ядерных установок (НИТИ);
- комплекс по переработке отходов, включающий временное хранилище жидких РАО (ХЖО) ЛАЭС (КПО ЛАЭС);
- филиал «Северо-западный территориальный округ» ФГУП «РосРАО» с приповерхностными хранилищами твердых РАО (ФГУП «РосРАО»).

Геологическое строение рассматриваемой территории хорошо изучено в рамках работ, проводившихся для обоснования строительства пункта окончательной изоляции РАО (ПЗРО) в 2009–2016 гг. [36, 37]. В геологическом разрезе района выделяется кристаллический фундамент и перекрывающий его осадочный чехол мощностью до 200 м, где преобладают терригенные породы [38–41].

В гидрогеологическом отношении изучаемая территория приурочена к Ленинградскому артезианскому бассейну, который расположен на северо-западном борту Московской синеклизы [42].

В осадочной толще выделяются четвертичный, нижнекембрийский водоносные горизонты и вендский водоносный комплекс. В данной статье особое внимание уделяется двум верхним водоносным горизонтам – четвертичному (Q_{IV}) и нижнекембрийскому (C_1), в связи с наибольшей опасностью их техногенного загрязнения (рис. 2).

Четвертичный водоносный горизонт (Q_{IV}) широко развит на изучаемой территории. Водовмещающими породами являются надморенные пески различного генезиса, мощность которых не превышает 5 м. Горизонт подстилается слабопроницаемыми прослоями суглинков мощностью до 8 м, являющимися локальным водоупором. Исходя из геологического разреза, горизонт является незащищенным от поверхностного загрязнения.

Нижнекембрийский водоносный горизонт (C_1) сложен песками и слабосцементированными песчаниками, которые разделены водоупорными глинистыми прослоями на отдельные зоны. На территории ЛАЭС-2 в разрезе встречаются три такие водоносные зоны, на территории филиала ФГУП «РосРАО» прослеживается только две зоны, а за территорией КПО ЛАЭС, по направлению к заливу, водоносный горизонт полностью выклинивается.

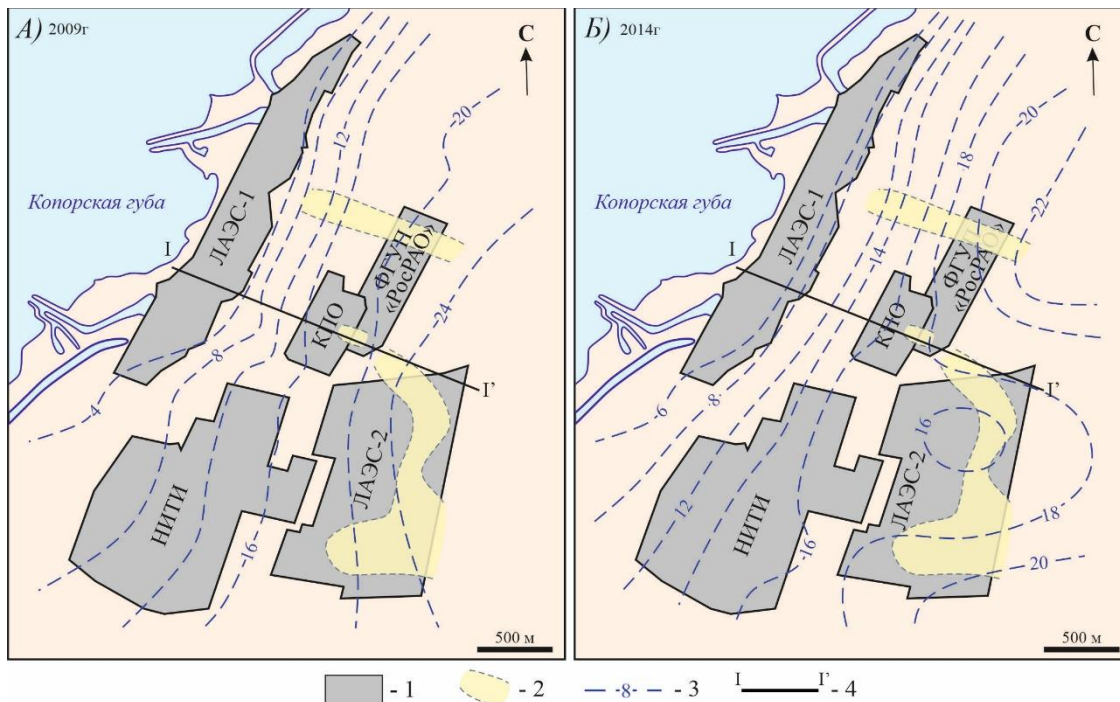


Рис. 1. Схема расположения основных объектов СЗАПК, совмещенная с картами гидроизогипс подземных вод четвертичного горизонта на 2009 г. (А) и 2014 г. (Б): 1 – контуры объектов СЗАПК; 2 – контуры палеодолин; 3 – гидроизогипсы и их отметки; 4 – линия схематичного разреза (рис. 2)

Fig. 1. Location of the main facilities of the North-West Nuclear Complex, combined with groundwater table maps of the Lomonosov aquifer in 2009 (A) and in 2014 (B): 1 – the North-West Nuclear Complex facilities; 2 – paleo-valleys contours; 3 – water-table contours and their values; 4 – schematic cross-section line (Fig. 2)

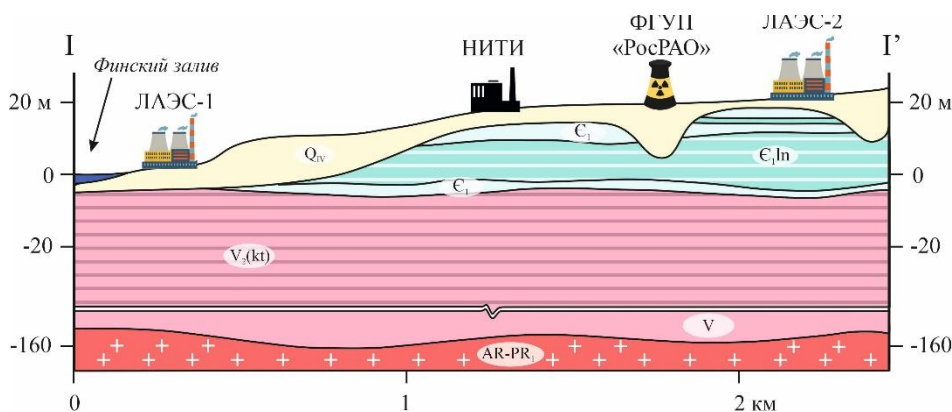


Рис. 2. Схема залегания водоносных и водоупорных горизонтов в районе исследований: индексы на схеме – четвертичный (Q_{IV}) и нижнекембрийский (C_1) горизонты; вендский водоносный комплекс (V); архей-нижнепротерозойская водоносная зона экзогенной трещиноватости (AR-PR). Нижнекембрийский (C_{1ln}) и верхневендский (котлинский) ($V_2(kt)$) водоупорные горизонты

Fig. 2. Scheme of aquifers and confining beds at study area: indexes are – quaternary (Q_{IV}) and Lower-Cambrian (C_1) horizons; Vendian aquifer (V); Archean-Lower Proterozoic aquifer zone of the exogenous fractured zone (AR-PR). Lower-Cambrian (C_{1ln}) and Upper Vendian (Kotlin) ($V_2(kt)$) confining beds

Основным источником питания подземных вод четвертичных и нижнекембрийских отложений является инфильтрация. Нижнекембрийский горизонт также питается за счет перетекания из четвертичного. Область разгрузки нижнекембрийского горизонта находится в районе склона второй приморской террасы, где происходит перетекание в вышележащий горизонт четвертичных отложений, который, в свою очередь, разгружается в Копорскую губу Финского залива.

Региональный поток обоих водоносных горизонтов направлен в сторону Финского залива с градиентом 0,005...0,015. В рассматриваемых водоносных горизонтах иногда отмечаются инверсии направления потока, вызванные локальными, в основном техногенными, факторами. Так, после 2009 г. в связи началом строительства первой очереди ЛАЭС-2 на её территории образовалась депрессионная воронка, что привело к локальным изменениям в направлении потока подземных вод (рис. 1, А). На рассматриваемой

территории СЗАПК подземные воды описываемых водоносных горизонтов для водоснабжения не используются.

В геологическом разрезе исследуемой территории характерной особенностью является наличие палеодолин, заполненных песками, супесями, суглинками. В руслах древних долин (палеодолин) суммарная мощность четвертичных отложений достигает 30 м, тем самым они прорезают нижележащие нижнекембрийские отложения. Таким образом, палеодолины создают гидрогеологическое окно, за счет которого подземные воды четвертичного и нижнекембрийского водоносных горизонтов имеют хорошую гидравлическую связь. Палеодолины пересекают площадку строящейся ЛАЭС-2, и наблюдаются в северной и южной частях территории ФГУП «РосРАО» (рис. 1).

Материалы и методы исследования

Радиологическое состояние окружающей среды, и подземных вод в том числе, на территории предприятий СЗАПК контролируется службами радиационной безопасности, ведущими наблюдения, в том числе, и за элементами гидрогеологического режима. Основными показателями, измеряемыми службами радиационной безопасности предприятий, являются скрининговые (суммарная α - и β -активности), объемная активность ^3H , ^{90}Sr , ^{137}Cs .

Радиационный контроль осуществляется по наблюдательным скважинам, входящим в систему мониторинга предприятий. В связи с проведением строительных работ режимная сеть постоянно модернизируется: часть скважин, вышедших из строя, ликвидируются, бурятся новые. В настоящей работе анализируются данные по 67 скважинам, пробуренным на четвертичный и нижнекембрийский водоносные горизонты (рис. 3).

Измерения скрининговых параметров (суммарная α - и β -активности) проводились с помощью радиометра УФМ-2000 (НПЦ «ДОЗА», Зеленоград, Россия). Для этого пробы воды упаривали, сушили при 450 °С в течение 30 мин. Пределы обнаружения суммарной α - и β -активностей составляют 0,02 и 0,1 Бк/л соответственно. Подготовка образца (упаривание жидкой пробы и получение сухого остатка) подразумевает, что измерение α - и β -активностей исключает влияние трития (^3H).

Для определения содержания ^3H в пробах подземных вод использовался спектрометрический радиометр Tri-Carb® 2910TR (Waltham, США). Предел обнаружения трития составляет 10 Бк/кг. Погрешность измерений составляет 3–25 %.

Радиохимический анализ ^{90}Sr в подземных водах выполнялся с использованием радиометра УМФ-2000 (НПЦ «ДОЗА», Зеленоград, Россия) по методике, разработанной НИТИ им. А.П. Александрова (г. Сосновый Бор). Методика основана на измерении активности ^{90}Sr , находящегося в равновесии с ^{90}Y (предел обнаружения 10 Бк/м³). ^{137}Cs определялся с помощью γ -спектрометра DSPec jr (ORTEC®, США) (предел обнаружения 10 Бк/м³).

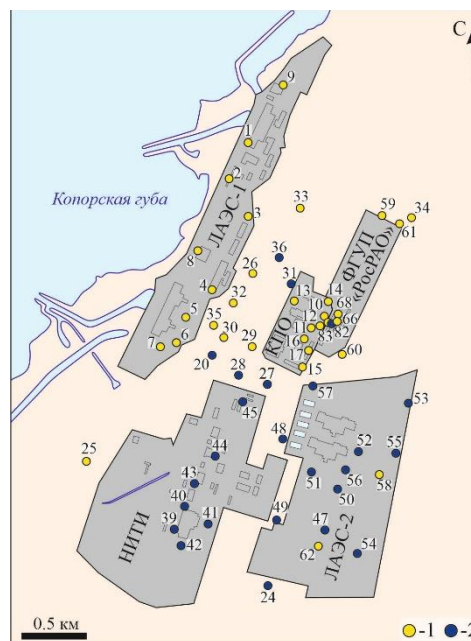


Рис. 3. Схема радиологического опробования подземных вод (2009–2015 гг.): скважина и ее номер, оборудованная на 1 – четвертичный и 2 – нижнекембрийский водоносные горизонты

Fig. 3. Groundwater radiochemical sampling scheme (2009–2015): borehole and number, screening 1 – Quaternary and 2 – Lower-Cambrian aquifers

Для того, чтобы оценить степень воздействия объектов СЗАПК по данным мониторинга, необходимо знать фоновые значения измеряемых показателей. Согласно [36] фоновое содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в подземных водах не превышает единиц и первых десятков мБк/л (^{90}Sr < 3 мБк/л, ^{137}Cs < 4 мБк/л), трития – первых Бк/л (0,27–1,6 Бк/л).

На основании имеющихся материалов, включая материалы по оценке воздействия на окружающую среду, результаты полевых работ, лабораторных исследований, в данной работе решаются следующие задачи: 1) определение основных объектов воздействия на загрязнение подземных вод и их характеристика; 2) определение вклада каждого предприятия в загрязнение подземных вод радионуклидами (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^3H) на основании данных мониторинга; 3) выделение зон по степени загрязнения подземных вод техногенными радионуклидами на территории СЗАПК.

Результаты и обсуждения

В промышленной зоне г. Сосновый Бор Ленинградской области, как ранее отмечалось, предприятия СЗАПК являются локальными радиационными объектами. Ниже приводится характеристика каждого объекта и его вклад в радиационное состояние подземных вод.

Строящаяся Ленинградская АЭС с реакторами типа ВВЭР (ЛАЭС-2). Первый энергоблок был введен в эксплуатацию в конце 2018 г. В период с 2010 по 2015 гг. на площадке ЛАЭС-2 проводились исследования, которые позволили получить данные о величинах активности ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^3H , β - и α -активности (рис. 3).

Радиологическое опробование подземных вод ЛАЭС-2 выполнялось в 18 скважинах, оборудованных на четвертичный и нижнекембрийский водоносные горизонты (табл. 1).

Таблица 1. Статистические данные по содержанию техногенных радионуклидов в подземных водах района строящейся ЛАЭС-2 (период наблюдений 2010–2015 гг.)

Table 1. Statistical data on the content of anthropogenic radionuclides in groundwater in the area of the constructing Leningrad NPP-2 (observation period 2010–2015)

Радионуклид Radionuclide	Число определений Number of measurements	Среднее Average	Мин/Min	Макс/Max	Количество проб с превышением норматива, % Over normative standard value, %	Норматив, Бк/л Normative standard, Bq/l
Четвертичный водоносный горизонт/Quaternary aquifer						
$\sum\alpha$	8	0,11	0,03	0,19	0	0,2
$\sum\beta$	8	0,21	0,1	0,45	0	1,0
^{137}Cs	8	0,01	0,002	0,037	0	11
^{90}Sr	7	0,02	0,0036	0,11	0	4,9
^3H	21	8,7	1,02	56	0	7600
Нижнекембрийский водоносный горизонт/Lomonosov aquifer						
$\sum\alpha$	28	0,11	0,02	0,28	3	0,2
$\sum\beta$	28	0,22	0,03	0,67	0	1,0
^{137}Cs	26	0,010	0,002	0,03	0	11
^{90}Sr	29	0,009	0,001	0,027	0	4,9
^3H	39	6,2	0,18	99,7	0	7600

Из представленных данных видно, что в целом концентрации техногенных изотопов в подземных водах не превышают допустимых уровней. Средние содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr лежат в пределах фоновых значений. В 60 % опробованных скважинах содержание ^3H не превышает 3,5 Бк/л, и в 16 % – меньше

10 Бк/л. В некоторых скважинах отмечаются временно повышенные значения радионуклидов, которые при дальнейшем опробовании возвращаются на фоновый уровень.

Стоит отметить, что на момент отбора проб исследуемая площадка ЛАЭС-2 находилась на этапе строительства, и также то, что площадка располагается выше по потоку подземных вод относительно всех действующих предприятий по обращению с РАО (рис. 1, А). Таким образом, подземные воды территории строящейся ЛАЭС-2 в наименьшей степени подвержены техногенному воздействию.

Филиал «Северо-западный территориальный округ» ФГУП «РосРАО» с приповерхностными хранилищами твердых РАО (ФГУП «РосРАО»). Здесь с конца 1980-х гг. из зданий-хранилищ регистрировались утечки РАО [43]. В начале 1990-х гг. в ближайших к хранилищам скважинам максимальная активность трития (^3H) достигала $n \cdot 10^4$ кБк/л, ^{90}Sr и ^{137}Cs – n кБк/л. После реконструкции хранилищ, с целью устранения контакта подземных вод с РАО, произошли изменения радиационного состава подземных вод, концентрации техногенных радионуклидов начали снижаться.

В 2017 г. сотрудниками СПБО ИГЭ РАН на территории СЗТО ФГУП «РосРАО» проведен комплекс исследований для оценки степени изолированности существующих хранилищ и прогнозирования полей загрязнения вод радионуклидами [44]. В ходе работ было проведено опробование 26 скважин, оборудованных на четвертичный и нижнекембрийский водоносный горизонты. В результате были получены следующие значения удельной активности основных загрязняющих компонентов (Бк/л): α -активность – 0,9, β -активность – 5,3, ^3H – $6,7 \cdot 10^4$, ^{137}Cs – 0,5, ^{60}Co – 0,013 (рис. 4).

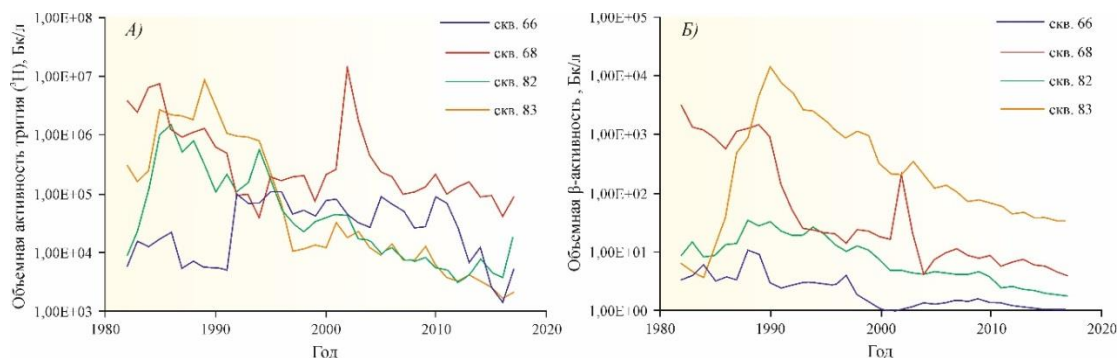


Рис. 4. Динамика среднегодовой активности ^3H (А) и суммарной β -активности (Б) в скважинах (1982–2017 гг.)
Fig. 4. Average annual activity of ^3H (A) and total β -activity (B) in wells (1982–2017)

В ходе данного исследования было определено, что основной очаг радиоактивного загрязнения подземных вод локализуется в той части территории («грязной» зоне) ФГУП «РосРАО», где непосредственно ведутся работы по обращению с РАО. Было установлено, что новые поступления радиоактивных веществ в подземные воды не регистрируются и сформировавшееся загрязнение имеет «исторический» характер [44].

На Ленинградской АЭС на конец 2020 г. действовало четыре реактора типа РБМК-1000. ЛАЭС осуществляет доставку, хранение ядерного топлива и деятельность по обращению с радиоактивными отходами.

На территории промплощадки ЛАЭС за весь период наблюдений службой радиационного контроля станции не было выявлено радиоактивного загрязнения подземных вод – измеренные концентрации радионуклидов не превышали уровня вмешательства

(УВ_{вода}) по НРБ-99/2009, суммарная β-активность грунтовых вод, как правило, не превышала 1 Бк/л. Данные мониторинга содержания ³H отсутствуют.

В подземных водах рассматриваемой площадки регистрируются значения радиационных показателей, превышающие в несколько раз фоновые. Так, в 1991 г. отмечалось превышение активностей изотопов ¹³⁷Cs (до 6 раз) и ⁹⁰Sr (до 45 раз) над фоновыми значениями [41]. Локальное повышение активности трития наблюдалось в районе площадки первой очереди (170–180 Бк/л). В начале 2000-х гг. в грунтовых водах присутствовали ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr, причем концентрации последнего превышали природный фон в 2–5 раз. В 2009 г. на площадке ЛАЭС было проведено опробование 9 скважин (рис. 3).

По данным опробования в 2009 г. содержание радиостронция в подземных водах повсеместно ниже УВ_{вода} по НРБ 99/2009. В большинстве скважин оно близко к фоновым значениям и не превышает сотых долей Бк/л. Максимальное значение – 0,13 Бк/л, отмечено в одной скважине (табл. 2). Содержания ¹³⁷Cs также не превышают УВ_{вода} по НРБ 99/2009 и близки к фоновым значениям. Данные мониторинга ³H отсутствуют.

Таблица 2. Статистические данные по содержанию техногенных радионуклидов в подземных водах площадки ЛАЭС (2009 г.)

Table 2. Statistical data on the content of anthropogenic radionuclides in groundwater in the area of the Leningrad NPP (observation period 2009)

Радионуклид Radionuclide	Число определений Number of measurements	Среднее Average	Мин/Min	Макс/Max	Количество проб с превышением норматива, % Over normative standard value, %	Норматив, Бк/л Normative standard, Bq/l
¹³⁷ Cs	3	0,13	0,13	0,14	0	11
⁹⁰ Sr	9	0,05	0,01	0,13	0	4,9

Научно-исследовательский технологический институт имени А.П. Александрова (НИТИ) включает комплекс экспериментальных ядерных установок и крупномасштабные стенды для исследования их поведения в критических ситуациях; здесь же осуществляют переработку жидких РАО НИТИ.

Радионуклидный состав вод представлен здесь ⁹⁰Sr в диапазоне объемных активностей от 10 до 30 мБк/л (табл. 3). Содержание ¹³⁷Cs – во всех скважинах ниже минимально детектируемой активности (1,2·10⁻² Бк/л). Суммарная бета-активность грунтовых вод выше суммы активности обнаруженных радионуклидов. Как показывают выполняемые исследования, подземная гидросфера на территории НИТИ не загрязнена, в частности, влияние хранилищ ФГУП «РосРАО» на радиоактивность грунтовых вод не прослеживается.

Возможными источниками радиационной опасности на территории исследования является комплекс по переработке отходов (КПО), включающий действующее временное хранилище жидких РАО (ХЖО) ЛАЭС. В 2009 г. на площадке КПО ЛАЭС было проведено опробование 8 скважин (рис. 2).

Таблица 3. Статистические данные по содержанию техногенных радионуклидов в подземных водах площадки НИТИ (2009–2010 гг.)

Table 3. Statistical data on the content of anthropogenic radionuclides in groundwater in the area of the Alexandrov Research Institute (observation period 2009–2010)

Радионуклид Radionuclide	Число определений Number of measurements	Среднее Average	Мин/Min	Макс/Max	Количество проб с превышением норматива, % Over normative standard value, %	Норматив, Бк/л Normative standard, Bq/l
¹³⁷ Cs	7	0,024	0,023	0,027	0	11
⁹⁰ Sr	8	0,017	0,014	0,022	0	4,9
³ H	8	<5	<5	<5	0	7600

Радиационный фон подземных вод КПО ЛАЭС повышен. В период мониторинга в подземных водах неоднократно фиксировались повышенные значения суммарной удельной β-активности, ³H, ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs и ¹³⁴Cs. Максимальных величин (превышающих для ³H и β-активности УВ по НРБ 99/09), как и на территории ФГУП «РосРАО», эти показатели достигли в 1991 г., что позволяет предположить единый источник загрязнения. Опробование ряда скважин КПО ЛАЭС в 2009 г. показало повышенное содержание ³H в нескольких наблюдательных скважинах, расположенных вдоль границы с ФГУП «РосРАО». Содержание радиостронция и радиостронция в большинстве опробованных скважин в 2009 г. было также несколько выше фоновых значений (табл. 4).

Таблица 4. Статистические данные по содержанию техногенных радионуклидов в подземных водах площадки КПО ЛАЭС (2009 г.)

Table 4. Statistical data on the content of anthropogenic radionuclides in groundwater in the area of the Leningrad NPP (observation period 2009)

Радионуклид Radionuclide	Число определений Number of measurements	Среднее Average	Мин/Min	Макс/Max	Количество проб с превышением норматива, % Over normative standard value, %	Норматив, Бк/л Normative standard, Bq/l
¹³⁷ Cs	2	1,15	0,1	2,2	0	11
⁹⁰ Sr	8	0,13	0,01	0,67	0	4,9
³ H	3	1,6·10 ⁵	2,5·10 ³	4,7·10 ⁵	66	7600

При направлении потока подземных вод в сторону Копорской губы и локализации наиболее интенсивного загрязнения подземных вод на ФГУП «РосРАО» вдоль его западной границы весьма вероятен перенос радионуклидного загрязнения в этом направлении на соседнюю территорию КПО ЛАЭС.

На территории между площадками КПО ЛАЭС и ЛАЭС – в зоне предполагаемого транзита загрязнения от ФГУП «РосРАО» – в начале 1990-х гг. по данным НПО «Радиовый институт» было установлено загрязнение подземных вод тритием (до тысяч Бк/л), повышенные концентрации ⁹⁰Sr (до 67 Бк/л) и ¹³⁷Cs (до

20 Бк/л). Опробование 2013 г. подтвердило наличие тритиевого загрязнения, не достигающего УВ по НРБ 09/99, но достаточно высокого (на три порядка выше природного фона). Наибольшие значения в 2013 г. – 475,8 и 406,2 Бк/л – отмечены в скважинах на четвертичный горизонт, расположенных рядом с территорией ЛАЭС (рис. 3). На порядок по отношению к фону повышена активность трития в скважинах 20 и 34. Объемная активность ^{90}Sr на этом участке незначительно повышена в ряде скважин, содержание ^{137}Cs – в пределах фоновых содержаний.

Объемная активность ^{90}Sr на этом участке незначительно повышена в ряде скважин, содержание ^{137}Cs – в пределах фоновых содержаний (табл. 5).

На основании данных радиационного мониторинга исследуемой территории построены карты распределения техногенных радионуклидов в подземных водах за период наблюдений 2009–2017 гг. (рис. 5).

Таблица 5. Статистические данные по содержанию техногенных радионуклидов в подземных водах территории между площадками КПО и ЛАЭС (2009–2015 гг.)

Table 5. Statistical data on the content of anthropogenic radionuclides in groundwater in the area between Liquid Radioactive Waste Treatment Facility and Leningrad NPP (observation period 2009–2015)

Радионуклид Radionuclide	Число определений Number of measurements	Бк/л/Bq/l			Количество проб с превышением норматива, % Over normative standard value, %	Норматив, Бк/л Normative standard, Bq/l
		Среднее Average	Мин/Min	Макс/Max		
$\Sigma\alpha$	19	0,18	0,03	0,58	26	0,2
$\Sigma\beta$	19	0,26	0,1	0,46	10	1,0
^{137}Cs	29	0,17	0,002	4,7	3	11
^{90}Sr	28	0,02	0,003	0,1	10	4,9
^3H	93	59	0,02	1460	0	7600

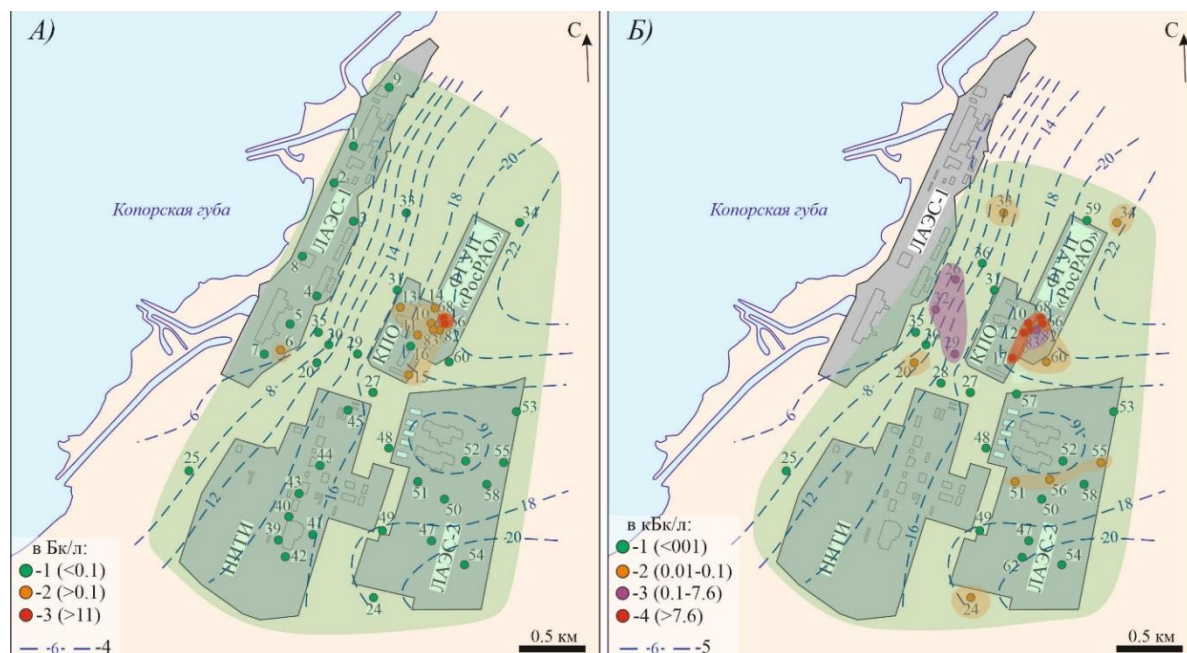


Рис. 5. Распределение содержания А) ^{137}Cs ; Б) ^3H в подземных водах исследуемой территории по данным опробования 2009–2017 гг.: А) скважины с объемной активностью ^{137}Cs : 1 – близкой к фоновой; 2 – надфоновой; 3 – выше УВ по НРБ-99/2009; 4 – гидроизогипсы четвертичного водоносного горизонта на 2017 г.; Б) скважины с объемной активностью ^3H : 1 – близкой к фоновой; 2 – надфоновой; 3 – высокой; 4 – выше УВ по НРБ-99/2009; 5 – гидроизогипсы четвертичного водоносного горизонта на 2017 г.

Fig. 5. Distribution of ^{137}Cs content (A); (B) of ^3H content in groundwater at the study area based on sampling in 2009–2017: A) wells with the volumetric activity of ^{137}Cs : 1 – close to the background; 2 – over background; 3 – above the action level according to NRB-99/2009; 4 – water-table contours of the Quaternary aquifer in 2017; B) wells volumetric activity of ^3H : 1 – close to the background; 2 – over background; 3 – above the action level according to NRB-99/2009; 5 – water-table contours of the Quaternary aquifer in 2017

Оценивая состояние подземных вод СЗАПК в целом, следует констатировать, что основным источником их загрязнения тритием (^3H) и в меньшей степени радиостронцием (^{90}Sr) и радиоцезием (^{137}Cs) является деятельность ФГУП «РосРАО» (рис. 5). Причем основное загрязнение сосредоточено в «грязной» зоне предприятия, где непосредственно ведутся работы по обращению с РАО.

Площадки КПО ЛАЭС и в некоторой степени самой ЛАЭС также подвержены радионуклидному за-

грязнению. Здесь фиксируются единичные скважины с повышенными значениями. Это может быть связано с тем, что они расположены близко к ФГУП «РосРАО» и преобладающее направление миграционного потока – на северо-запад в сторону Финского залива.

Территория НИТИ и площадки ЛАЭС-2, находящиеся южнее вышеупомянутых предприятий, являются в настоящее время «чистыми». Площадка ЛАЭС-2 в гидрогеологическом плане располагается выше по потоку, и на её территории в рассматривае-

мый период времени не было действующих объектов атомной энергетики. Таким образом, территорию площадки ЛАЭС-2 можно рассматривать в качестве «фонового» участка для исследуемого района.

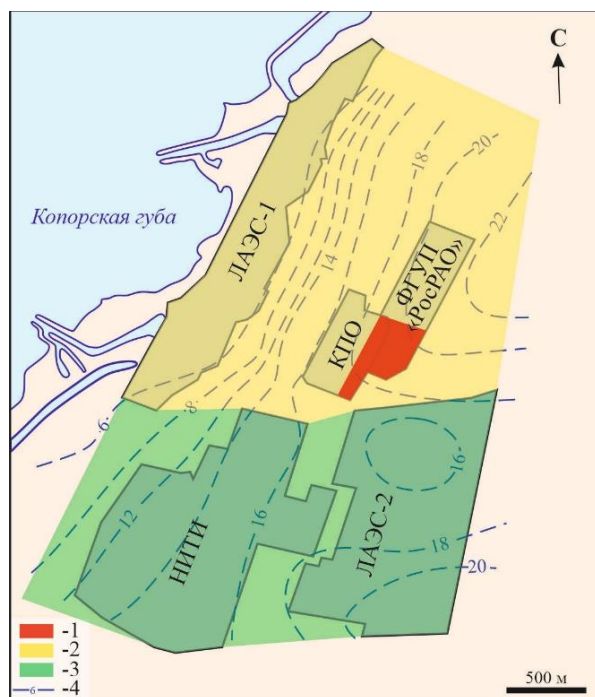


Рис. 6. Карты с зонами, выделенными по степени загрязнения подземных вод в районе СЗАПК: 1 – зона с высоким уровнем загрязнения; 2 – зона со средним уровнем загрязнения; 3 – зона с низким уровнем загрязнения; 4 – гидроизогипсы четвертичного водоносного горизонта на 2017 г.

Fig. 6. Maps delineating different zones of groundwater contamination near the North-West Nuclear Complex facilities: 1 – the area with significant contamination; 2 – the area with moderate contamination; 3 – the area with low contamination; 4 – Quaternary aquifer water-table contours in 2017

Исходя из вышеизложенного, на рассматриваемой территории можно выделить три зоны по степени загрязнения подземных вод радионуклидами (рис. 6):

1. Зона с низким уровнем загрязнения. К ней относится территории площадок ЛАЭС-2 и НИТИ, где

фиксируются концентрации радионуклидов, соответствующие фоновыми содержаниями.

2. Зона со средним уровнем загрязнения. Здесь не наблюдаются точечные источники, а перенос радионуклидов происходит из зоны с высоким уровнем загрязнения. Данная зона характеризуется повсеместным повышенным относительно фона содержанием ^3H и в отдельных скважинах ^{90}Sr . Средний уровень загрязнения наблюдается на территории от КПО ЛАЭС в сторону Копорской губы, захватывая площадку ЛАЭС.
3. Зона с высоким уровнем загрязнения. К ней относятся территории филиала ФГУП «РосРАО» и частично КПО ЛАЭС, где находятся основные источники поступления радионуклидов в подземные воды рассматриваемого района. Здесь отмечаются превышения УВ по ряду показателей, главным образом по содержанию ^3H .

Заключение

Проведена оценка воздействия объектов Северо-западного атомно-промышленного комплекса на загрязнение подземных вод. Проведенные исследования показали, что радиоактивность подземных вод рассматриваемого района определяется содержанием техногенных радионуклидов (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^3H).

Относительно высокий уровень загрязнения вод регистрируется в «грязной» зоне ФГУП «РосРАО». На смежной территории (от КПО ЛАЭС в сторону Копорской губы, захватывая площадку ЛАЭС) отмечается средний уровень загрязнения. На площадках размещения ЛАЭС-2 и НИТИ содержание техногенных радионуклидов в подземных водах соответствует фоновым значениям.

В связи с нестабильной гидродинамической обстановкой на рассматриваемой территории, вызванной строительством новых очередей ЛАЭС-2, и наличием действующих источников поступления радионуклидов в подземные воды результаты настоящей работы могут быть применены при проведении гидрогеологических наблюдений, включая гидродинамические и гидрохимические, с отбором проб на определение содержания техногенных радионуклидов. Также представленные результаты могут быть учтены при модернизации и расширении действующей сети мониторинга на объектах СЗАПК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thirnova L., Trojek T. Data analysis from monitoring of radionuclides in the nuclear power plant Temelin ecosystem area // Applied Radiation and Isotopes. – 2009. – V. 67 (7–8). – P. 1503–1508.
2. Артамонова С.Ю. Техногенные радионуклиды в природных водах районов мирных подземных ядерных взрывов «Кратон-3» и «Кратон-4» // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геоэкология. – 2013. – № 5. – С. 417–428.
3. Advanced atmospheric ^{14}C monitoring around the Paks Nuclear Power Plant, Hungary / T. Varga, G. Orsovszki, I. Major, M. Veres, T. Bujtás, G. Végh, L. Manga, A.J.T. Jull, L. Palcsu, M. Molnár // Journal of Environmental Radioactivity. – 2020. – V. 213. – P. 1–11.
4. Мониторинг загрязненности тяжелыми металлами почвенного покрова и растений (на примере *potentilla tanacetifolia* Willd. *Ex schlecht.*) природных экосистем в условиях урбанизированной территории г. Читы / Г.Ю. Самойленко, Е.А. Бондаревич, Н.Н. Коцюржинская, И.А. Борискин // Самарский научный вестник. – 2018. – Т. 7. – № 1 (22). – С. 110–115.
5. Огородников Б.И. Техногенные радиоактивные аэрозоли – продукты аварии Чернобыльской АЭС // Безопасность труда в промышленности. – 2011. – № 4. – С. 42–48.
6. Tondel M., Granath G., Wålander R. ^{137}Cs activity in Sweden after the Chernobyl Nuclear Power Plant accident in relation to quaternary geology and land use // Applied Geochemistry. – 2017. – V. 87. – P. 38–43.
7. Spatial variability in the distribution of trace metals in groundwater around the Rooppur nuclear power plant in Ishwardi, Bangladesh / Md. G. Uddin, Md. Moniruzzaman, M.A. Quader, Md. Abu // Groundwater for Sustainable Development. – 2018. – V. 7. – P. 220–231.
8. Пашкевич М.А., Мовчан И.Б., Петрова Т.А. Мониторинг техногенного воздействия экологически опасных объектов ОАО «Газпром» // Записки Горного Института. – 2007. – Т. 172. – С. 201–204.

9. Пашкевич М.А., Смирнов Ю.Д., Петрова Т.А. Система экологического мониторинга атмосферного воздуха горно-промышленной агломерации // Записки Горного Института. – 2013. – Т. 204. – С. 272–275.
10. Пашкевич М.А., Петрова Т.А. Создание системы производственного экологического мониторинга на предприятиях по добыче и транспортировке углеводородов Западной Сибири // Записки Горного института. – 2016. – Т. 221. – С. 737–741.
11. Pashkevich M.A., Petrova T.A. Development of an operational environmental monitoring system for hazardous industrial facilities of Gazprom Dobycha Urengoy // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – № 1384. – P. 1–7.
12. Пашкевич М.А., Петрова Т.А. Оценка площадного загрязнения атмосферного воздуха в мегаполисе с использованием геоинформационных систем // Записки Горного института. – 2017. – Т. 228. – С. 738–742.
13. Пашкевич М.А., Алексеенко А.В., Петрова Т.А. Оценка и контроль эколого-экономического риска в Новороссийской промышленной агломерации // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2018. – № 1. – С. 23–35.
14. Трансграничный аспект оценки воздействия строящихся АЭС на водные экосистемы (на примере Балтийской АЭС) / Е.М. Каплан, А.А. Шварц, Е.В. Лунова, М.Е. Макушенко // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геоэкология. – 2015. – № 4. – С. 291–303.
15. Analysis of the influence of nuclear facilities on environmental radiation by monitoring the highest nuclear power plant density region / UkJae Lee, Chanki Lee, Minji Kim, Hee Reyoung Kim // Nuclear Engineering and Technology. – 2019. – V. 51 (6). – P. 1626–1632.
16. Hyung-Woo Seo, Jae Yong Oh, Weon Gyu Shin Proposal for the list of potential radionuclides of interest during NPP site characterization or final status surveys // Nuclear Engineering and Technology. – 2021. – V. 53 (1). – P. 234–243.
17. Russell B.C., Croudace I.W., Warwick Ph.E. Determination of ¹³⁵Cs and ¹³⁷Cs in environmental samples: a review // Analytica Chimica Acta. – 2015. – V. 890. – P. 7–20.
18. Testoni R., Levizzari R., De Salve M. Transport dynamic of strontium in groundwater: safety assessment study // Progress in Nuclear Energy. – 2020. – V. 119. – P. 1–7.
19. Testoni R., Levizzari R., De Salve M. Radionuclide transport in shallow groundwater, progress in nuclear energy // Progress in Nuclear Energy. – 2015. – V. 85. – P. 277–290.
20. Optimizing the spatial pattern of networks for monitoring radioactive releases / S.J. Melles, G.B.M. Heuvelink, C.J.W. Twenhöfel, A. van Dijk, P.H. Niemstra, O. Baume, U. Stöhlker // Computers & Geosciences. – 2011. – V. 37 (3). – P. 280–288.
21. Глаголенко Ю.В., Дрожко Е.Г., Ровный С.И. Основные направления деятельности ФГУП «ПО «Маяк» по решению экологических проблем, связанных с прошлой и текущей деятельностью ФГУП «ПО «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. – 2006. – № 1 (41). – С. 23–24.
22. Андреев С.С., Попова И.Я., Пряхин Е.А. Радиоактивное загрязнение некоторых водоёмов - хранилищ жидких радиоактивных отходов ПО «Маяк» // Вестник Челябинского государственного университета – 2013. – № 7 (298). – С. 85–87.
23. Современные уровни радиоактивного загрязнения объектов окружающей среды вурс и других территорий в зоне влияния ПО «Маяк» / Н.Н. Казачёнок, В.А. Костюченко, И.Я. Попова, Л.М. Перемылова, Г.В. Поляничкова, Ю.П. Тихова, К.Г. Коновалов, А.И. Копелов, В.С. Мельников // Вестник Челябинского государственного университета. – 2014. – № 1 (73). – С. 33–48.
24. Кудельский А.В., Смит Дж.Т., Пашкевич В.И. Постчернобыльская гидросфера Беларуси в районах радиоактивных выпадений (ретроспективный обзор) // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геоэкология. – 2012. – № 4. – С. 293–309.
25. 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. – V. 27 (7). – P. 1291–1296.
26. Groundwater age and mixing process for evaluation of radionuclide impact on water resources following the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident / K. Sakakibara, S. Iwagami, M. Tsujimura, Y. Abe, M. Hada, I. Pun, Y. Onda // Journal of Contaminant Hydrology. – 2019. – V. 223. – P. 1–9.
27. On the divergences in assessment of environmental impacts from ionising radiation following the Fukushima accident / P. Strand, S. Sundell-Bergman, J.E. Brown, M. Dowdall // Journal of Environmental Radioactivity. – 2017. – V. 169–170. – P. 159–173.
28. Martin-Garin A., Meir V., Simonucci C., Kashparov V., Bugai D. Quantitative assessment of radionuclide migration from near-surface radioactive waste burial sites: the waste dumps in the Chernobyl exclusion zone as an example. Woodhead Publishing, 2012. – P. 570–600.
29. Gallardo A.H., Marui A. The aftermath of the Fukushima nuclear accident: Measures to contain groundwater contamination // Science of The Total Environment. – 2016. – V. 547. – P. 261–268.
30. Ho Song J. An assessment on the environmental contamination caused by the Fukushima accident // Journal of Environmental Management. – 2018. – V. 206. – P. 846–852.
31. Комплексный радиационно-экологический мониторинг в районе расположения радиационно опасных объектов как составная часть единой системы государственного экологического мониторинга / Н.И. Санжарова, А.В. Панов, В.К. Кузнецов, Н.Н. Исамов, Е.И. Карпенко, Е.В. Гордненко, Р.А. Микаилова // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2019. – № 1. – С. 131–142.
32. Бетенков Н.Д. Радиоэкологический мониторинг. – Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та, 2014. – 208 с.
33. Design and development of a comprehensive program for the assessment and analysis of environmental effects due to the release of radioactive materials from the stack of nuclear installations: a case study in Bushehr nuclear power plant / N. Delgarm, K. Sepanloo, A.H. Shad, D. Masti // Applied Radiation and Isotopes. – 2020. – V. 166. – P. 1291–1296.
34. Development of emergency response tools for accidental radiological contamination of French coastal areas / C. Duffa, P.B. du Bois, M. Caillaud, S. Charmasson, C. Couvez, D. Didier, F. Dumas, B. Fievet, M. Morillon, P. Renaud, H. Thébault // Journal of Environmental Radioactivity. – 2016. – V. 151 (2). – P. 487–494.
35. Ho Min J., Dae-Woong Kim, Chi-Yong Park Demonstration of the validity of the early warning in online monitoring system for nuclear power plants // Nuclear Engineering and Design. – 2019. – V. 349. – P. 56–62.
36. Оценка влияния атомно-промышленного комплекса на подземные воды и смежные природные объекты (г. Сосновый Бор Ленинградской области) / В.Г. Румынин, Е.Б. Панкина, М.Ф. Якушев, А.В. Боронина, Е.Л. Кузнецова, Т.А. Кукушкина, И.Л. Хархордин, А.А. Потапов, И.В. Токарев, П.К. Коновасовский, В.Ю. Абрамов, В.Н. Епимахов, С.А. Переверзева, К.С. Харьковский. – СПб.: Изд-во СПбУ, 2002. – 249 с.
37. 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. – 2016. – V. 162–163. – P. 205–218.
38. 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.
39. Дашко Р.Э., Коробко А.А. Генетические особенности формирования и изменения физико-химических свойств нижнекембрийских глин в разрезе Санкт-Петербургского региона // Сергеевские чтения. – М.: Российский университет дружбы народов (РУДН), 2014. – С. 23–29.
40. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга / Р.Э. Дашко, О.Ю. Александрова, П.В. Котюков, А.В. Шидловская // Развитие городов и геотехническое строительство. – 2011. – № 1. – С. 1–34.
41. Geomechanics of low-subsidence construction during the development of underground space in large cities and megalopolises / A.G. Protosenya, M.O. Lebedev, M.A. Karasev, N.A. Belyakov // Journal of Mechanical and Production

- Engineering Research and Development. – 2019. – V. 9. – № 5. – P. 1005–1014.
42. Кирюхин В.А., Толстихин Н.И. Региональная гидрогеология. – М.: Изд-во «Недра», 1987. – 382 с.
43. Оценка и прогнозирование радиационно-экологического воздействия хранилищ радиоактивных отходов Ленинградского отделения филиала «Северо-западный территориальный округ» ФГУП «РосРАО» / И.И. Крышев, А.Ю. Пахомов, С.Н. Брыкин, В.Г. Булгаков, Т.Г. Сазыкина, И.А. Пахомова, И.С. Серебряков, Н.С. Рознова, А.И. Крышев, И.Я. Газиев, К.В. Лунева, М.А. Дмитриева // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2012. – № 3. – С. 44–52.
44. Прогноз воздействия АЭС на радиоактивность поверхностных и подземных вод / В.Г. Румынин, Л.Н. Синдаловский, А.А. Шварц, А.М. Никуленков, В.А. Ерзова, Д.В. Бутырин // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2020. – № 3. – С. 3–22.

Поступила 18.08.2021 г.

Информация об авторах

Ерзова В.А., аспирант кафедры гидрогеологии и инженерной геологии Санкт-Петербургского горного университета; младший научный сотрудник Санкт-Петербургского отделения института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН.

Румынин В.Г., член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, директор Санкт-Петербургского отделения института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН; профессор Санкт-Петербургского государственного университета Института наук о Земле.

Судариков С.М., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры гидрогеологии и инженерной геологии Санкт-Петербургского горного университета.

Шварц А.А., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Санкт-Петербургского отделения института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН; главный специалист Санкт-Петербургского государственного университета Института наук о Земле.

Владимиров К.В., младший научный сотрудник Санкт-Петербургского отделения института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН; аспирант Санкт-Петербургского государственного университета Института наук о Земле.

UDC 556.114.679

INFLUENCE OF NORTH-WEST NUCLEAR COMPLEX FACILITIES ON GROUNDWATER CONTAMINATION (LENINGRAD REGION)

Valentina A. Erzova^{1,2},
Erzova.spmu@yandex.ru

Vyacheslav G. Rumynin^{2,3},
rumynin@hgepro.ru

Sergei M. Sudarikov¹,
Sudarikov_SM@pers.spmi.ru

Alexei A. Shvarts^{2,3},
larshv@hgepro.ru

Konstantin V. Vladimirov^{2,3},
vladimirov@hgepro.ru

¹ Saint Petersburg Mining University,
2, 21st Line V.O., Saint Petersburg, 199121, Russia.

² St. Petersburg Division, Sergeev Institute of Environmental Geology Russian Academy of Sciences,
41, Sredniy avenue, Saint Petersburg, 199004, Russia.

³ St. Petersburg State University,
7-9, Universitetskaya embankment, Saint Petersburg, 199004, Russia.

Relevance of research. The organization of the environmental monitoring system, particularly, in groundwater, is becoming important because of developing the nuclear power production and the increase in the amounts of radioactive materials in nuclear complex facilities. Nuclear power plant facilities are sources of anthropogenic radionuclides in groundwater and produce aureole contamination. The study focuses on an area with several nuclear facilities that affect the environment and each other.

The aim of the research is to determine the content of anthropogenic radionuclides in the groundwater of the North-West Nuclear Complex in the Leningrad Region; to identify the major sources of radioactive contamination based on the data collected.

Objects and methods. Groundwater from the Quaternary and Lower-Cambrian horizons contaminated by anthropogenic radionuclides is being studied. The study was based on large volumes of data from engineering surveys conducted at the construction sites of the operating and planned Leningrad NPP, radioactive waste storage facilities, and other sites. Borehole drilling data, hydrogeological sampling data, and monitoring observations, including radiological data, were used.

Results. The article discusses the zoning of the North-West Nuclear Complex based on the impact of contamination sources on groundwater radiological conditions, controlled by unstable isotopes of ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, and ³H. In several areas of the North-West Nuclear Complex, the natural background radiological level in groundwater was exceeded. Maximum radionuclide activities (up to values above the action level) have been observed near the radioactive waste storage facility.

Key words:

Monitoring observations of groundwater, radioactive contamination, Leningrad Nuclear Power Plant, radioactive waste disposal, radioactive background.

REFERENCES

1. Thinova L., Trojek T. Data analysis from monitoring of radionuclides in the nuclear power plant Temelin ecosystem area. *Applied Radiation and Isotopes*, 2009, vol. 67 (7–8), pp. 1503–1508.
2. Artamonova S.Yu. Technogenic radionuclides in natural water in the areas of peaceful underground nuclear explosions «Craton-3» and «Craton-4». *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, 2013, no. 5, pp. 417–428. In Rus.
3. Varga T., Orsovski G., Major I., Veres M., Bujtás T., Végh G., Manga L., Timothy Jull A.J., Palcsu L., Molnár M. Advanced atmospheric ¹⁴C monitoring around the Paks Nuclear Power Plant, Hungary. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2020, vol. 213, pp. 1–11.
4. Samoilenko G.Yu., Bondarevich E.A., Kotsyurzhinskaya N.N., Boriskin I.A. Monitoring of heavy metal contamination of soil and plants (for example, *Potentilla Tanacetifolia* willd. Ex Schlecht) of natural ecosystems in Chita urban areas. *Samarskiy nauchny vestnik*, 2018, vol. 7, no. 1 (22), pp. 110–115. In Rus.
5. Ogorodnikov B.I. Tekhnogennye radioaktivnye aerizoli – produkty avarii Chernobylskoy AES [Technogenic radioactive aerosols – products of the Chernobyl accident]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*, 2011, no. 4, pp. 42–48.
6. Tondel M., Granath G., Wälinder 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.
7. Uddin Md.G., Moniruzzaman Md., Quader M.A., Abu Md. Hasan. Spatial variability in the distribution of trace metals in groundwater around the Rooppur nuclear power plant in Ishwardi, Bangladesh. *Groundwater for Sustainable Development*, 2018, vol. 7, pp. 220–231.
8. Pashkevich M.A., Movchan I.B., Petrova T.A. Monitoring tekhnogennogo vozdeystviya ekologicheskoi opasnykh obektov OAO «Gazprom» [Monitoring of technogenic impact of environmentally hazardous facilities of OAO Gazprom]. *Zapiski Gornogo Instituta*, 2007, vol. 172, pp. 201–204.
9. Pashkevich M.A., Smirnov Yu.D., Petrova T.A. System of ecological monitoring of atmospheric air of mining industrial

- agglomeration. *Zapiski Gornogo Instituta*, 2013, vol. 204, pp. 272–275. In Rus
10. Pashkevich M.A., Petrova T.A. Creation of a system for industrial environmental monitoring in hydrocarbon producing and transporting companies of western Siberia. *Zapiski Gornogo instituta*, 2016, vol. 221, pp. 737–741. In Rus.
 11. Pashkevich M.A., Petrova T.A. Development of an operational environmental monitoring system for hazardous industrial facilities of Gazprom Dobycha Urengoy. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, no. 1384, pp. 1–7.
 12. Pashkevich M.A., Petrova T.A. Assessment of widespread air pollution in the megacity using geographic information systems. *Zapiski Gornogo instituta*, 2017, vol. 228, pp. 738–742. In Rus.
 13. Pashkevich M.A., Alekseenko A.V., Petrova T.A. Assessment and control of environmental and economic risk in Novorossiysk industrial agglomeration. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2018, no. 1, pp. 23–35. In Rus.
 14. Kaplan E.M., Shvarts A.A., Luneva E.V., Makushenko M.E. Transboundary issues related to the assessment of nuclear power plant impact on aquatic ecosystem (with application to Baltic NPP, Russian Federation). *Geokologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, 2015, no. 4, pp. 291–303. In Rus.
 15. UkJae Lee, Chanki Lee, Minji Kim, Hee Reyoung Kim. Analysis of the influence of nuclear facilities on environmental radiation by monitoring the highest nuclear power plant density region. *Nuclear Engineering and Technology*, 2019, vol. 51 (6), pp. 1626–1632.
 16. Hyung-Woo Seo, Jae Yong Oh, Weon Gyu Shin. Proposal for the list of potential radionuclides of interest during NPP site characterization or final status surveys. *Nuclear Engineering and Technology*, 2021, vol. 53 (1), pp. 234–243.
 17. Russell B.C., Croudace I.W., Warwick Ph.E. Determination of ¹³⁵Cs and ¹³⁷Cs in environmental samples: a review. *Analytica Chimica Acta*, 2015, vol. 890, pp. 7–20.
 18. Testoni R., Levizzari R., De Salve M. Transport dynamic of strontium in groundwater: Safety Assessment study. *Progress in Nuclear Energy*, 2020, vol. 119, pp. 1–7.
 19. Testoni R., Levizzari R., De Salve M. Radionuclide transport in shallow groundwater, Progress in Nuclear Energy. *Progress in Nuclear Energy*, 2015, vol. 85, pp. 277–290.
 20. Melles S.J., Heuvelink G.B.M., Twenhöfel C.J.W., Van Dijk A., Hiemstra P.H., Baume O., Stöhlker U. Optimizing the spatial pattern of networks for monitoring radioactive releases. *Computers & Geosciences*, 2011, vol. 37 (3), pp. 280–288.
 21. Glagolenko Yu.V., Drozhko E.G., Rovny S.I. Main directions in solution of ecological problems resulted from the current activities and historical operation of Mayak PA. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti*, 2006, no. 1 (41), pp. 23–24. In Rus.
 22. Andreev S.S., Popova I.Ya., Pryakhin E.A. Radioaktivnoe zagryaznenie nekotorykh vodoyomov – khranilishch zhidkikh radioaktivnykh otkhodov PO «Mayak» [Radioactive contamination of some water bodies – storage facilities for liquid radioactive waste at the Mayak Production Association]. *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, no. 7 (298), pp. 85–87.
 23. Kazachyonok N.N., Kostyuchenko V.A., Popova I.Ya., Peremyslova L.M., Polyanchikova G.V., Tikhova Yu.P., Kononov K.G., Kopelov A.I., Melnikov V.S. Current status of the radioactive contamination of the eurt and other territories in the Mayak effect zone. *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2014, no. 1 (73), pp. 33–48. In Rus.
 24. Kudelskiy A.V., Smit Dzh.T., Pashkevich V.I. Post-Chernobyl hydrosphere of Belarus within the radioactively contaminated territories (retrospective review). *Geokologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, 2012, no. 4, pp. 293–309. In Rus.
 25. 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.
 26. Sakakibara K., Iwagami S., Tsujimura M., Abe Y., Hada M., Pun I., Onda Y. Groundwater age and mixing process for evaluation of radionuclide impact on water resources following the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2019, vol. 223, pp. 1–9.
 27. Strand P., Sundell-Bergman S., Brown J.E., Dowdall M. On the divergences in assessment of environmental impacts from ionising radiation following the Fukushima accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017, vol. 169–170, pp. 159–173.
 28. Martin-Garin A., Meir V., Simonucci C., Kashparov V., Bugai D. *Quantitative assessment of radionuclide migration from near-surface radioactive waste burial sites: the waste dumps in the Chernobyl exclusion zone as an example*. Woodhead Publishing, 2012, pp. 570–600.
 29. 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.
 30. Ho Song J. An assessment on the environmental contamination caused by the Fukushima accident. *Journal of Environmental Management*, 2018, vol. 206, pp. 846–852.
 31. Sanzharova N.I., Panov A.V., Kuznetsov V.K., Isamov N.N., Karpenko E.I., Gordienko E.V., Mikailova R.A. Complex radioecological monitoring in the vicinity of radiation hazardous facilities as an integral part of the unified system of state environmental monitoring. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika*, 2019, no. 1, pp. 131–142. In Rus.
 32. Betenkov N.D. *Radioekologicheskiy monitoring* [Radioecological monitoring]. Ekaterinburg, Ural University Publ., 2014. 208 p.
 33. Delgarm N., Sepanloo K., Shad A.H., Masti D. Design and development of a comprehensive program for the assessment and analysis of environmental effects due to the release of radioactive materials from the stack of nuclear installations: a case study in Bushehr nuclear power plant. *Applied Radiation and Isotopes*, 2020, vol. 166, pp. 1291–1296.
 34. Duffa C., Du Bois P.B., Caillaud M., Charmasson S., Couvez C., Didier D., Dumas F., Fievet B., Morillon M., Renaud P., Thébault H. Development of emergency response tools for accidental radiological contamination of French coastal areas. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2016, vol. 151 (2), pp. 487–494.
 35. Ho Min J., Dae-Woong Kim, Chi-Yong Park. Demonstration of the validity of the early warning in online monitoring system for nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Design*, 2019, vol. 349, pp. 56–62.
 36. 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 Y.Yu., Epimakhov V.N., Pereverzeva S.A., Kharkovsky K.S. *Otsenka vliyaniya atomno-promyshlennogo kompleksa na podzemnye vody i smezhnye prirodnye obekty (g. Sosnovy Bor Leningradskoy oblasti)* [Assessment of the impact of the nuclear-industrial complex on groundwater and adjacent natural objects (Sosnovy Bor, Leningrad Region)]. St-Peterburg, SPbU Publ., 2002. 249 p.
 37. 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*, 2016, vol. 162–163, pp. 205–218.
 38. Dashko R.E., Korobko A. A. Engineering-geological substantiation of safety building and operation constructions of different function within the lowland predglintovaya (the western part of the Leningrad region). *Zapiski Gornogo Instituta*, 2016, vol. 206, pp. 22–25. In Rus.
 39. Dashko R.E., Korobko A.A. Geneticheskie osobennosti formirovaniya i izmeneniya fiziko-khimicheskikh svoystv nizhnemebriyskikh glin v razreze Sankt-Peterburgskogo regiona [Genetic features of the formation and changes in the physical and mechanical properties of the Lower Cambrian clays in the section of the St. Petersburg region]. *Sergeevskie chteniya* [Sergeev Readings]. Moscow, RUDN University Publ., 2014. pp 23–29.
 40. Dashko R.E., Aleksandrova O.Yu., Kotyukov P.V., Shidlovskaya A.V. Osobennosti inzhenerno-geologicheskikh usloviy Sankt-Peterburga [Features of engineering-geological conditions Saint Petersburg]. *Razvitie gorodov i geotekhnicheskoe stroitelstvo*, 2011, no. 1, pp. 1–34.
 41. 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.

42. Kiryuhin V.A., Tolstihin N.I. *Regionalnaya gidrogeologiya* [Regional hydrogeology]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 382 p.
43. Kryshev I.I., Pakhomov A.Yu., Brykin S.N., Bulgakov V.G., Sazykina T.G., Pakhomova I.A., Serebryakov I.S., Roznova N.S., Kryshev A.I., Gaziev I.Ya., Luneva K.V., Dmitrieva M.A. Assessment and prognosis of radioecological impact of the radioactive wastes storage sites of the «north-west territorial district» Leningrad branch of FGUP «Rosrao». *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika*, 2012, no. 3, pp. 44–52. In Rus.
44. Rumynin V.G., Sindalovskiy L.N., Shvarts A.A., Nikulenkov A.M., Erzova V.A., Butyrin D.V. Forecast of NPP impact on radioactivity of surface and groundwater. *Geokologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*, 2020, no. 3, pp. 3–22. In Rus.

Received: 18 August 2021.

Information about the authors

Valentina A. Erzova, postgraduate student, Saint Petersburg Mining University; junior researcher, St. Petersburg Division, Sergeev Institute of Environmental Geology Russian Academy of Sciences.

Vyacheslav G. Rumynin, corresponding members of the RAS, Dr. Sc., director, St. Petersburg Division, Sergeev Institute of Environmental Geology Russian Academy of Sciences; professor, St. Petersburg State University, Institute for Earth Sciences.

Sergei M. Sudarikov, Dr. Sc., professor, Saint Petersburg Mining University.

Alexei A. Shvarts, Cand. Sc., senior research, St. Petersburg Division, Sergeev Institute of Environmental Geology Russian Academy of Sciences; chief specialist, St. Petersburg State University, Institute for Earth Sciences.

Konstantin V. Vladimirov, junior researcher, St. Petersburg Division, Sergeev Institute of Environmental Geology Russian Academy of Sciences; postgraduate student, St. Petersburg State University, Institute for Earth Sciences.