

УДК 556.114.6+546.42 (470.11)

Н.И. Иванова¹**ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТРОНЦИЯ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ И ПОРОДАХ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ СЕВЕРОДВИНСКОГО АРТЕЗИАНСКОГО БАССЕЙНА**

Установлена природа и определены закономерности поведения стронция в подземных водах пермских отложений, используемых для централизованного водоснабжения в Вельском районе Архангельской области. Используются современные данные опробования подземных вод и пород, а также фондовые материалы за последние 25 лет. Полученные результаты по содержанию обменных катионов в породах будут использованы для дальнейших термодинамических расчетов и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: Северодвинский артезианский бассейн, стронций, пермские известняки, определение стронция в воде, определение стронция в породе.

The nature and the regularities of behavior of strontium in groundwater Permian sediments used for centralized water supply in the area Velsky Arkhangelsk region. Used in modern data sampling groundwater and rocks, as well as determining the stock over the past 25 years. The results obtained on the content of exchangeable cations in the rocks will be used for further thermodynamic calculations and experimental studies.

Key words: Severodvinsk artesian basin, strontium, Permian limestones, determination of strontium in the water, determination of strontium in the rocks.

Введение. Вопросам закономерностей формирования и распределения стронцийсодержащих подземных вод на относительно слабонаселенной территории, где расположен Северодвинский артезианский бассейн, на протяжении долгого времени не уделялось достаточного внимания. Только в последние десятилетия исследователи, например А.И. Малов, Е.В. Полякова [Малов, 2003; Полякова, 2009], рассматривали их для Юго-Восточного Беломорья. Однако развитие территории и городских поселений, тенденция к загрязнению поверхностных водоисточников значительно повышают роль подземных вод в организации устойчивого и здорового хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Стронций Sr — элемент II группы периодической системы элементов Д.И. Менделеева, в природных образованиях присутствует практически повсеместно. Мировые природные ресурсы Sr, по оценке Геологической службы США, превышают 1 млрд т. Он относится к числу литофильных редких элементов и состоит из смеси четырех стабильных изотопов. Кроме того, известны его 17 искусственных радиоактивных изотопов, в том числе ⁸⁹Sr и ⁹⁰Sr. ⁹⁰Sr образуется при ядерных реакциях деления урана и характеризуется большим периодом полураспада (около 28 лет). Распределение стронция естественного происхождения в породах и водах показано в табл. 1 [Алейников, Клименко, 1980].

Таблица 1

Среднее содержание Sr в литосфере и морской воде, по [Алейников, Клименко, 1980]

Объект исследований	Стронций, %	Источник
Кларк в земной коре	$3,4 \cdot 10^{-2}$	А.П. Виноградов (1962)
Породы: ультраосновные	$1 \cdot 10^{-3}$	— " —
основные	$4,4 \cdot 10^{-2}$	— " —
средние	$8 \cdot 10^{-2}$	— " —
кислые	$3 \cdot 10^{-2}$	— " —
осадочные	$4,5 \cdot 10^{-2}$	— " —
глинистые сланцы	$3 \cdot 10^{-2}$	К. Кутерьян, К. Ведепол (1961)
песчаники	$2 \cdot 10^{-2}$	— " —
карбонаты	$6,1 \cdot 10^{-2}$	— " —
каменная соль	$8 \cdot 10^{-3}$	М.С. Галицын (1979)
Морская вода	$8 \cdot 10^{-4}$	А.П. Виноградов (1967)

В осадочных отложениях кларк этого элемента возрастает в последовательности песчаники < глины < карбонаты < сульфаты. Стронций образует около 40

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра гидрогеологии, аспирантка; e-mail: niyaro4ka@gmail.com

минералов, формирующихся в гипогенных и гипергенных условиях. Промышленным сырьем для получения стронциевых продуктов служит минерал целестин (SrSO_4), в меньшей степени стронцианит (SrCO_3).

Содержание стронция в подземных водах составляет сотые и десятые доли процента, а суммарные ресурсы этого металла в гидросфере достигают 24% от общих мировых запасов. Для него характерна ионная форма миграции, которая определяется низким потенциалом ионизации и относительно высокой энергией гидратации. Концентрация и миграционная активность Sr зависят от состава и минерализации вод, условий их формирования и геохимических особенностей вмещающих пород.

Природный стронций — биологически активный элемент, поэтому его содержание в питьевых водах нормируется. Он накапливается в почвах, поверхностных водах и является одним из распространенных естественных загрязнителей подземных вод в артезианских бассейнах и потоках трещинно-жильных вод [Крайнов, Швец, 1992]. Предельно допустимая концентрация (ПДК) для минеральных вод в России составляет 25 мг/л. Соли и соединения стронция малотоксичны. Однако не следует путать действие на организм человека природного стронция (нерадиоактивного, малотоксичного, более того, широко используемого для лечения остеопороза) и его радиоактивных изотопов, которые всегда негативно воздействуют на организм человека [Höllriegl, 2008]. Стронций с большой скоростью накапливается в организме детей до четырехлетнего возраста, когда активно формируется костная ткань. Обмен стронция изменяется при заболеваниях органов пищеварения и сердечно-сосудистой системы. По результатам обследования детей, проживающих в условиях загрязнения стронцием, выявлены изменения иммунологических показателей [Маерова, Долгих, 2013]. Высокое содержание стронция в костях человека способно вызвать поражение и деформацию суставов, задержку роста и другие нарушения (стронциевый рахит, урловская болезнь).

Отношение к негативному влиянию стронция на организм человека в разных странах имеет различное количественное выражение. Так, в России предельно допустимая концентрация Sr в питьевых водах составляет 7 мг/л [САНПИН, 2001], в то время как, например, на Украине этот показатель значительно жестче — 4 мг/л [ДСАНПИН, 1997], что связано с последствиями аварии на Чернобыльской АЭС. В то же время Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ), США и Евросоюз не регламентируют содержание стронция в питьевой воде, поскольку он, будучи фактически аналогом кальция, не отделяется от последнего и не считается в этих странах опасным для организма.

Основные ресурсы подземных стронциевых вод приурочены к глубоким горизонтам платформенных артезианских бассейнов (табл. 2, [Алейников, Клименко, 1980]).

Таблица 2

Максимальное содержание стронция в подземных рассолах, по [Алейников, Клименко, 1980]

Артезианский бассейн	Возраст пород	Минерализация, г/л	Стронций, г/л
Ангаро-Ленский	K ₁	542	8,07
		418	7,1
		599	5,98
Припятский	D ₃ ¹	373	2,94
		416	4,15
Тунгусский	O–K	435	4,7
Амударьинский	J ₃	444	2,58
		349	3,8
Прикаспийский	T ₁	245	1,4
Волго-Камский	P ₂	351	1,75
Парадокс, США	C ₃₊₂	366	1,3

На территории России выделяют так называемые стронциевые биогеохимические провинции [Ковальский, 1982] с повышенным содержанием стронция в подземных водах и почвах, не связанным с техногенным влиянием. Целестин (как основной источник стронция в подземных водах из-за его хорошей растворимости в растворах NaCl и других солей) распространен в силурийских отложениях Якутии, верхнедевонских в Подмосковном бассейне, пермских в Волжско-Уральской провинции, меловых в Прикаспии. Стронций из осадочных пород выносится поверхностными и подземными водами и образует вторичные скопления в разных породах, в том числе в континентальных песчано-глинистых отложениях [Малов, 2003]. Провинции стронцийсодержащих подземных вод широко распространены в Калужской, Тверской, Архангельской, Пермской, Тульской, Рязанской, Иркутской областях, в Красноярском крае и Республике Саха — Якутия.

На территории Архангельской области изучена взаимозависимость содержания стронция в подземных водах и водовмещающих породах [Малов, 2003]. Низкое содержание (мг/кг) характерно для терригенно-карбонатных отложений венда (10), карбона (71) и ассельского яруса нижней перми (363), а также четвертичных образований, представляющих собой в основном продукты перетотложения нижезалегающих пород. Наибольшие значения характерны для отложений уфимского (452) и казанского (2400) ярусов верхней перми. Помимо высокого содержания стронция в горных породах казанского яруса, отмечено наличие рудопроявлений целестина в отложениях уфимского яруса. Соответственно здесь существенно возрастает и содержание стронция в подземных водах —

от 2–7 мг/л вблизи границы сакмарского яруса до 7–50 мг/л на правом берегу р. Кулой, а также на площадях, где развиты верхнепермские отложения.

По данным отдела статистики Департамента здравоохранения Архангельской области, в некоторых районах отмечается аномально высокая (по сравнению с другими районами) заболеваемость остеопорозом (повышенная хрупкость костной системы). Поэтому при решении проблем организации хозяйственно-питьевого водоснабжения за счет подземных вод на рассматриваемой территории юга Архангельской области необходимо тщательно изучать как естественные закономерности распределения стронция, так и его поведение при длительной эксплуатации подземных водозаборов.

Геологическое строение и гидрогеологические условия. Изучаемый район расположен в северной части Русской плиты на слабеволнистой Вельской низменности, на слиянии рек Вель и Вага (левый приток р. Северная Двина). Район хорошо изучен в геолого-гидрогеологическом отношении благодаря работам А.В. Смелова, А.В. Артемьева, О.С. Малышевой, В.П. Сапова, Л.А. Смеловой. Геологический разрез на глубину, представляющую практический интерес, слагают терригенно-карбонатные породы ассельского, сакмарского, казанского и уржумского ярусов перми, перекрытые ледниковыми, озерно-ледниковыми и аллювиальными отложениями четвертичного возраста (рис. 1).

Район работ расположен в юго-восточной части Северодвинского артезианского бассейна. В разрезе

верхнего гидрогеологического этажа сверху вниз выделяются:

— четвертичный водно-ледниковый водоносный комплекс ($flgQ_{2-3}$), сложенный озерно-ледниковыми и ледниковыми песчано-глинистыми отложениями общей мощностью до 30 м, которые спорадически обводнены по линзам и прослоям песков. Подземные воды гидрокарбонатные магниевые-кальциевые, пресные, минерализация 0,5 г/л;

— четвертичный аллювиальный водоносный горизонт (aQ_{1-3}), локально развитый в пределах палеодолин рек Вага и Вель. Сложен разнородными песками неоплейстоценового возраста с галькой и валунами, мощность от 15 до 30 м. Подземные воды гидрокарбонатные магниевые-кальциевые, пресные, минерализация до 0,5 г/л;

— нижнеуржумский терригенный водоносный горизонт (P_{2nu}) представлен тонкозернистыми, хорошо сортированными песками уржумского яруса с прослоями слабцементированных песчаников, общая мощность до 40 м. Подземные воды преимущественно гидрокарбонатные магниевые-кальциевые, пресные, минерализация 0,2–0,6 г/л. В долинах рек на отдельных участках отмечается повышение минерализации до 2 г/л и изменение анионного состава на гидрокарбонатно-сульфатный;

— верхнеказанский карбонатный водоносный горизонт (P_{2kz_2}), приуроченный к трещиноватым, слабодолмитизированным известнякам мощностью 20–30 м. Воды гидрокарбонатные кальциевые или магниевые-кальциевые, минерализация 0,2–0,7 г/л. В до-

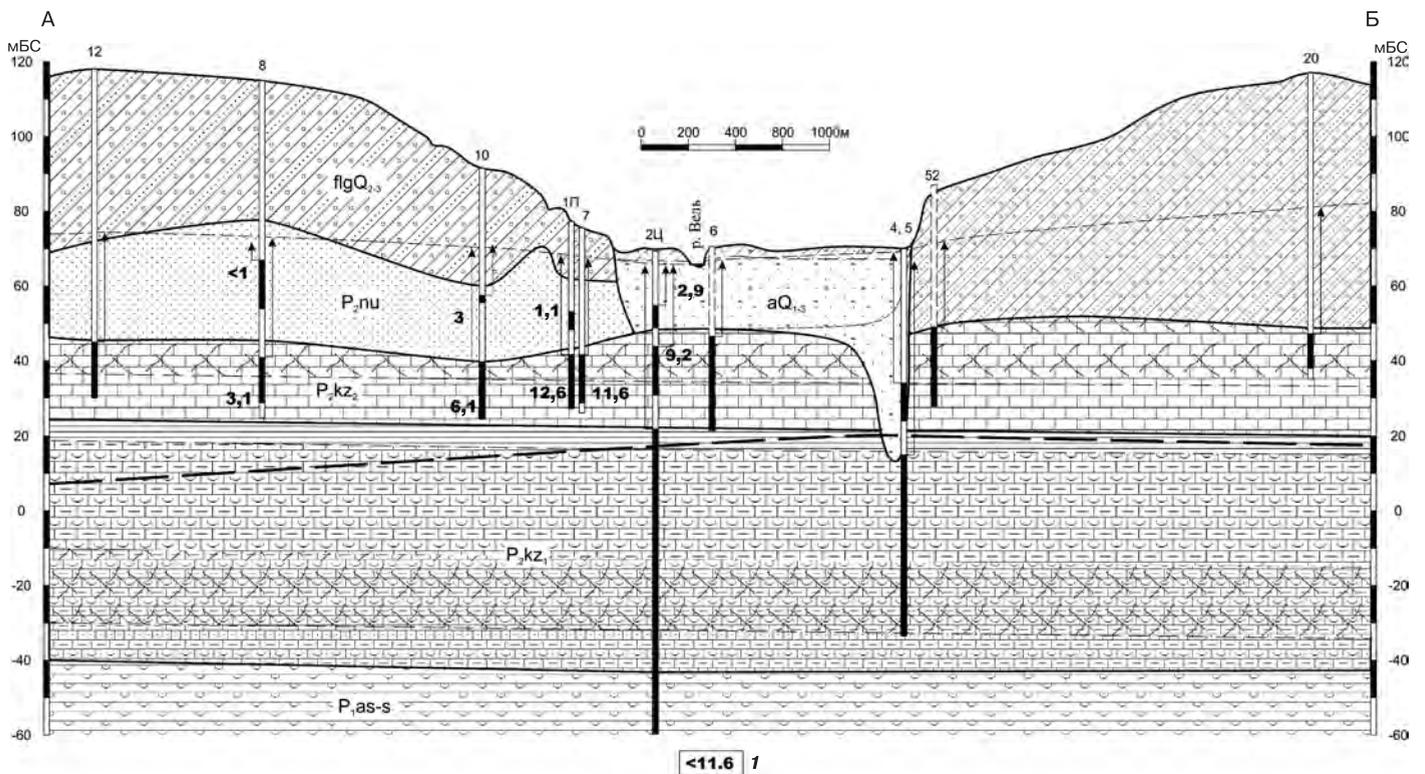


Рис. 1. Гидрогеологический разрез по линии А—Б (I — содержание стронция, мг/л)

линах рек на локальных участках отмечено повышение минерализации до 3,6 г/л и изменение состава на гидрокарбонатно-сульфатный кальциево-натриевый;

— нижнеказанский терригенно-карбонатный водоносный комплекс (P_2kz_1) приурочен к трещиноватым, огипсованным и кремненным известнякам с прослоями мергелей, мощность 10–15 м. В кровле комплекса развиты практически водоупорные глинистые известняки с прослоями известковистых глин. Воды минерализованные сульфатные, реже хлоридно-гидрокарбонатно-сульфатные кальциево-натриевые с минерализацией от 2,5 до 6,5 г/л. Используются в качестве лечебно-питьевых для бальнеотерапевтического лечения [Редкие типы минеральных вод..., 2013] (санаторий-профилакторий «Сосновка»), а также для добычи и бутилирования минеральных лечебно-столовых вод (ООО «Источник Севера»).

Ниже повсеместно залегает толща плотных ангидритов и гипсов ассельского и сакмарского ярусов нижней перми (P_{1as-s}), представляющая собой выдержанный региональный водоупор в вертикальном разрезе Северодвинского артезианского бассейна.

Формирование потоков подземных вод на рассматриваемой территории в значительной степени контролируется современным рельефом дневной поверхности: водораздельные пространства — области питания, а долины основных водотоков — области разгрузки. Местный характер подземного стока в верхней зоне интенсивного водообмена определяет балансовую обособленность бассейнов рек Вага и Вель и высокую скорость водообмена в пределах балансовых систем речных бассейнов.

Основу питания подземных вод зоны интенсивного водообмена составляют ультрапресные атмосферные осадки, характеризующиеся преимущественно хлоридным составом и наличием свободной углекислоты. В процессе инфильтрации атмосферные осадки растворяют породы зоны аэрации и обогащаются минеральными веществами, что сопровождается ростом минерализации и изменением химического состава. Особенности минералогического состава водовмещающих пород определяют распространение пресных, преимущественно гидрокарбонатных подземных вод с природным повышенным содержанием стронция стабильного и железа общего, что обусловлено процессами выщелачивания из водовмещающих пород стронций- и железосодержащих минералов, наличие которых неоднократно отмечалось предшествующими исследователями.

По мере увеличения глубины залегания известняков казанского яруса, общей глинистости и загипсованности пород интенсивность водообмена быстро затухает, водовмещающие интервалы нижнеказанского комплекса находятся уже в условиях затрудненного водообмена. Значительная протяженность пути фильтрации (расстояние от водораздела до мест разгрузки в р. Вель составляет около 3 км) и длительный контакт подземных вод с вмещающими породами

приводят к повышению минерализации до 2–4 г/л и изменению состава на сульфатный. Частичная разгрузка подземных вод нижнеказанского комплекса в долинах рек приводит к некоторому возрастанию минерализации и появлению значимой концентрации сульфатов в подземных водах верхнеказанского горизонта. Общая гидрогеохимическая обстановка осложняется наличием погребенных палеоврезов, которые в осевых частях предположительно прорезают водоупорные отложения (по данным геофизических исследований), разделяющие верхнеказанский горизонт и водоносные прослои нижнеказанского комплекса, что приводит к формированию узких, линейно вытянутых аномальных гидрогеохимических зон.

Материалы и методы исследований. В Вельском районе для организации водоснабжения в основном используется верхнеказанский карбонатный водоносный горизонт. Проблема его использования заключается в некондиционности вод по нескольким показателям, и в первую очередь по содержанию стронция. Для доведения воды до нужного качества после добычи и перед подачей в водоразборные сети могут быть использованы разные приемы. Разбавление для рассматриваемой территории малоперспективно, поскольку единственным достаточным по количеству источником могут быть только поверхностные воды рек Вель или Вага, которые неблагоприятны в санитарно-эпидемиологическом отношении и потребуют дополнительной сложной водоподготовки. Существуют разнообразные способы специальной водоподготовки по стронцию: ионная флотация [Пугач, 2002], катодная поляризация [Глазов и др., 1978], содово-известковый метод (контактное осаждение) [Кузнецов, 1974], электросорбция [Свешникова, Абакаров, 1993], модификации этих методов [Drever, 1988]. Наиболее эффективны ионообменные фильтры [Савицкая, 1999], которые применяются в Вельске на частном предприятии. Однако в масштабе централизованного водоснабжения города такая водоподготовка будет экономически затратной.

В то же время практически неизученным (и не только для рассматриваемых условий) остается вопрос о поведении стронция при эксплуатационном возмущении сложнопостроенной водоносной системы. Баланс водоотбора из верхнеказанского горизонта в разных пропорциях будет формироваться за счет его пластовых вод, воды, перетекающей из вышележающих нижеустьинских и аллювиальных отложений и нижезалегающих нижнеказанских известняков, а также частичного привлечения речных вод. В этих разнородных источниках содержание стронция различно, поэтому результат их взаимодействия может быть количественно достоверным только с помощью решения специально поставленных гидрогеодинамических и геомиграционных задач. В пользу высказанных предположений свидетельствует, например, устойчивый тренд к снижению содержания стронция с 8,5 до 6,9 мг/л в ходе 10-суточной кусто-

вой откачки из верхнеказанского горизонта (скважина 1Ц, 2012 г.).

Для детализации исходной гидрогеохимической обстановки использованы данные, полученные автором в 2012–2013 гг., а также фондовые материалы по опробованию подземных и поверхностных вод при поисково-разведочных работах за 1987–2012 гг., выполненных Плесецкой ГРЭ и ООО «Скала». С 2001 г. наблюдения проводятся на постоянно действующих скважинах 1р и 2р, принадлежащих ООО «Источник Севера». Скважина 1р оборудована на верхнеказанский горизонт, скважина 2р — на минерализованный нижнеказанский.

В 2012–2013 гг. автором в ходе разведочных работ и режимных наблюдений отобраны пробы подземных и поверхностных вод, а также образцы горных пород

(из скважины 1П при бурении). Всего отобрано более 150 проб воды и пород. Места отбора нанесены на карту фактического материала (рис. 2).

Анализы выполнены в лабораториях геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. В пробах воды определено более 30 показателей химического состава по стандартным сертифицированным методикам. Определение стронция в образцах подземных вод выполнено методом ICP-MS (масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой).

В пробах горных пород определено валовое содержание химических элементов методом рентгенфлуоресцентной спектрометрии XRF (табл. 3), а содержание обменных катионов Sr, Ca, Mg, Na, K — методом Пфеффера в модификации Молодцова и Игнатовой [Яковлева, 2009] (табл. 4).

Таблица 3

Результаты определения валового состава пород методом XRF

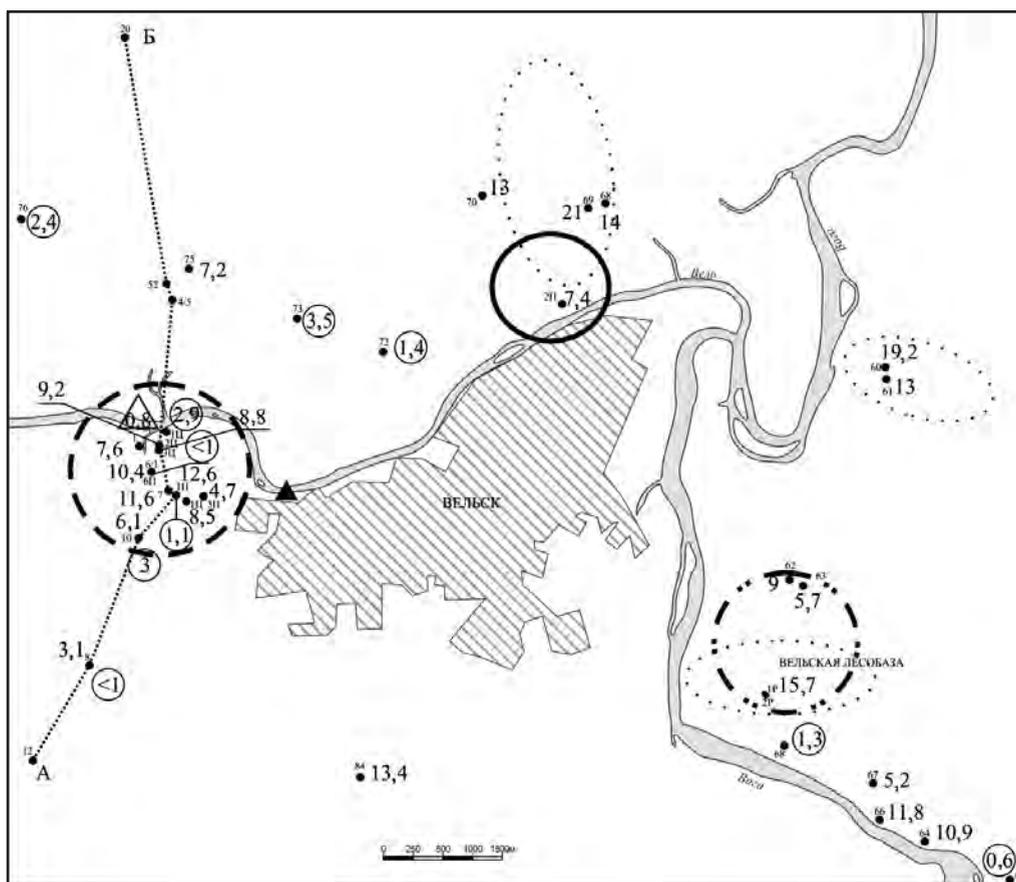
Образец	Глубина, м	Zr	Sr	Fe	Mn	Ca	K	Al	Si	S	Mg
		ppm									
Песок	0–2,5	137	155	14 401	<LOD*	7733	16 956	53 923	289 586	<LOD	<LOD
Суглинок	4,4–4,7	194	167	46 950	771	30 357	21 293	61 553	213 201	<LOD	<LOD
Суглинок	18,2–18,5	202	486	40 222	516	17 160	20 091	66 799	240 226	341	<LOD
Гравий	20,2–29,9	66	205	11 845	324	149 581	6479	16 562	212 901	1192	<LOD
Суглинок	27,1–27,7	36	209	8489	234	212 778	5699	14 265	140 356	1032	<LOD
Песок	29,9–32,6	275	43	7042	<LOD	8013	7899	24 075	311 034	<LOD	<LOD
Известняк	32,7–33,2	11	607	6633	302	244 586	1673	3924	9 249	<LOD	25336
Известняк	41–47	<LOD	1591	2861	<LOD	406 065	3385	<LOD	17 379	<LOD	<LOD
Известняк	47–48	57	3243	15 011	136	252 628	17 412	28 492	100 748	<LOD	<LOD

* <LOD — меньше чувствительности метода определения.

Таблица 4

Результаты определения обменных катионов по методике Пфеффера

Наименование по ГОСТ	Возраст	W	Ca	Mg	Sr	Na	K
		%	мг/л	мг/л	мг/л	мг/л	мг/л
Песок	lgQ ₃ vd	7,6	3,76	2,4	0,04	1,31	0,75
Суглинок	lgQ ₃ vd	24	30,3	12,5	0,36	3,09	3,43
Суглинок	gQ ₂ ms	24	39,5	13,4	0,75	0,88	1,1
Песчано-гравийная смесь	flgQ ₂ dn-ms	4,1	4,21	2,7	0,04	2,79	1,06
Суглинок	flgQ ₂ dn-ms	8,1	5,42	2,2	0,04	0,88	0,29
Песок	P ₂ nu	20,5	12,2	2,8	0,15		
Известняк	P ₂ kz ₂	4,5	8,4	4,1	0,06		
Известняк	P ₂ kz ₂	4,1	6,41	1,3	0,25	0,57	<1
Известняк	P ₂ kz ₁	3,2	9,62	8,5	0,97	0,71	1,68



- Содержание стронция, мг/л:
- (1,7) в подземных водах нижеустьинского горизонта и четвертичного комплекса (P_{ни}-Q_{1,2})
 - 21 в подземных водах верхнеказанского горизонта (P_{кз})
 - △ в р.Вель
 - ▲ поверхностный водозабор г. Вельск
 - 24 ● скважина и ее номер
 - участок Северный (“Левобережный”)
 - ⊖ участок Восточный (“Лесобаза”)
 - ⊙ участок Западный (“Центральный”)
 - ⋯ установленные границы палеоврезов
 - А-Б линия разреза

Рис. 2. Карта фактического материала района исследований

Результаты исследований и их обсуждение. По результатам проведенных испытаний охарактеризован и уточнен химический состав горных пород и подземных вод. Результаты определения валового состава горных пород представлены в табл. 3. По содержанию кремния и кальция породы четко разделяются на терригенные и карбонатные. Наибольшее содержание стронция, как и следовало ожидать, свойственно известнякам казанского яруса нижней перми (до 3243 ppm), причем с увеличением глубины его содержание суще-

ственно возрастает. В моренных суглинках его содержание уменьшается (до 486 ppm), что объясняется их высокой сорбционной емкостью, т.е. возможностью накапливать Sr. Песчаные и супесчаные породы характеризуются наименьшим содержанием Sr (40–210 ppm).

Во всех пробах отмечено высокое содержание железа (до 47 000 ppm), это объясняет его повышенное содержание в подземных водах.

При сопоставлении полученных значений с данными других исследований [Малов, 2003] отмечается

сожее содержание стронция в водовмещающих отложениях (2400 мг/л для казанских и 100–200 мг/л для песчаных отложений современного возраста). Кроме того, выявлено низкое содержание серы в образцах пород (до 1200 ppm), что может свидетельствовать о малой распространенности сульфатных минералов, в том числе целестина (SrSO_4), в то время как именно он (а не стронцианит (SrCO_3)) обычно считается наиболее распространенным минералом стронция в районе работ. Этот факт требует дальнейшего изучения.

Результаты определения обменных катионов Sr, Ca, Mg, Na, K в породах представлены в табл. 4. Полученные значения содержания поглощенных катионов свидетельствуют о незначительном содержании ионов обменного стронция (0,04–0,97 мг/л) по сравнению с количеством обменного магния и кальция в породах, что можно расценивать как относительно низкий обменный потенциал стронция.

Подземные воды *нижнеказанского комплекса* минерализованные (в среднем минерализация 3,1 г/л), сульфатно-гидрокарбонатные магниевые-кальциево-натриевые. Характерно повышенное содержание макрокомпонентов, что может быть вызвано подтоком снизу высокоминерализованных подземных вод из нижнепермских отложений. Воды слабощелочные (рН 7,3), с перманганатной окисляемостью в среднем 1,4 мг O_2 /л. Содержание стронция практически во всех пробах превышает ПДК, в среднем 9 мг/л.

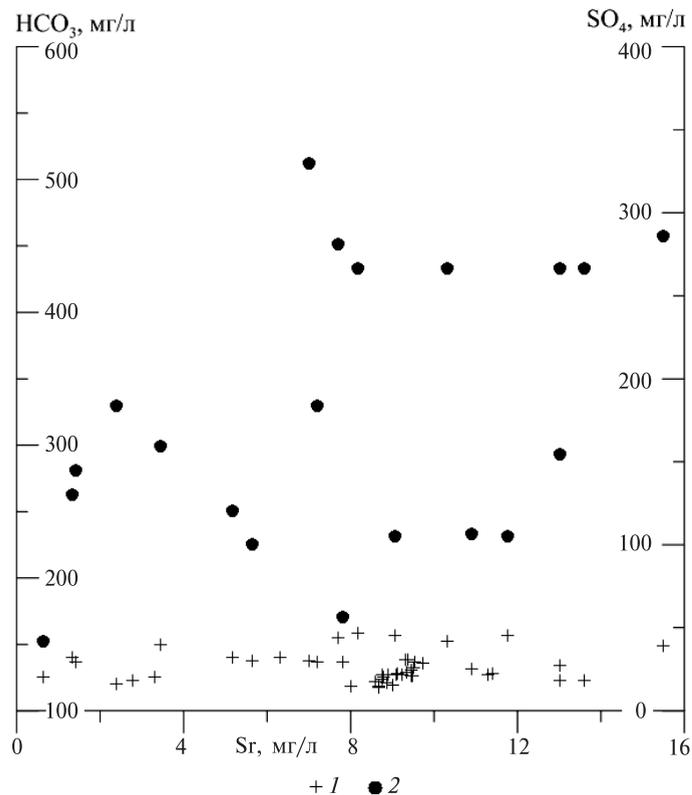


Рис. 3. График зависимости изменения содержания гидрокарбонат-иона, сульфат-иона и стронция (1 — гидрокарбонат-ион, 2 — сульфат-ион)

Установлена тенденция к повышению содержания стронция при увеличении концентрации гидрокарбонат-иона (рис. 3). Подтверждается описанный в работе [Полякова, 2009] факт превышения ПДК для стронция при содержании гидрокарбонат-иона более 400 мг/л. Корреляция концентрации стронция и сульфат-иона при содержании не более 50 мг/л не выявлена. В целом подземные воды, за исключением повышенного содержания стронция и железа, соответствуют нормам ПДК.

Подземные воды *верхнеказанского горизонта* пресные, минерализация около 0,4 г/л, гидрокарбонатные и сульфатно-гидрокарбонатные магниевые-кальциевые со щелочной средой, мягкие (до средней степени жесткости). В местах гидрогеохимических аномалий вследствие смешения с нижележащими водами другого состава наблюдается повышение минерализации (до 3 г/л) и жесткости и изменение состава с преобладанием сульфатов. Резкие изменения в компонентном составе подземных вод верхнеказанского горизонта, как правило, свидетельствуют о находящемся поблизости палеоврезе. Содержание стронция практически во всех пробах выше ПДК (в среднем 8–10 мг/л при колебаниях от 1,85 до 19,2 мг/л). Отмечено превышение ПДК по железу (до 1,9 мг/л) с сопутствующим повышением мутности и цветности воды.

Подземные воды *нижнеустыинского горизонта* гидрокарбонатные, смешанного катионного состава, в большей степени кальциевые, с минерализацией в среднем от 0,2 до 0,3 мг/л, умеренно жесткие с нейтральной реакцией среды. По общему химическому составу они незначительно отличаются от вод верхнеказанского горизонта, с которым имеют тесную гидравлическую связь, однако отмечается значительное понижение содержания стронция (до 4 мг/л, в среднем 1 мг/л).

Воды *аллювиального горизонта*, распространенного в долине р. Вель, изучены по данным единичных опробований. Воды пресные (минерализация ~0,2 г/л), имеют слабощелочную реакцию (~7,6), высокую перманганатную окисляемость (~6,4 мг O_2 /л), что обусловлено малой глубиной залегания аллювиального горизонта. Содержание стронция не превышает 3 мг/л, концентрация железа несколько повышенная (до 0,4 мг/л), что характерно для района в целом. Воды не соответствуют ПДК по перманганатной окисляемости.

В *поверхностных водах р. Вель* вблизи проектируемого водозаборного участка содержание стронция не превышает 2 мг/л, отмечена тенденция к сезонному увеличению в периоды преимущественно подземного питания реки за счет разгружающихся подземных вод с большим содержанием стронция (осень — зима).

Изменение содержания стронция в подземных водах в плане определяется двумя основными факторами. Как уже отмечалось, распределение напоров и направленность подземного стока подчиняется известной схеме А.Н. Мятиева, согласно которой на междуречных пространствах происходит нисходящее питание водоносных горизонтов, далее по пути потока

к дренам находится участок транзита, а вблизи рек — восходящая разгрузка подземных потоков в слоистых толщах. Таким образом, содержание стронция на водораздельных пространствах должно быть существенно ниже, чем в долинах рек. Например, по данным единовременного замера для верхнеказанского горизонта, содержание стронция постепенно возрастает по потоку от 3,1 (скважина 8, рис. 1) до 6,1 (скважина 10) и 7,6 мг/л (скважина 1).

Существование зон anomalно повышенной концентрации стронция (19,2 мг/л в скважине 60, 21 мг/л в скважине 69, рис. 2) можно уверенно связать с положением глубоких древних палеодолин, в пределах которых происходит смешение различных типов вод. Согласно последним данным геофизических исследований, зоны повышенной концентрации стронция строго согласуются с трассированием переуглубленных участков древних долин.

Данные разрозненных наблюдений с 1987 г. свидетельствуют об отсутствии какой-либо закономерной многолетней динамики содержания стронция в естественных условиях подземного стока.

Однако в условиях эксплуатации (скважина 1р, 2003–2013 гг., рис. 4) видна определенная корреляция

между содержанием стронция в подземных водах казанских отложений и интенсивностью водоотбора (рис. 5). Наблюдаемая при этом существенная дисперсия, по мнению автора, свидетельствует о проявлении факторов, определяющих содержание стронция, включая их внутригодовую изменчивость.

По данным за ограниченный период наблюдений в 2011–2012 гг., можно предположить существование закономерной внутригодовой изменчивости содержания стронция в подземных водах. В меженный сезон года, когда внешнее питание практически отсутствует, концентрация стронция в подземных водах повышается. В периоды снеготаяния, половодья и дождевых паводков, когда в водоносные горизонты поступают значительные объемы талых вод, речных вод и атмосферных осадков (все с низким содержанием стронция), напротив, происходит естественное разбавление пластовых вод и снижение концентрации стронция. Соответствующий временной лаг в 6–8 месяцев показан на рис. 6.

Закключение. Формирование стронциевой аномалии на юго-востоке Северо-Двинского артезианского бассейна обусловлено повышенным содержанием преимущественно стронцианита в карбонатных поро-

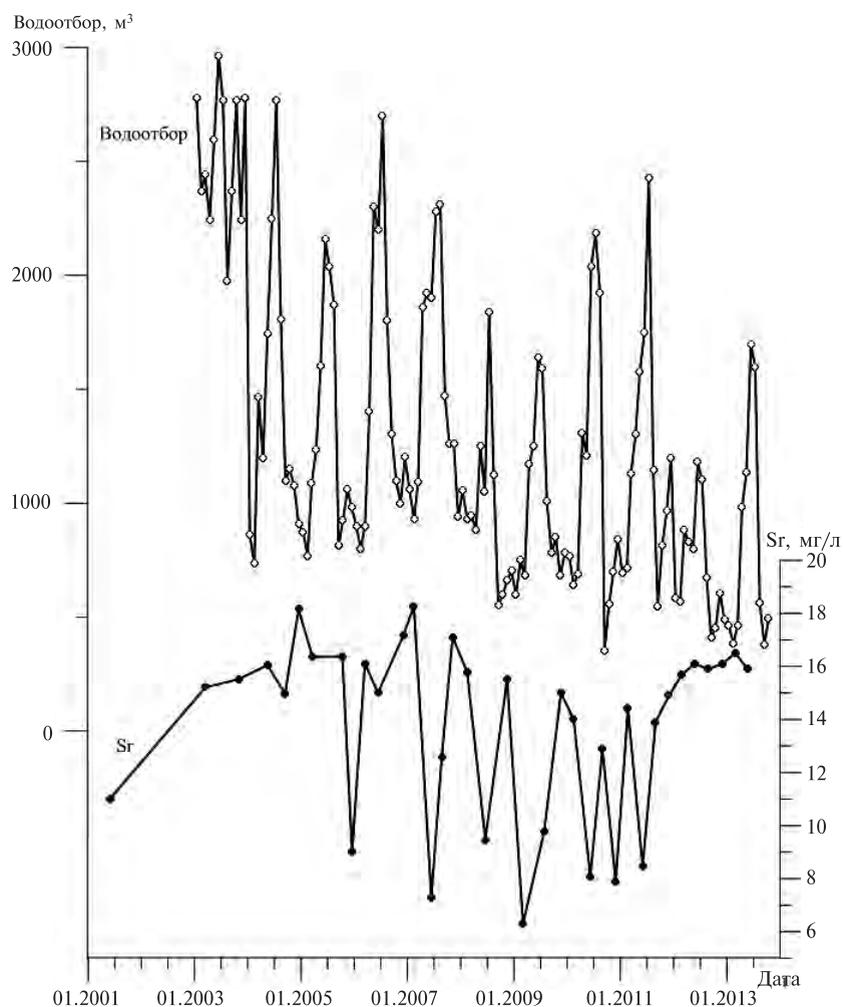


Рис. 4. График изменения содержания стронция и величины водоотбора в скважине 1р

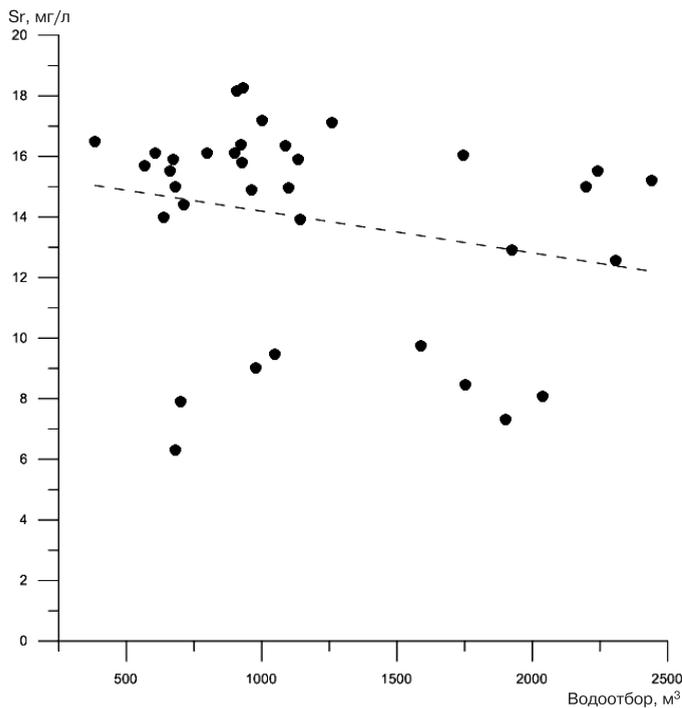


Рис. 5. Корреляция между содержанием стронция и величиной водоотбора в скважине 1р

дах казанского яруса верхней перми. В рыхлые отложения пермского и четвертичного возраста стронций привнесен при переработке материнских пород и за счет миграционного переноса с подземными водами. Естественное распределение стронция в современных потоках подземных вод контролируется, с одной стороны, длительностью и направленностью местного подземного стока от водоразделов к речным долинам, а с другой — наличием переуглубленных палеодолин, обеспечивающих вертикальную взаимосвязь водоносных горизонтов в четвертичных и казанских отложениях.

Во избежание сложной и экономически затратной водоподготовки поиски и разведку подземных вод хозяйственно-питьевого назначения следует проводить там, где при эксплуатации водозаборов возможно внутрислоевое разбавление подземных вод за счет

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алейников М.Л., Клименко И.А. Стронций в природных и сбросных водах и способы его извлечения. М., 1980.
- Глазов Н.П., Стрижевский И.В., Калашикова А.М. Методы контроля и измерений при защите подземных сооружений от коррозии. М.: Недра, 1978.
- ДСАНПН № 136/1940 Вода питна. Гігієнічні вимоги до якості води централізованого господарсько-питного водопостачання. Регистр. № 136/1940 от 15.04.1997.
- Ковальский В.В. Геохимическая среда и жизнь: 21-е чтение имени В.И. Вернадского 12.03.1979 г. М.: Наука, 1982.
- Крайнов С.Р., Швец В.М. Гидрохимия: Учебник для вузов. М.: Недра, 1992. 463 с.
- Кузнецов Ю.В. Основы очистки воды от радиоактивных загрязнений. М.: Атомиздат, 1974.

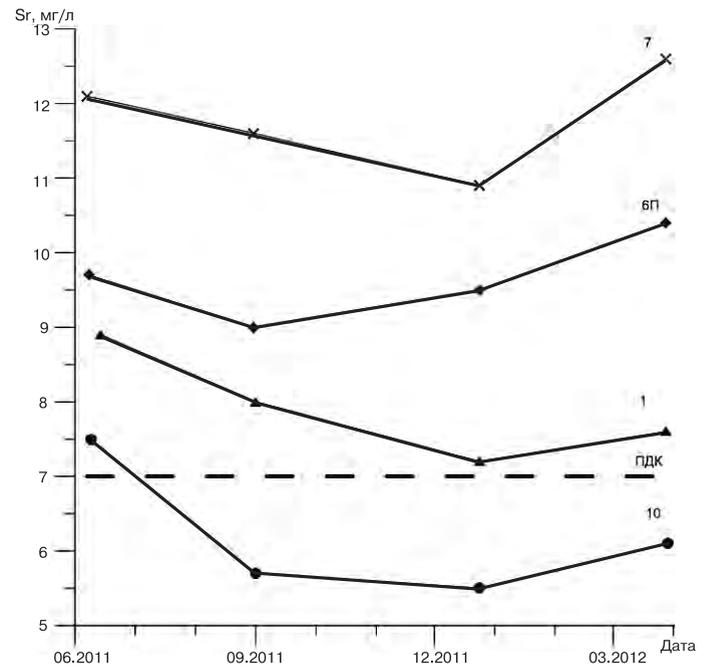


Рис. 6. График изменения содержания стронция по временам года в скважинах на верхнеказанский водоносный горизонт (7, 6П, 1, 10 — номера скважин, ПДК — предельно допустимая концентрация Sr)

дополнительного питания с низким содержанием стронция (перетекание из вышележащих горизонтов, привлечение речных вод). Выявление таких площадей требует разработки средне- и крупномасштабных гидрогеодинамических и геомиграционных моделей. Для их информационного обеспечения необходимо проведение целенаправленных гидрогеологических исследований, т.е. организация специального мониторинга содержания стронция на действующих водозаборах, трассирование конфигурации и глубины палеоврезов, изучение миграционных параметров водовмещающих пород по отношению к стронцию.

Автор статьи выражает благодарность А.В. Артемьеву, А.Ю. Бычкову, И.В. Галицкой, Р.А. Митояну, С.А. Смирновой, Р.С. Штенгелову за помощь, ценные замечания и советы.

Малов А.И. Подземные воды Юго-Восточного Беломорья: формирование, роль в геологических процессах. Екатеринбург: УрО РАН, 2003.

Маерова Е.Д., Долгих О.В. Особенности иммунологических показателей у детей, проживающих в условиях экспозиции стронцием // Акад. журн. Западной Сибири. 2013. Т. 9, № 4 (47).

Полякова Е.В. Стронцийсодержащие воды Юго-Восточного Беломорья, Екатеринбург: УрО РАН, 2009.

Пугач О.П. Исследование и разработка технологии селективного извлечения стронция из рассолов методом ионной флотации. Иркутск, 2002.

Редкие типы минеральных вод Среднерусского артезианского бассейна / Под ред. А.И. Короткова, А.А. Потапова, В.Г. Румынина. СПб.: Наука, 2013.

Савицкая Е.И. Применение волокнистых ионообменных материалов для концентрирования радионуклидов стронция и цезия из воды. Минск: Изд-во Ин-та физико-органической химии НАН Беларуси, 1999.

СанПин 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству питьевой воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. М.: Минздрав РФ, 2001.

Свешникова Д.А., Абакаров А.Н. Электросорбция ионов стронция и кальция на активированном угле // Химия и технология воды. 1993. Т. 15, № 4.

Яковлева Л.В. Практикум по химическому анализу почв. Астрахань: Изд. дом «Астраханский университет», 2009.

Drever J.I. The geochemistry of natural water. Pearson Education Canada, 1988.

Höllriegel V. Influence of human biokinetics of strontium on internal ingestion dose of ^{90}Sr and absorbed dose of ^{89}Sr to organs and metastases // Radiat Environ Biophys. 2008. Vol. 47(2). P. 225–239.

Поступила в редакцию
18.02.2014