

Особенности формирования подземных вод основных эксплуатируемых водоносных горизонтов Санкт-Петербурга и окрестностей по данным о химическом и изотопном составе

Н. А. Виноград, И. В. Токарев, Т. А. Строганова

Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

Для цитирования: Виноград, Н. А., Токарев, И. В., Строганова, Т. А. (2019). Особенности формирования подземных вод основных эксплуатируемых водоносных горизонтов Санкт-Петербурга и окрестностей по данным о химическом и изотопном составе. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 64 (4), 575–597.
<https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.405>

Основные горизонты, эксплуатируемые для водоснабжения в Санкт-Петербурге и Ленинградской области, содержат воды, минерализация и компонентный состав которых значительно меняются по мере удаления от современных областей питания, а также в зависимости от состава вмещающих пород. Опробованы воды четвертичных, девонских, ордовикского и кембро-ордовикского горизонтов, а также вендского водоносного комплекса. При малой минерализации обычно отмечается гидрокарбонатный кальциево-магниевый состав воды, при ее увеличении свыше 400–600 мг/дм³ в анионном составе начинают преобладать хлориды, а в катионном — натрий. В некоторых случаях маломинерализованные воды содержат существенные количества железа, что позволяет отнести их к минеральным. Региональной особенностью является локальное превышение активностей природных радионуклидов над уровнями вмешательства, иногда существенное. Для идентификации условий формирования использованы данные по изотопному составу (содержаниям дейтерия и кислорода-18) подземных вод. Наибольшее разнообразие изотопных составов демонстрируют воды вендского комплекса. На Карельском перешейке комплекс содержит современные воды (на что дополнительно указывает тритий). При движении к югу в направлении увеличения минерализации изотопный состав воды в вендском комплексе облегчается вплоть до появления вод с явными признаками криогенной метаморфизации. Легкие изотопные составы объясняются формированием подземных вод в холодный климатический период, который закончился на данной территории не менее 12 тыс. лет назад. Изменения изотопного состава и химизма вод вендского комплекса синхронны увеличению их возраста при удалении от области питания, откуда следует, что в естественных условиях отсутствует площадное питание комплекса вне области его выхода на дневную поверхность или под чехол проницаемых четвертичных отложений. В плане управления водопользованием это означает, что его эксплуатационные ресурсы в зоне, где минерализация превышает 0,7–1,0 г/дм³, должны рассчитываться, только исходя из возможного бокового притока.

Ключевые слова: водоносный горизонт, формирование состава подземных вод, химический и изотопный состав.

1. Введение

В Санкт-Петербурге и пригородах несколько водоносных горизонтов эксплуатируется как в питьевых, так и в технических целях. Основной — вендский нижнекотлинский водоносный комплекс — содержит воды высшего питьевого качества на большей части Карельского перешейка, а в черте Санкт-Петербурга уже обладает повышенной минерализацией, погружаясь на глубину около 200 м. Для питьевого водоснабжения используются также четвертичный (межморенный), ордовикский, кембро-ордовикский и кембрийский (ломоносовский) водоносные комплексы. На севере Карельского перешейка эксплуатируется водоносная выветрелая зона кристаллического фундамента. Примерно в 50 км к югу от Санкт-Петербурга получает распространение водоносный комплекс среднедевонских отложений. В северной части площадей своего распространения названные формации выходят на поверхность и/или перекрываются маломощным чехлом позднечетвертичных отложений. Соответственно, на этих площадях в них содержатся грунтовые воды. На юг и юго-восток, вслед за погружением фундамента и возрастанием мощности осадочного чехла, комплексы перекрываются более молодыми отложениями, воды в них становятся напорными, а их минерализация повышается.

Разнообразие химических типов подземных вод в окрестностях Санкт-Петербурга обусловлено: а) довольно сложным строением четвертичного покрова территории, связанным с развитием речных палеодолин; б) различиями в составе водовмещающих пород; в) географо-климатической историей развития территории.

Пресные воды рассматриваемой территории имеют в основном инфильтрационный генезис. Работы в Прибалтийском артезианском бассейне выявили существенное различие в возрасте (времени формирования) пресных вод. Часть запасов пресных подземных вод следует уверенно отнести ко времени существования Валдайского ледника и/или Балтийского ледникового озера (Воронюк и др., 2016; Babre et al., 2016; Kalm, 2013; Rosentau et al., 2009; Sterckx et al., 2018).

В связи с этим целесообразным является рассмотрение возраста подземных вод Ленинградского артезианского бассейна, так как существенный (свыше нескольких тысяч лет) возраст воды означает отсутствие современного питания и, следовательно, восполняемых ресурсов. В данной работе использованы изотопные (в основном дейтерий, кислород-18) и гидрохимические данные, которые позволяют сделать предварительные выводы о скоростях водообмена и времени инфильтрации в отдельных геологических подразделениях рассматриваемой территории.

2. Материал и методы исследований

Для анализа гидрогеологических условий территории использованы данные о химическом составе подземных вод за 1997–2017 гг., собранные на кафедре гидрогеологии Санкт-Петербургского государственного университета. База данных включает результаты опробования и лабораторного химического анализа воды, выполненного сотрудниками кафедры гидрогеологии в гидрохимической испытательной лаборатории СПбГУ, аттестованной в системе аккредитации аналитических лабораторий на техническую компетентность и независимость, а также дан-

ные, полученные из фондовых материалов (прошедшие экспертизу отчеты о геологоразведочных работах с приложенными аттестатами аккредитации лабораторий). Для статистической обработки данные были систематизированы по водоносным горизонтам, исключены ошибочные и повторяющиеся записи.

Анализ изотопного состава воды выполнялся в Ресурсном центре «Рентгенодифракционные методы исследования» Научного парка СПбГУ на лазерном анализаторе Picarro L-2120i. Используются стандарты V-SMOW2, GISP и SLAP2 (IAEA, 2007a; 2007b), USGS-45 и USGS-46 (USGS, 2014a; 2014b). Ошибка измерений определялась для каждой серии образцов отдельно и составляла $\pm(0,1-0,12)\text{‰}$ для $\delta^{18}\text{O}$ и $\pm(1-1,5)\text{‰}$ для $\delta^2\text{H}$. Результаты приведены в промилле относительно стандарта средней океанической воды (Standard of Mean Ocean Water — SMOW).

3. Гидрогеологические условия

Гидрогеологическое районирование Ленинградской области определено ее сложным геологическим строением, которое обусловлено расположением в зоне сочленения Балтийского щита, сложенного дислоцированными и метаморфизованными докембрийскими отложениями, и Русского артезианского супербассейна, образованного более молодыми осадочными породами.

В кровле гидрогеологического разреза находится область распространения пресных вод, нижняя граница которых приурочена к глубине 100–200 м, увеличиваясь до 300 м и более на участках развития хорошо проницаемых пород (юго-западная часть области) и сокращаясь до 0–50 м на Предглинтовой и Приневской низменностях. С увеличением глубины залегания водовмещающих пород минерализация подземных вод возрастает, пресные воды сменяются солоноватыми, солеными водами и рассолами. Гидрогеологическая схема территории с линией разреза представлена на рис. 1, гидрогеологический разрез — на рис. 2.

Четвертичный водоносный комплекс (Q) литологически изменчив, не выдержан в плане и разрезе, приурочен к озо-камовым массивам, флювиогляциальным полям, погребенным речным долинам и межморенным водоносным горизонтам. Мощность комплекса меняется от единиц до 80 м, водообильность неравномерная. В пределах Санкт-Петербурга выделено два межморенных водоносных горизонта (ММВГ), верхний и нижний. Межморен-

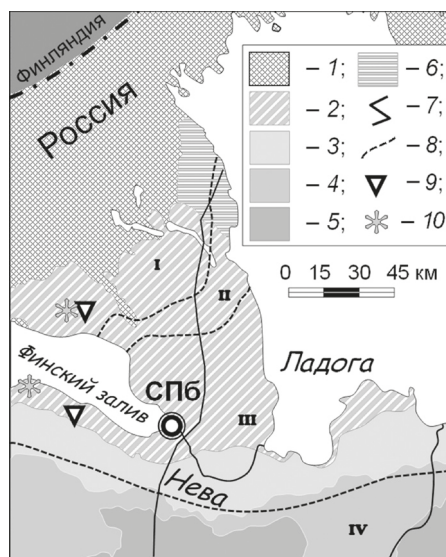


Рис. 1. Геолого-гидрогеологическая схема исследуемого района по (Шебеста, 2012):

1 — AR-PR кристаллические породы; 2–5 — V, E, O и D комплексы соответственно; 6 — PR отложения Ладожского грабена; 7 — линия разреза; 8 — границы гидрохимических зон вендского водоносного комплекса с минерализацией, г/дм³, по (Воронов, Виноград, 2006): I — до 0,25; II — от 0,25 до 1; III — от 1 до 10; IV — от 10 до 35; 9 — точки наблюдения за атмосферными осадками; 10 — точки снеговых съемок

ный комплекс распространен локально, в основном в северной и северо-западной частях города (Калининский, Красногвардейский, Приморский и Курортный районы). В Курортном (Солнечное — Репино — Комарово — Зеленогорск) и Приморском (Ольгино, Лахта) районах подземные воды межморенного комплекса используются для хозяйственно-питьевого водоснабжения (ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»). Московско-валдайский ММВГ (верхний) залегает под отложениями лужской морены и подстилается московской. Днепровско-московский ММВГ (нижний) перекрывается московской мореной, а подстилается днепровской мореной.

По анионному составу воды четвертичного комплекса — гидрокарбонатные с минерализацией 0,2–0,3 г/дм³, по катионному составу — смешанные. В большинстве случаев содержание железа превышает норму, содержание фтора в несколько раз ниже нормы.

Арукюласко-швентойский (D_{2ar} — $D_3šv$) водоносный комплекс распространен в юго-западной части Ленинградской области. Перекрывается в основном четвертичными отложениями мощностью 5–60 м и только ближе к границе Ленинградской области погружается под верхнедевонские отложения. Подстилается наровским относительно водоупорным горизонтом (D_{2nr}). Водовмещающие породы — красноцветные пески и песчаники, переслаивающиеся глинами и алевролитами. Мощность комплекса увеличивается в юго-восточном направлении и составляет 15–140 м.

Наровский относительно водоупорный (слабоводоносный) горизонт (D_{2nr}) находится на юго-западе Ленинградской области. Залегает в основном под арукюласко-швентойским водоносным комплексом, частично — под четвертичными отложениями. Сложен горизонт слаботрещиноватым мергелем, доломитом и известняком, глиной, встречаются прослойки песков и песчаников. Мощность горизонта 20–55 м. На большей части территории наровский горизонт является относительным водоупором и разделяет ниже- и вышележащие водоносные комплексы. В той части, где он выходит под четвертичные отложения, горизонт может квалифицироваться как слабоводоносный, так как содержит подземные воды в незначительных количествах.

Ордовикский водоносный комплекс (O_{1-3}) сформирован к югу от Балтийско-Ладожского уступа (глинта). Водовмещающие породы — трещиноватые и закарстованные известняки и доломиты. Мощность комплекса увеличивается в восточном направлении от 5 до 130 м.

По мере погружения водоносного комплекса под девонские отложения трещиноватость карбонатных пород уменьшается. На юге территории она сохранилась лишь в верхней части толщи мощностью до 22 м. Ниже породы ордовика монолитны и могут считаться водоупорными. Воды комплекса безнапорные и слабонапорные. Глубина залегания уровня 1–30 м, максимальная — на водоразделах.

Воды ордовикского водоносного комплекса по химическому составу гидрокарбонатные магниевые-кальциевые, кальциевые-магниевые. Вдоль границы распространения минерализованных вод состав их меняется на гидрокарбонатно-хлоридный со смешанным катионным составом, на юго-восточной и восточной окраинах Волховского плато изменяется на гидрокарбонатно-сульфатный. Воды жесткие. Минерализация увеличивается в юго-восточном направлении от 0,2 до 0,8 г/дм³.

Кембро-ордовикский водоносный комплекс (Є-О) лежит к юго-востоку от Балтийско-Ладожского уступа (глинта). В пределах узкой полосы вдоль глинта он залегает под четвертичными отложениями на глубине 1–10 м, на остальной территории перекрыт отложениями ордовика, где глубина его залегания увеличивается в юго-восточном направлении от 10 до 400 м. Подстиляется водоносный комплекс глинами лонтоваского водоупорного горизонта. Водовмещающие породы — песок и слабосцементированный песчаник с маломощными прослоями глин и алевролитов. Мощность увеличивается в юго-восточном направлении и составляет 2–60 м.

Воды комплекса напорные и высоконапорные. Безнапорные и слабонапорные воды встречаются лишь в узкой приглинтовой полосе. Величина напора изменяется от первых метров до 340 м (у южной границы Ленинградской области). Уровни устанавливаются на глубинах 0,7–26 м.

Кембро-ордовикский водоносный комплекс содержит гидрокарбонатные кальциевые воды с минерализацией 0,2–0,5 г/дм³. Отмечено несколько повышенное содержание брома, бария и марганца.

Ломоносовский (лонтоваский) водоносный горизонт (V₂-Є₁In) распространен к югу от Финского залива и Ладожского озера. В большей части своего развития содержит солоноватые и соленые воды. Только в западной части Ленинградской области содержит пресные воды. Залегает между двумя водоупорными толщами — лонтоваскими (в кровле) и верхнекотлинскими (в подошве) глинами. Водовмещающие породы — мелко- и среднезернистые песчаники, переслаивающиеся с тонкими прослоями алевролитов и глин общей мощностью 5–60 м, которая увеличивается в восточном и южных направлениях. Водоносный горизонт напорный. Величина напора растет с севера на юг и юго-восток от 5 до 300 м.

В области развития пресных вод в ломоносовском горизонте их состав в основном хлоридно-гидрокарбонатный натриевый с минерализацией 0,5–0,7 г/дм³.

Верхнекотлинский водоупорный горизонт (Vkt₂) развит практически на всей территории Ленинградской области за исключением Выборгского и Приозерского районов. Представлен плотными глинами мощностью 50–130 м. Отделяет водоносный горизонт от вендского водоносного комплекса.

Вендский нижнекотлинский водоносный комплекс (Vkt₁) залегает повсеместно и содержит в основном минеральные воды. Зона пресных вод приурочена к центральной части Карельского перешейка и территории, расположенной севернее г. Лодейное Поле (Ладожско-Онежский перешеек). Вендский водоносный комплекс в пределах Ладожско-Онежского перешейка представлен отложениями котлинского горизонта. Сверху и снизу изолирован водоупорными глинами котлинского же горизонта. Глубина залегания водоносного комплекса увеличивается в юго-восточном направлении от 27 до 212 м. Водовмещающие породы — пески и песчаники с прослоями глин и алевролитов общей мощностью 7–57 м. На Карельском перешейке вендские песчаники залегают на кристаллическом фундаменте и лишь на северо-западе выходят на поверхность, а затем погружаются под верхнекотлинские глины.

Водоносный комплекс напорный, величина напора увеличивается с севера на юг от 30 до 174 м. Водовмещающие породы — песчаники, пески и гравелиты.

Воды вендского водоносного комплекса в пределах Онего-Ладожского перешейка гидрокарбонатные натриевые, кальциево-магниевые. Минерализация вод

изменяется от 0,2 до 0,6 г/дм³. В пределах Карельского перешейка воды комплекса имеют гидрокарбонатный натриево-кальциевый состав с минерализацией 0,1–0,4 г/дм³. По мере приближения к границе минерализованных вод их состав меняется на гидрокарбонатно-хлоридный натриевый с минерализацией 0,5–0,8 г/дм³.

4. Результаты исследований

4.1. Химический состав подземных вод

4.1.1. Четвертичные водоносные комплексы

Верхний межморенный водоносный горизонт используется в черте Санкт-Петербурга и окрестностях для хозяйственно-питьевого водоснабжения и бутылирования минеральных вод. Для хозяйственно-питьевых нужд горизонт ограниченно используется в Приморском районе Санкт-Петербурга и в населенных пунктах к северу от мегаполиса (Песочное, Левашово, Лахта). Кроме того, верхний межморенный водоносный горизонт рассматривается как резервный для Санкт-Петербурга в случае выведения из строя городского водопровода из р. Невы (Экологический портал Санкт-Петербурга, 2019). Вследствие ограниченного распространения в пределах Карельского перешейка горизонт используется в основном для индивидуального водоснабжения, однако может рассматриваться как источник восполнения запасов нижнего межморенного горизонта, который образует несколько месторождений питьевых подземных вод.

Питание верхнего межморенного водоносного горизонта инфильтрационное, осуществляется в основном через гидрогеологические окна в перекрывающих суглинках и супесях лужской морены.

По преобладающим компонентам (табл. 1) воды гидрокарбонатные, хлоридно-гидрокарбонатные натриевые, кальциево-натриевые, по минерализации — пресные (в среднем около 0,3 г/дм³). Горизонт характеризуется довольно высоким содержанием железа (медиана — 0,44 мг/дм³ при ПДК 0,3 мг/дм³). Данные по среднему химическому составу вод всех водоносных горизонтов территории представлены на диаграмме Пайпера (рис. 3). Для верхнего межморенного водоносного горизонта его можно охарактеризовать следующей формулой Курлова — псевдодробью, которой принято обозначать химический состав вод:

$$M_{0,3} \frac{\text{HCO}_3 67 \text{Cl } 27}{\text{Na } 56 \text{Ca } 27} \text{pH } 7,5.$$

В ее числителе здесь и далее в порядке убывания располагается содержание, экв. %, главных анионов, а в знаменателе — главных катионов. Нижний индекс под буквой М — общая минерализация воды, г/дм³. Справа от дроби — водородный показатель рН.

Для примера приведем также химический состав подземных вод горизонта на участке «Молодежное», где он характеризуется высокой водообильностью и используется для хозяйственно-питьевого водоснабжения:

$$M_{0,22} \frac{\text{HCO}_3 59 \text{Cl } 21 \text{SO}_4 20}{\text{Na } 53 \text{Ca } 29 \text{Mg } 18} \text{pH } 8,31.$$

Таблица 1. Статистическая характеристика химического состава основных водоносных горизонтов Санкт-Петербурга и окрестностей*

Водоносный горизонт	Число точек опробования	Статистические характеристики	pH	M _{общ.} , мг/дм ³	Содержание, мг/дм ³						
					(Na+K) ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Fe _{общ.}
Верхний межморенный	21	Максимум	8,68	853,5	226,3	55,7	25,8	201,8	40,8	378,2	12,8
		Минимум	6,3	112,5	8,8	0	7,0	1,6	45,8	0,1	0,1
		Медиана	7,65	262,9	37,05	8,5	26,4	9,0	161,7	0,37	0,37
		Среднее	7,59	308,2	55,23	8,68	40,84	13,39	172	1,97	1,97
Нижний межморенный	13	Максимум	8,1	421,4	109	18,0	13,8	75	29,6	273,3	6,2
		Минимум	6,8	75,18	4,3	2,3	2,8	0,1	48,8	0,09	0,09
		Медиана	7,6	232,9	64,8	4,9	21,3	5,6	140,3	0,39	0,39
		Среднее	7,63	248,9	54,23	6,24	29,27	6,84	143,9	1,76	1,76
Аруколаско-швенгойский	26	Максимум	8,4	738,7	339	109,4	47,67	52,8	107	558,2	11
		Минимум	6	233,0	1	22,8	0	1,4	0	170,8	0,01
		Медиана	7,68	487,6	31,5	60,4	24,1	13	7,82	329,4	1,3
		Среднее	7,47	491,4	45,32	59,39	24,8	15,52	12,48	344,2	2,35
Наровский	12	Максимум	7,9	703,6	52,4	84,0	45,6	42,5	195,2	524,6	2
		Минимум	6,5	272,6	1,0	0	13,5	4,9	1,6	0	0,03
		Медиана	7,1	469,4	8,85	54,4	33,8	8,2	17,85	328	0,3
		Среднее	7,22	463,5	15,63	56,4	32,82	14,6	30,52	314,3	0,6

Ордовикский	47	Максимум	8,39	735,6	90,0	138,2	64,2	58	95,4	488	8,9
		Минимум	6,9	274,1	0,2	12	9,6	2,27	2,0	195,2	0,01
		Медиана	7,75	513,0	30	52	33	16,3	19,35	363,6	0,275
Кембро-ордовикский	14	Среднее	7,7	516,1	32,78	52,21	32,45	31,3	24,72	346,4	0,97
		Максимум	8	995,2	210,4	140	49,6	268,6	253,2	555,1	3,8
		Минимум	6,93	456,8	11,7	9,4	6,51	9,67	0	176,9	0
Ломоносовский	29	Медиана	7,76	597,5	69,4	62,05	31,73	68,15	20,95	324,7	0,3
		Среднее	7,6	645,2	86,93	57,8	29,85	91,74	43,69	334,1	0,9
		Максимум	8,7	1421	515,8	67,2	34,1	550	92,8	530,7	1,2
Вендский (зона 1)	79	Минимум	7	361,0	1,8	4	2,13	4	1,23	164	0,01
		Медиана	8,1	694,6	200	18,8	5,59	71,05	9	359,9	0,2
		Среднее	8,05	742,8	208,6	19,92	8,12	147	15,52	351,2	0,32
Вендский (зона 2)	86	Максимум	8,6	914,4	1404,6	134,3	82,7	430,3	337,8	320,2	5,7
		Минимум	6,4	67,51	1,11	1,4	1,8	3,7	0,1	36,6	0,05
		Медиана	7,8	220,4	32,5	15,23	7,5	16,7	7,85	140	0,31
		Среднее	7,79	320,7	96,3	20,4	10,83	67,93	16,85	142,25	0,78
		Максимум	8,5	8368	2918	392,2	173,3	5076	69,12	719,8	5
		Минимум	5	1002	150	0,03	10,9	107,8	0,1	48,8	0,04
		Медиана	7,8	4064	1329	135,65	73,75	2362	11,5	152,6	0,60
		Среднее	7,71	3892	1270	135,87	72,67	2259	19,20	166,9	0,99

* Использованы результаты химического анализа подземных вод за 1997–2017 гг., имеющиеся на кафедре гидрогеологии СПбГУ. Пробы отобраны из разных водопунктов.

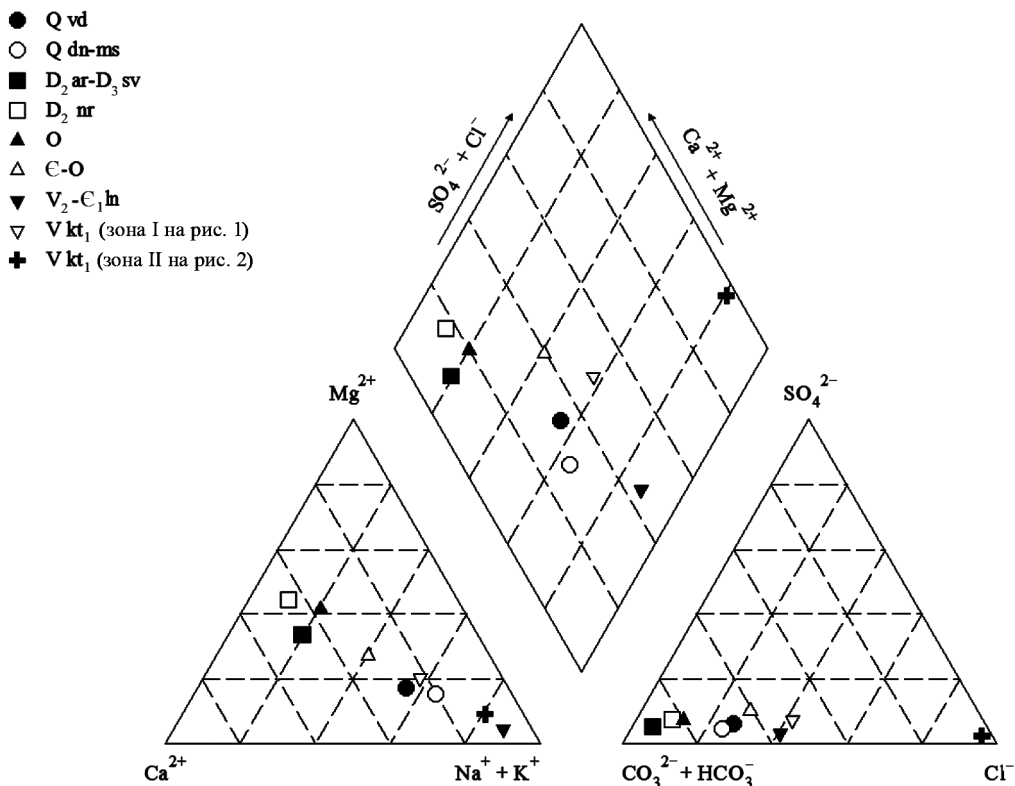


Рис. 3. Диаграммы Пайпера, отражающие химический состав подземных вод основных водоносных горизонтов

В черте города расположено месторождение железистых минеральных вод «Полюстрово», эксплуатирующее верхний межморенный горизонт. Минеральные воды «Полюстрово» характеризуются содержанием железа до 64 мг/дм³ и относятся к группе крепких железистых (Куликов и др., 1991). До 1950-х гг. содержание железа составляло около 30 мг/дм³. Активная застройка прилегающей территории и интенсивное водопонижение вызвало проникновение в полюстровский горизонт загрязненных грунтовых вод, содержащих в скважинах, пробуренных вблизи Полюстровского завода, 200–227 мг/дм³ хлоридов. Окислительные процессы в горизонте и микробиальная деятельность интенсифицировались. Вследствие этого возросло содержание CO₂ и растворенного органического вещества, удерживающих железо в воде. В результате резко возросло содержание железа, изменился макрокомпонентный состав подземных вод (за счет увеличения содержания сульфатов и хлоридов), а также выросла общая минерализация (Редкие типы..., 2013):

$$1932 \text{ г.: } M_{0,16} \frac{\text{HCO}_3 \ 56 \ \text{SO}_4 \ 30}{\text{Fe} \ 38(\text{Ca} + \text{Mg}) \ 41(\text{Na} + \text{K}) \ 21} \text{Fe} \ 0,031;$$

$$2005 \text{ г.: } M_{0,52} \frac{\text{SO}_4 \ 48 \ \text{HCO}_3 \ 28}{\text{Fe} \ 27 \ \text{Ca} \ 29 \ \text{Na} \ 26} \text{Fe} \ 0,064 \text{pH} \ 6,1.$$

Днепровско-московский (нижний межморенный) водоносный горизонт эксплуатируется довольно крупными водозаборами Карельского перешейка на участке Солнечное — Репино — Комарово — Зеленогорск. По химическому составу воды пресные хлоридно-гидрокарбонатные натриевые с минерализацией 0,2–0,3 г/дм³ и довольно высоким содержанием железа (медиана — 0,39 мг/дм³ при ПДК 0,3 мг/дм³) (см. табл. 1). Формула Курлова для среднего состава вод нижнего межморенного водоносного горизонта:

$$M_{0,25} \frac{\text{HCO}_3 71 \text{Cl } 25}{\text{Na } 65 \text{Ca } 20} \text{pH } 7,6.$$

На водопроводной станции в г. Зеленогорске:

$$M_{0,06} \frac{\text{HCO}_3 78}{\text{Fe } 34 \text{Ca } 27 \text{Na } 23} \text{pH } 7,1.$$

Содержание железа составляет 7,3 мг/дм³, поэтому вода может использоваться только после обезжелезивания.

На ул. Байконурской Приморского района Санкт-Петербурга:

$$M_{0,2} \frac{\text{HCO}_3 75}{\text{Na } 41 \text{Ca } 37 \text{Mg } 22} \text{pH } 7,9.$$

Скважина используется для питья местными жителями, возможна организация производства фасованной воды.

4.1.2. Дочетвертичные водоносные горизонты

Арукюласко-швентойский (*D_{2ar}* — *D_{3šv}*) водоносный комплекс характеризуется водами гидрокарбонатными магниевыми-кальциевыми или со смешанным катионным составом, на границе солоноватых вод — сульфатными, с минерализацией 0,2–0,4 г/дм³ и повсеместным повышенным содержанием железа (до 3 мг/дм³). Зафиксировано повышенное природное содержание бора и марганца (Яхнин и др., 2005). В данной работе рассматриваются только воды среднедевонских отложений, поскольку верхнедевонские породы развиты за пределами изучаемой территории. Для статистической обработки использовались данные по 26 водопунктам, расположенным в окрестностях Санкт-Петербурга. Это в основном гидрокарбонатные магниевые-кальциевые воды с минерализацией около 0,5 г/дм³:

$$M_{0,48} \frac{\text{HCO}_3 89}{\text{Ca } 47 \text{Mg } 33} \text{pH } 7,5.$$

Содержание железа зачастую превышает ПДК в несколько раз (см. табл. 1).

В районе д. Даймище Гатчинского района (участок студенческой практики, база Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ)) арукюласко-швентойский комплекс является первым от поверхности, разгружается родниками в долину р. Оредеж и используется для местного водоснабжения. В 2014 г. химический состав воды в роднике на территории базы РГГМУ (*D_{2ar}*):

$$M_{0,17} \frac{\text{HCO}_3 \text{ 83}}{\text{Ca 48 Mg 30 Na 22}} \text{pH 7,6.}$$

Наровский относительно водоупорный (слабоводоносный) горизонт (D_{2nr}) эксплуатируется несколькими скважинами в Гатчинском и Тосненском районах. Воды пресные (сухой остаток — от 300 до 500 мг/дм³) гидрокарбонатные магниево-кальциевые (Яхнин и др., 2004). По данным опробования 12 водопунктов, средний химический состав воды:

$$M_{0,46} \frac{\text{HCO}_3 \text{ 83}}{\text{Ca 45 Mg 44}} \text{pH 7,2.}$$

Обнаруживаются повышенные содержания железа (медиана на уровне ПДК 0,3 мг/дм³, среднее — 0,6 мг/дм³).

Для самоизливающейся скважины в районе д. Даймище (правый берег р. Оредеж, пойменная терраса), где уровень наровского горизонта устанавливается на отметке около +1 м от поверхности Земли, формула Курлова (2013 г.):

$$M_{0,37} \frac{\text{HCO}_3 \text{ 95}}{\text{Mg 54 Ca 45}} \text{pH 7,55.}$$

Ордовикский водоносный комплекс (O_{1-3}) активно эксплуатируется в окрестностях Санкт-Петербурга и в Ленинградской области. Макрокомпонентный состав воды весьма стабилен, доминируют пресные гидрокарбонатные магниево-кальциевые воды (Шварц, 2005).

На основании опробования 47 водопунктов (см. табл. 1) общая минерализация в среднем составляет 516 мг/дм³. В более чем 50 % случаев наблюдается соответствие ПДК по содержанию общего железа (медиана — 0,275 мг/дм³), но в остальных водопунктах превышение ПДК по железу довольно существенно (среднее — 0,97 мг/дм³). Только в семи пробах отмечены превышения ПДК по общей жесткости (более 7 ммоль/дм³). Средняя жесткость — 5,11 ммоль/дм³. В ряде водопунктов наблюдались превышения ПДК также по марганцу, барью, бору (Шварц, 2005).

Средний химический состав подземных вод:

$$M_{0,52} \frac{\text{HCO}_3 \text{ 80}}{\text{Mg 41 Ca 38 Na 21}} \text{pH 7,7.}$$

Источники в пос. Можайском у подножия гор Вороньей и Ореховой характеризуются превышением радиационных норм (НРБ-99/2009) по радону. В отдельных водопунктах активность радона составляла 70–120 Бк/дм³ (при уровне вмешательства 60 Бк/дм³). Это объясняется тем, что подстилающим водоупором водоносного комплекса карбонатных пород ордовика служат диктионемовые черные сланцы копорской свиты, содержащие повышенные концентрации урана.

Пос. Можайский, источник «Ключь» (Каюкова, 2018):

$$M_{0,6-0,8} \frac{\text{HCO}_3 (63-70) \text{Cl} (16-19)}{\text{Mg} (44-45) \text{Ca} (40-41) \text{Na} (12-13) \text{K} 3} \text{pH} (6,8-7,2) \text{Rn} 120.$$

Кембро-ордовикский водоносный комплекс (Е-О) на 14 водозаборах показал воды хлоридно-гидрокарбонатные смешанного катионного состава, с довольно высокой минерализацией (средняя — 0,65 г/дм³), умеренной жесткостью (средняя — 5,34 ммоль/дм³), содержание железа в 50 % проб не превышает ПДК (среднее — 0,9 мг/дм³, медиана — 0,3 мг/дм³). Отмечаются повышенные относительно ПДК концентрации бора (Шварц, 2005). Формула Курлова среднего химического состава:

$$M_{0,65} \frac{\text{HCO}_3 \text{ 61 Cl 29}}{\text{Na 41 Ca 32 Mg 27}} \text{pH 7,6.}$$

Ломоносовский (лонтоваский) водоносный горизонт (V₂-Е₁ln) рассмотрен на предмет химического состава подземных вод только для западной части Ленинградской области, где горизонт содержит воды с минерализацией до 1,4 г/дм³ и используется для хозяйственно-питьевого водоснабжения и в технических целях. В 29 водопунктах воды хлоридно-гидрокарбонатные натриевые с минерализацией от 0,36 до 1,42 г/дм³. Содержание железа, как правило, не превышает ПДК (медиана — 0,2 мг/дм³, среднее — 0,31 мг/дм³). Среди микрокомпонентов медианная и средняя концентрация бора примерно соответствует величине ПДК (Шварц, 2005). Средний состав воды:

$$M_{0,74} \frac{\text{HCO}_3 \text{ 56 Cl 41}}{\text{Na 88}} \text{pH 8,0.}$$

Вендский нижнекотлинский водоносный комплекс (Vkt₁) наиболее активно эксплуатируется как для питьевых, так и для технических целей. В пределах Карельского перешейка, севернее линии Зеленогорск — Васкелово, воды пресные, и горизонт активно используется для хозяйственно-питьевого водоснабжения (см. зона I на рис. 1). На этой территории особое внимание обращают на себя микрокомпоненты, имеющие значение для здоровья человека и обычно нормируемые требованиями к питьевым водам. В области распространения пресных вод превышения установленных норм наблюдаются для железа, марганца, бария, кадмия, фтора и радона (Vorontov and Vinograd, 2009).

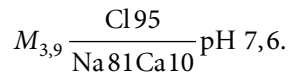
Средний химический состав подземных вод зоны I (79 проб воды):

$$M_{0,32} \frac{\text{HCO}_3 \text{ 51 Cl 42}}{\text{Na 58 Ca 22 Mg 20}} \text{pH 7,8.}$$

Среднее и медианное содержание железа (0,78 и 0,31 мг/дм³ соответственно) превышает ПДК. Таким образом, значительные превышения присутствуют в более чем 50 % проб. Обращает на себя внимание значительное содержание фтора (среднее — 1,42 мг/дм³, медианное — 1,45 мг/дм³). Таким образом, чуть менее чем в 50 % проб наблюдается превышение ПДК (1,5 мг/дм³).

Южнее линии Зеленогорск — Васкелово, на территории, включающей Санкт-Петербург, воды комплекса становятся солоноватыми (см. зона II на рис. 1) (Воронов и Виноград, 2006), и по мере погружения под вышележащие отложения минерализация продолжает расти в юго-восточном направлении. В черте Санкт-

Петербурга минерализация воды составляет 3,5–5 г/дм³, достигая местами 8 г/дм³ (воды используются только в технических целях). Средний химический состав подземных вод зоны II (86 проб):



Таким образом, по мере роста минерализации и глубины залегания подземных вод увеличивается содержание в воде хлоридов натрия, что соответствует общим гидрогеологическим закономерностям.

4.2. Изотопный состав

На рассматриваемой территории основное питание грунтовые водоносные горизонты (независимо от возраста и литологии вмещающих пород, выходящих на поверхность) получают преимущественно в холодный период года. Временные рамки этого периода ограничиваются среднесуточной температурой воздуха +5 °С, ниже которой влияние эвапотранспирации на водный баланс становится пренебрежимо малым (Блютген, 1972; 1973). Осенью при опускании температуры ниже указанного порога жидкие атмосферные осадки идут преимущественно на восполнение дефицита влаги в почве и зоне аэрации, сформированного в летнюю межень. После перехода через 0 °С происходит накопление влагозапасов в снеге, а при превышении — восполнение запасов грунтовых горизонтов за счет снеготалой воды. После подъема среднесуточной температуры воздуха сверх +5 °С эвапотранспирация начинает поглощать осадки, в том числе летом практически полностью.

Степень изъятия воды из водного баланса за счет эвапотранспирации зависит от типа ландшафта. Например, в хвойном, особенно зрелом, лесу весенняя абляция снега и летняя транспирация оказываются меньше, чем в молодом широколиственном. На песчаной почве поглощение влаги почвой всегда преобладает над транспирацией и испарением и т. д. В соответствии с этими режимами водного баланса изменяется и изотопный состав инфильтрационного питания, поскольку в атмосферных осадках имеет место его облегчение (уменьшение содержаний тяжелых изотопов — дейтерия и кислорода-18) в холодный период года и противоположный процесс — в теплый. Сочетание указанных факторов ведет к тому, что грунтовые горизонты питаются водой по изотопному составу несколько более легкой, чем взвешенные среднегодовые осадки.

Наблюдения за изотопным составом осадков на площадке СПбГУ в Петергофе были выполнены в 2012–2017 гг. Наиболее легкий изотопный состав снега составил $\delta^{18}O = -24,3 \text{ ‰}$ и $\delta^2H = -183 \text{ ‰}$; наиболее тяжелый изотопный состав дождя — $\delta^{18}O = -6,1 \text{ ‰}$ и $\delta^2H = -32 \text{ ‰}$ (изотопный состав здесь и далее будет приводиться в промилле относительно стандарта средней океанической воды — SMOW). Взвешенный среднегодовой состав осадков, рассчитанный с учетом распределения объема и состава выпадений во времени, равен $\delta^{18}O = -9,7 \text{ ‰}$ и $\delta^2H = -95 \text{ ‰}$. Локальная линия метеорных вод (ЛЛМВ) описывается уравнением $\delta^2H = 7,86 \cdot \delta^{18}O + 1,7$ ($n = 187$, $R^2 = 0,98$, рис. 4).

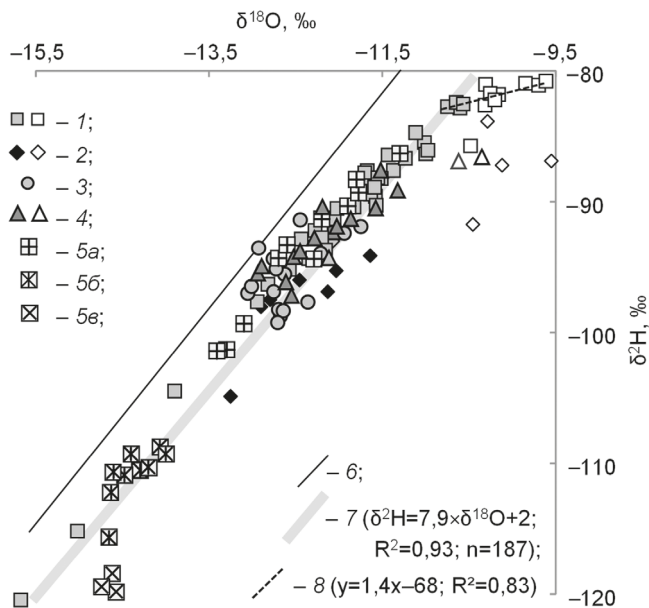


Рис. 4. Изотопный состав подземных вод в Санкт-Петербурге и Ленинградской области:

1 — четвертичные горизонты, в том числе воды с признаками испарения (незалитые значки); 2 — девонские горизонты, в том числе воды с признаками испарения (незалитые значки); 3 — ордовикский и кембро-ордовикский горизонты; 4 — ломоносовский горизонт, в том числе воды с признаками испарения (незалитые значки); 5 — вендский водоносный комплекс: 5а — Карельский перешеек — север, центр и северное побережье Финского залива; 5б — Карельский перешеек — юг и правобережье р. Невы; 5в — левобережье р. Невы; 6 — глобальная линия метеорных вод; 7 — локальная линия метеорных вод (уравнение на диаграмме); 8 — линия испарения (уравнение на диаграмме)

В пределах Ленинградской области были опробованы воды четвертичных, девонских, ордовикского и кембро-ордовикского горизонтов, а также вендского водоносного комплекса. Во всех случаях размах вариаций изотопного состава подземных вод существенно меньше вариаций состава осадков. Последнее естественно в силу указанных выше ограничений на период питания, вследствие усреднения изотопного состава воды в водоносных горизонтах за счет действия дисперсионных механизмов и трехмерности сетки течения, а также некоторых других факторов, которые будут рассмотрены ниже.

Воды четвертичных грунтовых горизонтов имеют наибольшие вариации изотопного состава из-за различия ландшафтных обстановок и относительно коротких путей фильтрации от области питания до точек опробования (что совпадает с наиболее низкой минерализацией воды в этих горизонтах, см. табл. 1). В области тяжелых изотопных составов ($\delta^{18}\text{O} > -10\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} > -85\text{‰}$, что соответствует летним осадкам) ощущается воздействие процесса физического испарения (см. рис. 4). На графике в координатах $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ это проявляется в заметном смеще-

нии фигуративных точек вдоль линии испарения вправо-вверх относительно начального положения на ЛЛМВ.

На участках, расположенных вблизи крупных водоемов (Ладожское озеро и Финский залив), отмечается тяготение состава грунтовых вод к униформным содержаниям дейтерия и кислорода-18, близким к таковым в соседствующем водоеме или смещенным к этим значениям относительно более удаленных участков территории. Последнее указывает на то, что часть атмосферных осадков (в первую очередь туманы) формируется за счет влаги, испаренной с поверхности соседствующего резервуара воды. Аналогичные эффекты обнаруживаются и в других регионах мира, например в котловине оз. Иссык-Куль (Брезгунов и др., 1979).

Девонские, ордовикский, кембро-ордовикский и ломоносовский (на участках, где отсутствуют перекрывающие отложения, кроме четвертичных) горизонты по изотопному составу образуют тесную группу точек. Центр тяжести для этой группы находится вблизи изотопного состава $\delta^{18}\text{O} \approx -12\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} \approx -95\text{‰}$, что несколько легче взвешенного среднегодового состава осадков ($\delta^{18}\text{O} = -9,7\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} = -95\text{‰}$) и значительно тяжелее среднего состава снега за период наблюдений ($\delta^{18}\text{O} \sim -14,5\text{‰}$ – $-17,0\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} = -112\text{‰}$ – -132‰). Данное смещение относительно взвешенного среднегодового изотопного состава осадков указывает на преимущественное питание осадками холодного периода года. В указанных горизонтах имеет место несколько большая минерализация воды и относительно меньший размах вариаций изотопного состава по сравнению с четвертичными горизонтами (см. табл. 1, рис. 4). Это свидетельствует в пользу значительно более протяженных путей фильтрации от областей питания и совпадает с общими представлениями о гидрогеологических условиях территории.

В некоторых случаях для девонских и ломоносовского горизонтов отмечается влияние испарения, в результате чего фигуративные точки на диаграмме $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ оказываются заметно и хаотично смещены вправо относительно ЛЛМВ (см. рис. 4). При летнем опробовании мочажин, высачиваний или неглубоких колодцев с температурой воды выше $+10^\circ\text{C}$ очевидно, что процесс испарения непосредственно предшествовал моменту отбора пробы. При изучении условий формирования подземных вод такие пробы следует отбрасывать как при анализе гидрохимических, так и изотопных данных. Однако при опробовании скважин на девонский и ломоносовский горизонты можно предполагать наличие испарения на этапе поступления инфильтрационного питания.

Отметим, что в ордовикском и кембро-ордовикском горизонтах воды с признаками испарения по изотопным данным не обнаружены. Очевидно, данная особенность указывает на существенные различия в характере инфильтрационного питания девонских и ломоносовского горизонтов, с одной стороны, и ордовикского и кембро-ордовикского — с другой. А именно поглощение осадков и поверхностного стока на поверхностях, субстратом которых являются карбонатные породы (например, на Ижорском плато), происходит существенно быстрее, чем на поверхностях, субстратом которых являются терригенные заметно глинистые отложения.

В ордовикском и кембро-ордовикском горизонтах зафиксированы случаи, когда изотопный состав воды оказывается заметно смещенным относительно ЛЛМВ не вправо (как при испарении), а влево (эти точки соответствуют скважинам на

Ижорском плато). Известно, что причиной этого явления может быть прямая конденсация влаги из воздуха (Ферронский и Поляков, 2009). В рассматриваемом случае конденсация паров из воздуха может происходить в кавернозных известняках кембро-ордовика, находящихся на Ижорском плато в зоне аэрации. Подчеркнем, что доля конденсата в водном балансе должна быть достаточно велика, чтобы проявиться в изотопном составе воды, извлекаемой скважиной.

Значительное разнообразие изотопного состава демонстрируют воды вендского комплекса. В частности, на Карельском перешейке их изотопный состав варьирует от аналогичных четвертичным горизонтам и приближающихся к взвешенным среднегодовым осадкам (в этом случае в воде фиксируется присутствие трития) до относительно облегченных, в среднем $\delta^{18}\text{O} \approx -13,4\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} \approx -102\text{‰}$ (Воронюк и др., 2016). В южной части перешейка и на правом берегу р. Невы в зоне перехода минерализации от 1 к 2 г/дм³ обнаружены воды экстремально легкого изотопного состава, в среднем $\delta^{18}\text{O} \approx -13,8\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} \approx -111\text{‰}$ (см. рис. 4). Наконец, на левобережье р. Невы в зоне с минерализацией воды около 5–6 г/дм³ зафиксированы изотопные составы, в среднем $\delta^{18}\text{O} \approx -14,2\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} \approx -119\text{‰}$ (см. рис. 4), что уже сравнимо с изотопным составом снега.

Наиболее легкие по изотопному составу воды вендского водоносного комплекса обнаруживают признаки криогенной метаморфизации изотопного состава. Этот эффект состоит в том, что при замерзании воды в период формирования «вечной» мерзлоты происходило изотопное фракционирование, в результате которого во льду накапливался дейтерий и кислород-18. В соответствии с этим на диаграмме $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ фигуративные точки смещаются вправо-вверх от начального положения на линии метеорных вод. Их начальный состав вычислить достаточно сложно. Если предположить, что угловой наклон линии фракционирования при замерзании равен $\approx 6,9$ (Marion et al., 1999; Lacelle, 2011), то начальный изотопный состав инфильтрационных вод будет около $\delta^{18}\text{O} \sim -17\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} \sim -135\text{‰}$. Столь легкие изотопные составы объясняются формированием вод вендского комплекса, обнаруживаемых в этой части изучаемого региона, в холодный климатический период, который закончился на данной территории не менее 12 тыс. лет назад.

Таким образом, изменения в изотопном составе и химизме подземных вод вендского комплекса оказываются синхронны увеличению их возраста при удалении от области питания. Отметим также, что при минерализации более 400 мг/дм³ содержание солей возрастает только за счет ионов Na^+ и Cl^- (Токарев и др., 2013), откуда следует сделать вывод о существенном изменении характера процессов, определяющих формирование химического состава вендского комплекса, при удалении от области питания.

Из полученных химических и изотопных данных следует, что в естественных условиях отсутствует площадное питание вендского водоносного комплекса вне области его выхода на дневную поверхность или под чехол проницаемых четвертичных отложений. При организации водозаборов трудно ожидать появления значительного объема привлекаемых ресурсов за счет перетекания вследствие значительной мощности регионального водоупора — котлинских глин. В плане управления водопользованием это означает, что эксплуатационные ресурсы вендского комплекса в зоне его минерализации около 0,7–1,0 г/дм³ должны рассчитываться,

только исходя из возможного бокового притока. Кроме того, учитывая возраст подземных вод, следует предполагать, что на этих участках имеются только упругие запасы, а ресурсы как таковые отсутствуют.

5. Заключение

Подземные воды Санкт-Петербурга и окрестностей, эксплуатируемые с целью водоснабжения, следует разделить на две группы: 1) имеющие современное питание; 2) не имеющие его или те, чье современное питание составляет пренебрежимо малую долю в балансе.

В первом случае грунтовые (первые от поверхности) водоносные горизонты независимо от возраста и литологии вмещающих пород восполняют запасы за счет современных осадков преимущественно в холодный период года. Внутри года временные рамки этого периода ограничиваются среднесуточной температурой воздуха $+5^{\circ}\text{C}$, ниже которой влияние эвапотранспирации на водный баланс становится пренебрежимо малым, и практически все осадки идут на восполнение запасов подземных вод.

По химическому составу это пресные, преимущественно гидрокарбонатные кальциево-магниевые воды с близким к нейтральному рН. Макрокомпонентный состав этих вод незначительно зависит от типа вмещающих пород, однако содержание микроэлементов (бария, бора, железа, радона, урана) может существенно выходить за рамки нормативов. Воды этого типа, как правило, содержат тритий, что прямо указывает на их незначительный возраст (не превышающий нескольких десятков или первых сотен лет). По изотопному составу воды грунтовых горизонтов оказываются близки или незначительно легче взвешенных среднегодовых современных осадков, имеющих $\delta^{18}\text{O} = -9,7\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} = -95\text{‰}$. Величина облегчения (уменьшения содержаний дейтерия и кислорода-18) относительно взвешенных среднегодовых осадков определяется ландшафтными условиями, а именно: чем меньше влияние эвапотранспирации и весенней абляции снега на водный баланс, тем меньше смещение относительно осадков.

Во втором случае горизонты содержат воды, получавшие питание в относительно отдаленном прошлом за счет инфильтрации атмосферных осадков и/или за счет связи с палеоводоемами, уровни воды в которых и ее химизм существенно менялись во времени. Воды этого типа, как правило, обнаруживаются на удалении от современных областей питания при погружении геологических пластов под перекрывающие (особенно слабопроницаемые) отложения.

Факторами, определяющими химический состав воды, оказываются: а) литология вмещающих пород; б) степень удаления от области питания, то есть время контакта с породами; в) географо-климатические изменения в прошлом. Сочетание вышеуказанных факторов приводит к тому, что в анионном составе этих вод появляются хлориды в значимом или подавляющем количестве, а катионный состав оказывается переменным, в том числе с преобладанием натрия. При этом минерализация меняется от долей до первых граммов на кубический дециметр. В значительной части случаев обнаруживается существенное превышение активностей природных радионуклидов (в основном радия-226 и радона) над уровнем вмешательства.

В водах этого типа отсутствует тритий, а изотопный состав оказывается существенно легче современных взвешенных среднегодовых осадков, соответствующая климатическим условиям заметно более холодным, чем современные.

Наиболее рельефно изменение условий питания во времени идентифицируется для вендского водоносного комплекса. На Карельском перешейке в зоне выхода вендского комплекса на поверхность или под чехол четвертичных отложений изотопный состав воды в нем практически идентичен современным взвешенным среднегодовым осадкам. В южной части перешейка его воды имеют значительно более легкий изотопный состав, в среднем $\delta^{18}\text{O} \approx -13,8 \text{‰}$ и $\delta^2\text{H} \approx -111 \text{‰}$. На левобережье р. Невы зафиксированы воды с наименьшими содержаниями дейтерия и кислорода-18, в среднем $\delta^{18}\text{O} \approx -14,2 \text{‰}$ и $\delta^2\text{H} \approx -119 \text{‰}$, а также с признаками криогенной метаморфизации, что следует учитывать при анализе химического состава.

Все это указывает на формирование запасов подземных вод вендского комплекса на участках, удаленных от современной области питания, в холодный климатический период, который закончился на данной территории не менее 12 тыс. лет назад. Следует также допустить, что в формировании запасов пресных вод вендского комплекса могли участвовать воды Валдайского ледника и/или Балтийского ледникового озера, в различных пропорциях смешанные с морскими водами последующих трансгрессий.

По изотопному составу может быть идентифицировано влияние процессов, редко обсуждаемых при анализе условий формирования запасов подземных вод исследованной территории. Например, для вод девонских и ломоносовского горизонтов по изотопным данным иногда отмечается влияние испарения, которое следует отнести к этапу формирования инфильтрационного питания. Напротив, в ордовикском и кембро-ордовикском горизонтах воды с признаками испарения не обнаружены. Это указывает на существенное различие факторов, определяющих поступление инфильтрационного питания в данные геологические образования. Поглощение осадков и поверхностного стока на поверхностях, субстратом которых являются карбонатные породы, происходит существенно быстрее, чем на поверхностях, субстратом которых являются терригенные заметно глинистые отложения. Кроме того, в ордовикском и кембро-ордовикском горизонтах зафиксированы случаи, когда изотопный состав воды указывает на возможность прямой конденсации влаги из воздуха. По-видимому, этот процесс может протекать в карстовых каналах при циркуляции атмосферного воздуха.

Авторы благодарят сотрудника СЗ ПГО (Росгеология) Г.Ю.Воронюка, а также работников ФГУП «Гидроспецгеология» (Филиал «Экспедиция 29 района») В.А.Исакова и Т.М.Исакову за помощь в проведении опробования.

Литература

- Блютген, И., 1972. География климатов. Т. 1. Мир, Москва.
Блютген, И., 1973. География климатов. Т. 2. Мир, Москва.
Брезгунов, В. С., Нечаев, В. В., Ерохин, В. С., Есиков, А. Д., Черникова, Н. С., Якимова, Т. В., 1979. Изучение распределения стабильных изотопов водорода и кислорода в бассейне озера Иссык-Куль

- в связи с особенностями влагооборота в Иссyk-Кульской котловине, в: Изотопные исследования природных вод. Наука, Москва, 61–69.
- Воронов, А. Н., Виноград, Н. А.*, 2006. Гдовский водоносный горизонт — источник пресных, минеральных и промышленных вод. Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия: Геология. География 7(4), 88–96.
- Воронюк, Г. Ю., Бородулина, Г. С., Крайнюкова, И. А., Токарев, И. В.*, 2016. Водообмен в краевых частях Балтийского щита и прилегающих артезианских бассейнах по изотопным и химическим данным (научные и прикладные аспекты). Карельский перешеек. Труды Карельского научного центра. Серия: Лимнология 9, 46–56.
- ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга». Водоснабжение. Структура водоснабжения. http://www.vodokanal.spb.ru/vodosnabzhenie/struktura_vodosnabzheniya/ (дата обращения: 01.10.2019).
- Каюкова, Е. П.*, 2018. Дудергофские источники (у Вороньей горы), в: Памяти А. Н. Воронова / Каюкова Е. П. (под ред.). ВВМ, Санкт-Петербург, 99–109.
- Куликов, Г. В., Жевлаков, А. В., Бондаренко, С. С.*, 1991. Минеральные лечебные воды СССР. Недра, Москва.
- Редкие типы минеральных вод Среднерусского артезианского бассейна, 2013 / Коротков, А. И., Потапов, А. А., Румынин, В. Г. (под ред.). Наука, Санкт-Петербург.
- Токарев, И. В., Шварц, А. А., Боровицкая, Е. Ю.*, 2013. Экологические проблемы эксплуатации подземных вод Карельского перешейка. Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле 7(2), 21–31. <http://elibrary.ru/item.asp?id=19115678>
- Ферронский, В. И., Поляков, В. А.*, 2009. Изотопия гидросферы Земли. Научный мир, Москва.
- Шварц, А. А.*, 2005. Химический состав подземных вод Санкт-Петербургского региона в свете новых требований к качеству питьевой воды. Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле 7 (1), 85–93.
- Шебеста, Е. А.*, 2012. Отчет о результатах работ по объекту «Оценка состояния месторождений подземных вод для питьевого водоснабжения населения и обеспечения водой объектов промышленности с целью приведения их запасов в соответствие с действующим законодательством и нормативными правовыми документами на территории Ленинградской, Псковской, Новгородской, Калининградской областей и г. Санкт-Петербурга». АО «Северо-Западное ПГО», № 28245.
- Экологический портал Санкт-Петербурга. <http://www.infoeco.ru/index.php?id=3033> (дата обращения: 01.10.2018).
- Яхнин, Э. Я., Томилин, А. М., Шелематов, А. С.*, 2005. Оценка качества и химический состав подземных вод дочетвертичных отложений Ленинградской области. Разведка и охрана недр 5, 42–49.
- Babre, A., Kalvāns, A., Popovs, K., Retiķe, I., Dēliņa, A., Vaikmāe, R., Martma, T.*, 2016. Pleistocene age paleogroundwater inferred from water-stable isotope values in the central part of the Baltic Artesian Basin. *Isotopes Environ. Health Studies* 52, 706–725.
- IAEA, 2007a. Information Sheet on the new International Measurement Standards VSMOW2 and SLAP2. URL: http://www-naweb.iaea.org/NAAL/HL/docs/ref_mat/InfoSheet-VSMOW2-SLAP2.pdf (дата обращения: 01.12.2018).
- IAEA, 2007b. Reference Sheet for Reference Material GISP. URL: https://nucleus.iaea.org/rpst/documents/rs_gisp.pdf (дата обращения: 01.10.2018).
- Kalm, V.*, 2013. Ice-flow pattern and extent of the last Scandinavian Ice Sheet southeast of the Baltic Sea. *Quaternary Science Review* 44, 51–59.
- Lacelle, D.*, 2011. On the $\delta^{18}\text{O}$, δD and D-excess relation in meteoric precipitation and during equilibrium freezing: theoretical approach and field examples. *Permafrost and Periglac. Process* 22, 13–25. doi: 10.1002/ppp.712.
- Marion, G. M., Farren, R. E., Komrowski, A. J.*, 1999. Alternative pathways for seawater freezing. *Cold Regions Science and Technology* 29, 259–266.
- Mokrik, R., Mažeika, J.*, 2002. Palaeohydrogeological reconstruction of groundwater recharge during Late Weichselian in the Baltic basin. *Geologija* 39, 49–57.
- Rosentau, A., Vassiljev, J., Hang, T., Saarse, L., Kalm, V.*, 2009. Development of the Baltic Ice Lake in eastern Baltic. *Quaternary International* 206, 16–23.
- Sterckx, A., Lemieux, J. M., Vaikmāe, R.*, 2018. Assessment of paleo-recharge under the Fennoscandian Ice Sheet and its impact on regional groundwater flow in the northern Baltic Artesian Basin using a numerical model. *J. Hydrogeology* 26(8), 2793–2810. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1838-9>

- USGS, 2014a. United States Geological Survey. Reston Stable Isotope Laboratory. Report of Stable Isotopic Composition Reference Material USGS45. URL: <https://isotopes.usgs.gov/lab/referencematerials/USGS45.pdf> (дата обращения: 01.10.2018).
- USGS, 2014b. United States Geological Survey. Reston Stable Isotope Laboratory. Report of Stable Isotopic Composition Reference Material USGS46. URL: <https://isotopes.usgs.gov/lab/referencematerials/USGS46.pdf> (дата обращения: 01.10.2018).
- Voronov, A. N., Vinograd, N. A., 2009. The Lower-Kotlin aquifer as a source of mineral therapeutic waters for St. Petersburg. *Environmental Earth Sciences* 59 (1), 15–20.

Статья поступила в редакцию 14 декабря 2018 г.

Статья рекомендована в печать 1 октября 2019 г.

Контактная информация:

Виноград Наталья Анатольевна — nv.70@hotmail.com

Токарев Игорь Владимирович — tokarevigor@gmail.com

Строганова Татьяна Александровна — stroganova.t.a@mail.ru

Features of Groundwater Formation of the Main Aquifers of St. Petersburg and Suburbs Based on Data of Chemical and Isotope Composition

N. A. Vinograd, I. V. Tokarev, T. A. Stroganova

St. Petersburg State University,

7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

For citation: Vinograd, N. A., Tokarev, I. V., Stroganova, T. A. (2019). Features of Groundwater Formation of the Main Aquifers of St. Petersburg and Suburbs Based on Data of Chemical and Isotope Composition. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 64 (4), 575–597. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.405> (In Russian)

The main aquifers used for water supply in St. Petersburg and Leningrad Oblast contain waters with total dissolved solids (TDS) and chemical composition that vary considerably with the distance from modern recharge areas, as well as depending on the composition of the host rocks. Waters of the Quaternary, Devonian, Ordovician, Cambrian-Ordovician and Vendian aquifers were sampled and analyzed. With low mineralization, a bicarbonate calcium-magnesium composition predominates in waters of low TDS, while with its increase over 400–600 mg/dm³, chlorides dominate in the anion composition, and sodium — in cation composition. In some cases, low-mineralized water contains significant amounts of iron and can be considered mineral-medicinal. A regional feature is the local excess (sometimes significant) of the activity of natural radionuclides over the intervention levels. To identify formation conditions, data on the isotopic composition (deuterium and oxygen content-18) of groundwater were used. The greatest variety of isotopic compositions is observed in the waters of the Vendian aquifer. On the Karelian Isthmus, it contains modern water (which is also indicated by tritium). When moving to the south, in the direction of increasing TDS, the isotopic composition of water in the Vendian aquifer gets lighter, up to the appearance of waters with obvious signs of cryogenic metamorphosis. Light isotopic compositions are explained by the formation of groundwater in the cold climatic period, which ended in this area at least 12,000 years ago. Changes in the isotopic composition and chemistry of the waters of the Vendian aquifer are simultaneous with an increase in their age at a distance from the recharge area. Hence, in natural conditions, there is no areal recharge of the aquifer outside the area of its discharge to the

land surface or under the permeable Quaternary deposits. In terms of water management, this means that its resources in the area where TDS exceeds 0.7–1.0 g/dm³ should be calculated only as lateral inflow.

Keywords: Aquifer, groundwater formation, chemical and isotope composition.

References

- Babre, A., Kalvāns, A., Popovs, K., Retiķe, I., Dēliņa, A., Vaikmāe, R., Martma, T., 2016. Pleistocene age paleogroundwater inferred from water-stable isotope values in the central part of the Baltic Artesian Basin. *Isotopes Environ. Health Studies* 52, 706–725.
- Bliutgen, I., 1972. Climate geography. T. 1. Mir Publ., Moscow. (In Russian)
- Bliutgen, I., 1973. Climate geography. T. 2. Mir Publ., Moscow. (In Russian)
- Brezgunov, V. S., Nechaev, V. V., Erokhin, V. S., Esikov, A. D., Chernikova, N. S., Iakimova, T. V., 1979. Studying the distribution of stable hydrogen isotopes and oxygen in the basin of Lake Issyk-Kul in connection with the peculiarities of moisture circulation in the Issyk-Kul basin. In: *Izotopnye issledovaniia prirodnykh vod*. Nauka Publ., Moscow, p. 61–69. (In Russian)
- Ecological portal of St. Petersburg. URL: <http://www.infoeco.ru/index.php?id=3033> (date accessed: 01.10.2018). (In Russian)
- Ferronskii, V. I., Poliakov, V. A., 2009. Isotopy of the Earth's hydrosphere. Nauchnyi mir Publ., Moscow. (In Russian)
- IAEA, 2007a. Information Sheet on the new International Measurement Standards VSMOW2 and SLAP2. URL: http://www-naweb.iaea.org/NAAL/HL/docs/ref_mat/InfoSheet-VSMOW2-SLAP2.pdf (date accessed: 01.12.2018).
- IAEA, 2007b. Reference Sheet for Reference Material GISP. URL: https://nucleus.iaea.org/rpst/documents/rs_gisp.pdf (date accessed: 01.10.2018).
- Iakhnin, E. Ia., Tomilin, A. M., Shelemotov, A. S., 2005. Quality assessment and chemical composition of groundwater in pre-Quaternary sediments of the Leningrad Region *Razvedka i okhrana nedr*, 5, 42–49. (In Russian)
- Kayukova, E. P., 2018. Duderhof springs (near Voronia Gora), in: In memory of A. N. Voronov / Kayukova, E. P. (Ed.). VVM Publ., St. Petersburg, 99–109. (In Russian)
- Kalm, V., 2013. Ice-flow pattern and extent of the last Scandinavian Ice Sheet southeast of the Baltic Sea. *Quaternary Science Review* 44, 51–59.
- Kulikov, G. V., Zhevlakov, A. V., Bondarenko, S. S., 1991. Mineral healing waters of the USSR. Nedra Publ., Moscow. (In Russian)
- Lacelle, D., 2011. On the $\delta^{18}\text{O}$, δD and D-excess relation in meteoric precipitation and during equilibrium freezing: theoretical approach and field examples. *Permafrost and Periglac. Process* 22, 13–25. doi: 10.1002/ppp.712.
- Marion, G. M., Farren, R. E., Komrowski, A. J., 1999. Alternative pathways for seawater freezing. *Cold Regions Science and Technology* 29, 259–266.
- Mokrik, R., Mažeika, J., 2002. Palaeohydrogeological reconstruction of groundwater recharge during Late Weichselian in the Baltic basin. *Geologija* 39, 49–57.
- Rare types of mineral waters of the Central Russian artesian basin, 2013 / Korotkov, A. I., Potapov, A. A., Rumynin, V. G. (Eds). Nauka Publ., St. Petersburg (In Russian)
- Rosentau, A., Vassiljev, J., Hang, T., Saarse, L., Kalm, V., 2009. Development of the Baltic Ice Lake in eastern Baltic. *Quaternary International* 206, 16–23.
- Shebesta, E. A., 2012. Report on the results of work on the object “Assessment of the status of groundwater deposits for drinking water supply to the population and providing water to industrial facilities in order to bring their stocks in line with applicable law and regulatory documents on the territory of Leningrad, Pskov, Novgorod, Kaliningrad regions and the city of St. Petersburg”. Repository of the Northwestern Geological Production Association” (Severo-Zapadnoe PGO), no. 28245. (In Russian)
- Shvarts, A. A., 2005. The chemical composition of groundwater in the St. Petersburg region in the light of new requirements for the quality of drinking water. *Vestnik of Saint Petersburg University. Seriya: Nauki o Zemle* 7(1), 85–93. (In Russian)

- State Unitary Enterprise «Vodokanal of St. Petersburg». Water supply. Water supply structure. URL: http://www.vodokanal.spb.ru/vodosnabzhenie/struktura_vodosnabzheniya (date accessed: 01.10.2019). (In Russian)
- Sterckx, A., Lemieux, J. M., Vaikmäe, R.*, 2018. Assessment of paleo-recharge under the Fennoscandian Ice Sheet and its impact on regional groundwater flow in the northern Baltic Artesian Basin using a numerical model. *J. Hydrogeology* 26 (8), 2793–2810. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1838-9>
- Tokarev, I. V., Shvarts, A. A., Borovitskaia, E. Iu.*, 2013. Environmental problems of groundwater exploitation of the Karelian Isthmus. *Vestnik of Saint Petersburg University. Seriya: Nauki o Zemle* 7 (2), 21–31. (In Russian)
- USGS, 2014a. United States Geological Survey. Reston Stable Isotope Laboratory. Report of Stable Isotopic Composition Reference Material USGS45. URL: <https://isotopes.usgs.gov/lab/referencematerials/USGS45.pdf> (date accessed: 01.10.2018).
- USGS, 2014b. United States Geological Survey. Reston Stable Isotope Laboratory. Report of Stable Isotopic Composition Reference Material USGS46. URL: <https://isotopes.usgs.gov/lab/referencematerials/USGS46.pdf> (date accessed: 01.10.2018).
- Voroniuk, G. Iu., Borodulina, G. S., Krainiukova, I. A., Tokarev, I. V.*, 2016. Water exchange in the marginal parts of the Baltic Shield and adjacent artesian basins according to isotopic and chemical data (scientific and applied aspects). *Karel'skii peresheek. Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra. Seriya: Limnologii* 9, 46–56. (In Russian)
- Voronov, A. N., Vinograd, N. A.*, 2009. The Lower-Kotlin aquifer as a source of mineral therapeutic waters for St. Petersburg. *Environmental Earth Sciences* 59 (1), 15–20.
- Voronov, A. N., Vinograd, N. A.*, 2006. The Gdov aquifer is a source of fresh, mineral, and industrial waters. *Vestnik of Saint Petersburg University. Seriya: Geologiya. Geografii* 7(4), 88–96. (In Russian)

Received: December 14, 2018

Accepted: October 1, 2019

Contact information:

Natalia A. Vinograd — nv.70@hotmail.com

Igor V. Tokarev — tokarevigor@gmail.com

Tatyana A. Stroganova — stroganova.t.a@mail.ru