

**ГЕОХИМИЯ СТРОНЦИЯ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ В ЮГО-ЗАПАДНОЙ
КРАЕВОЙ ЧАСТИ МОСКОВСКОГО АРТЕЗИАНСКОГО БАССЕЙНА
(ОРЛОВСКАЯ ОБЛАСТЬ)****В. Л. Бочаров, К. А. Селезнев***Воронежский государственный университет**Поступила в редакцию 12 сентября 2012 г.*

Аннотация. *Повышенные содержания стронция в подземных водах верхнего девона Московского артезианского бассейна имеют природный характер. Источником этого элемента являются водонесущие карбонатные породы задонско-оптуховского комплекса, содержащие стронциевые минералы: стронцианит, кальциостронцианит, целестин. Гидрогеодинамические расчеты позволяют прогнозировать продвижение стронциевого фронта загрязнения в юго-восточном направлении на 1058 м за 27 лет.*

Ключевые слова: *геохимия, геоэкология, стронций, подземные воды, источники загрязнения, фильтрационная диффузия, предельно допустимые концентрации.*

Abstract. *Raised contents of strontium in underground waters of the top Devon of the Moscow artesian pool have natural character. Source of this element are the water containing carbonate breeds of a zadonsko-optukhovsky complex containing strontic minerals: stroncianit, calciostroncianit, celestin. Hydrogeodynamic calculations allow to predict advance of the strontic front of pollution in the southeast direction on 1058 m in 27 years.*

Key words: *geochemistry, geoecology, strontium, underground waters, pollution sources, filtrational diffusion, maximum permissible concentration*

Введение

Как известно, в настоящее время основным источником хозяйственно-питьевого водоснабжения являются подземные воды. Однако в районах с интенсивной хозяйственной деятельностью происходит загрязнение подземных вод, ухудшение их качества, сокращение кондиционных ресурсов [1–3]. Кроме техногенных факторов на качество подземных вод влияют и природные факторы. Актуальной проблемой является влияние природного стронциевого загрязнения подземных вод юго-западной периферии Московского артезианского бассейна. По результатам исследований ОАО «Геоцентр-Москва» стронций содержится в количествах, превышающих предельно допустимые концентрации (7 мг/дм³, [4]), в подземных водах водозаборов Тульской, Калужской, Смоленской, Рязанской, Московской областей. Максимальное содержание стронция зафиксировано в южных районах Калужской области – до 65 мг/дм³ [5, 6]. В других областях Центрального федерального округа также отмечаются повышенные содержания

стронция в подземных водах. Однако по причине недостаточной изученности подземных вод действительный масштаб распространения стронция в подземных водах не установлен или стронциевое загрязнение фиксируется локально.

До 2009 года в подземных водах Орловской области наличие повышенных концентраций стронция не отмечалось, и влияние стронциевого загрязнения на качество подземных вод не фиксировалось.

На территории Орловской области стронций содержится в подземных водах задонско-оптуховского водоносного комплекса (D₃zd-op), отделённого от второго по значимости воронежско-ливленского комплекса (D₃vr-lv) слабоводоносным задонским горизонтом (D₃zd). Эти комплексы являются основным источником водоснабжения крупных предприятий и селитебных зон [7].

Основной район стронциевого загрязнения подземных вод находится вне границ Орловской области и превышения предельно допустимых концентрация (ПДК) по стронцию отмечены только в подземных водах северо-западной части (Мценский и Болховской районы). Для сравнения соседние Тульская и Калужская области имеют

значительно большие площади стронциевого загрязнения и гораздо более высокие концентрации (до 65 мг/дм³) этого элемента в подземных водах.

Содержания стронция, превышающие ПДК, являются одним из факторов формирования химического состава подземных вод. Они также оказывают влияние на все объекты, которые, так или иначе, контактируют с задонско-оптуховским карбонатным комплексом: системы водоснабжения крупных промышленных предприятий, животноводческих комплексов, городов и сельских поселений (табл.1).

Таблица 1
Содержание стронция в подземных водах задонско-оптуховского водоносного комплекса

№ п/п	№ скважин	Содержания стронция, мг/дм ³	Предельно допустимые концентрации, мг/дм ³	Превышение, раз
1	54205006	34	7	4,8
2	54205008	15	7	2,14
3	54205011	8,6	7	1,23
4	54201875	10	7	1,43
5	54201890	9,5	7	1,36

Примечание. Использованы данные ОАО «Геоцентр-Москва».

Геохимия стронция

Стронций в природе встречается в виде четырех стабильных изотопов: $^{84}_{38}\text{Sr}$, $^{86}_{38}\text{Sr}$, $^{87}_{38}\text{Sr}$ и $^{88}_{38}\text{Sr}$; содержание их в природной смеси соответственно составляет 0,56; 9,86; 7,02; 82,56 % [8]. Содержание $^{87}_{38}\text{Sr}$ в природных объектах колеблется, так как он образуется при распаде радиоактивного долгоживущего изотопа $^{87}_{38}\text{Rb}$. Последний имеет период полураспада $4,8 \cdot 10^{10}$ лет и составляет 27,85 % от общего содержания рубидия в земной коре. Соотношение стабильных изотопов стронция $^{87}_{38}\text{Sr}$ и $^{86}_{38}\text{Sr}$ широко используется в настоящее время в петрологических исследованиях для решения проблемы источника магматических расплавов – корового или мантийного. Кроме того особое внимание в последнее время привлекает радионуклид стронция $^{90}_{38}\text{Sr}$, образующийся в результате деления ядер $^{235}_{92}\text{U}$ при ядерных авариях по цепочке превращений из $^{90}_{36}\text{Kr}$ и $^{90}_{37}\text{Rb}$. Радиоактивный стронций является сильно токсичным изотопом, β -излучателем с периодом полураспада 28 лет.

По строению атома стронций относится к группе S-элементов ($5S^2$). Его ионный радиус в шестерной координации составляет 1,12 Å, увеличиваясь в соединениях с восьмерной координацией до 1,15 Å. Потенциал ионизации на первый электрон сравнительно невысок – 5,69 eV, на второй электрон – 11,03 eV, поэтому в химических соединениях он чаще всего реализует себя как двухвалентный катион.

Среднее содержание стронция в земной коре незначительно – $3,75 \cdot 10^{-2}$ %. В группе магматических пород содержание этого элемента последовательно возрастает от магматических пород к кислым и щелочным: от 10^{-3} до 10^{-2} %. Среди осадочных пород этот элемент накапливается в глинах ($3 \cdot 10^{-2}$ %) и в основном в карбонатах ($6,1 \cdot 10^{-2}$ %).

Значительные количества стронция имеются в морских водах (8 мг/дм³). Гораздо ниже содержания этого элемента характерны для поверхностных вод континентов (0,5–2,0 мг/дм³) и подземных вод нормальной солености (1,5–3,0 мг/дм³). В водах минеральных источников содержание стронция значительно возрастает. Так в хлоридно-натриевых минеральных водах и рассолах с йодом и бромом содержание стронция может достигать 20–70 мг/дм³ [9].

Содержание стронция в почвах в среднем составляет $3 \cdot 10^{-2}$ %, но наблюдаются значительные колебания в зависимости от характера почвы. Стронций содержится также в организме животных и в растениях; среднее содержание стронция в живом веществе около 0,002 %. Морские водоросли и организмы способны концентрировать стронций из воды, в них содержание изменяется от 0,05 до 15 % (в пересчете на золу).

В природе известно более двадцати минералов, содержащих стронций. Главными из них являются два минерала: стронцианит – SrCO_3 и целестин (лат. «небесный») – SrSO_4 . В первом минерале содержание оксида стронция составляет 70,2 %. Известна также разновидность стронцианита – кальциостронцианит с содержанием CaO до 13%. Растворимость стронцианита при $T^\circ \text{C} = 18$ и $P_{\text{CO}_2} = 1$ ат. составляет 1250 мг/дм³. В целестине оксида стронция заметно меньше – 56,4 %. Возможно присутствие в этом минерале примесей кальция и бария. Растворимость целестина при $T^\circ \text{C} = 18$ и $P_{\text{CO}_2} = 1$ ат. колеблется от 65 до 145 мг/дм³. В этих минералах устанавливается совершенный изоморфизм между стронцием, кальцием и барием, примером которых является альстонит $\text{Ca}(\text{Ba},\text{Sr})[\text{CO}_3]_2$. Частичный изомор-

физм возможен между стронцием и редкими землями цериевой группы в карбонатах, следствием чего является возникновение таких минералов, как амбатоаринит $\text{Sr}(\text{Ce}, \text{La}, \dots)[\text{CO}_3]_3\text{O}$ и анкилит $\text{Sr}_3(\text{Ce}, \text{La}, \dots)[\text{CO}_3]_7[\text{OH}]_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. Большинство из них встречаются в природе крайне редко и не представляют промышленного интереса. Промышленными являются два минерала – целестин и стронцианит, образующие гидротермальные целестин-стронцианитовые месторождения; гидротермальные и контактово-метасоматические свинцово-цинковые и свинцово-серебрянные месторождения в карбонатных породах со стронцианитом, реже – с целестином; осадочные месторождения в карбонатных породах [8].

Имеются две основные генетические причины накопления стронция в подземных водах – испарительное концентрирование грунтовых вод в аридной зоне и увеличение минерализации напорных вод при взаимодействии с породами, содержащими сульфаты и карбонаты кальция и стронция. Это распространённые явления и поэтому имеется достаточно много гидрогеохимических провинций, подземные воды которых (грунтовые и напорные) содержат концентрации стронция, превышающие ПДК.

По химическим свойствам стронций сходен с кальцием и барием, занимая промежуточное положение между ними. В соединениях стронций двухвалентен. В ряду напряжений стронций находится среди наиболее электроотрицательных металлов, что обуславливает его большую химическую активность. Стронций является сильным восстановителем, его нормальный электродный потенциал равен 2,89В. В соответствии с величиной нормального потенциала стронций легко вытесняет водород не только из разбавленных кислот, но и из воды, а также вытесняет все тяжелые металлы из растворов их солей.

Металлический стронций быстро окисляется на воздухе, образуя на поверхности желтоватую пленку, в которой, наряду с нормальной окисью SrO , частично содержится перекись SrO_2 и нитрид Sr_2N_2 . При нагревании на воздухе этот элемент воспламеняется, а порошкообразный стронций самовозгорается при комнатной температуре.

С неметаллами стронций соединяется весьма энергично с выделением значительного количества тепла. При повышенных температурах стронций взаимодействует с водородом (выше 200 °С), с азотом (выше 400 °С), с фосфором, се-

рой и галогенами. Стронций почти не подвергается действию концентрированных растворов едких щелочей. Концентрированные кислоты (HNO_3 и H_2SO_4) на стронций действуют слабо; разбавленные – растворяют стронций с образованием соответствующих солей, последние бесцветны. Соли минеральных кислот с анионами Cl^- , Br^- , I^- , NO_3^- – легко растворимы, с анионами F^- , CO_3^{2-} и PO_4^{2-} – труднорастворимы в воде.

Сульфат является слабым осадителем стронция, и поэтому в сульфатных водах всегда могут содержаться концентрации стронция, превышающие его кондиционные содержания. Но в данном случае количество сульфатов не превышает ПДК, и имеет место другое соединение с карбонатом.

Как известно, основные состояния стронция в маломинерализованных подземных водах представлены Sr^{2+} , SrSO_4^0 , SrCO_3^0 . Последние две формы в маломинерализованных водах могут иметь значение только соответственно в сульфатных и карбонатных (при $\text{pH} > 8,5$) водах. Но даже в таких водах значимость этих сульфатных и карбонатных форм не превышает 10–20 %. Поэтому основное состояние стронция в маломинерализованных водах хозяйственно-питьевого назначения – это Sr^{2+} . Отсюда следует, что распределения стронция в маломинерализованных водах должны ограничиваться произведением растворимости наименее растворимого соединения, каковым является SrCO_3 [5].

Описанные в литературе качественные реакции на стронций – реакции осаждения, цветные, флуоресцентные и микрокристаллоскопические, а также наблюдения окрашивания пламени являются недостаточно эффективными и в большинстве случаев могут быть применены только после отделения стронция от других щелочноземельных и щелочных металлов. Наиболее надёжно обнаружение стронция, содержащегося в малых количествах в природных и промышленных объектах, может быть выполнено с помощью таких методов, как масс-спектральный с индуктивной плазмой и атомно-эмиссионный с индуктивной плазмой.

Геологическая обстановка

Химический состав подземных вод в естественных условиях определяется составом водовмещающих пород и совокупностью геологических и гидрогеологических условий, конкретной местности, без изучения которых невозможно провести полноценную оценку и прогноз продвижения некондиционных подземных вод.

В геолого-структурном отношении северо-запад Орловской области приурочен к зоне сочленения Воронежского кристаллического массива (ВКМ) и Московской синеклизы. В геологическом разрезе отчетливо выделяются два различных комплекса пород – кристаллический фундамент, представленный метаморфическими и прорывающими их магматическими образованиями докембрия, и верхний осадочный чехол, сложенный практически горизонтально залегающими породами палеозоя и кайнозоя.

В строении кристаллического фундамента принимают участие образования архея, представленные гранито-гнейсами и мигматитами обоянской серии (AR_1ob) и амфиболитами михайловской серии (AR_2mh). Каждая из этих серий с сопровождающими их интрузивными образованиями основного и ультраосновного состава в совокупности слагают структурный ярус, отражающий докембрийский этап осадконакопления и тектономагматической активизации [10].

Кристаллические образования докембрия перекрываются чехлом осадочных отложений с резким угловым и стратиграфическим несогласием. Осадочный чехол сложен породами палеозойской и кайнозойской эратем.

Палеозойская эратема представлена отложениями эйфельского (ряжский, дорогобужский, клинцовский, мосоловский и чернойский горизонты) и живетского (воробьевский, ардатовский и мулинский горизонты) ярусов среднего девона; франского (таманский, саргаевский, семилукский, петинский, воронежский, евлановский и ливенский горизонты) и фаменского (задонский, елецкий, лебедянский, оптуховский и плавский горизонты) ярусов верхнего девона.

Из отложений девонского возраста наибольший интерес представляют карбонатные породы фаменского яруса, сложенные отложениями лебедянского, оптуховского, плавского, озерского и хованского горизонтов. Подземные воды, заключенные в них, рассматриваются как основные источники хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Задонский горизонт (D_3zd) представлен отложениями довольно пестрого состава (переслаивающиеся мелкозернистые пески, глины, песчаники и известняки). Мощность отложений горизонта колеблется в интервале 10–15 м.

Елецкий горизонт (D_3el) включает серые, зеленовато-серые, неравномерно трещиноватые, глинистые доломитизированные известняки мощностью от 25 до 36 м.

Лебедянский горизонт (D_3lb) распространен повсеместно. Он сложен преимущественно тонкоплитчатыми серыми, зеленовато-серыми, глинистыми, неравномерно доломитизированными, трещиноватыми и кавернозными известняками с прослоями зеленовато-серых глин и песков общей мощностью 9–12 м.

Оптуховский горизонт (D_3op) включает мценские и киселево-никольские слои. *Мценские слои* (D_3mc) представлены серыми, желтовато-серыми, участками закарстованными, доломитизированными известняками мощностью до 5–10 м. *Киселево-никольские слои* (D_3ksn) сложены серыми, иногда зеленовато-серыми известняками с прослоями доломитов, глин и песков мощностью до 15 м. Общая мощность отложений оптуховского горизонта достигает 25 м.

Плавский горизонт (D_3pl) состоит из тургеневских и кудеяровских слоев мощностью до 55 м. *Тургеневские слои* (D_3tr) сложены серыми, трещиноватыми, иногда закарстованными плитчатыми доломитами мощностью 12–25 м. *Кудеяровские слои* (D_3kd) распространены в западной части территории и представлены темно-серыми, сильно доломитизированными известняками и доломитами, трещиноватыми и кавернозными, мощностью до 30 м.

Озерский горизонт (D_3os) сложен чередованием известняков и доломитов с подчиненными прослоями мергелей и глин. Мощность горизонта меняется в широком диапазоне – от 5 до 22 м.

Хованский горизонт (D_3hv) представлен известняками и доломитами от светло-серого до темно-серого цвета. Мощность горизонта 5–18 м.

Таким образом, мощность отложений фаменского яруса довольно не постоянна и меняется в пределах 120–180 м.

Юрская система представлена отложениями келловейского и бат-келловейского ярусов.

Келловейский ярус (J_2k) сложен серыми известковыми глинами мощностью от 8 до 20 м. Распространены эти отложения в основном на водоразделах рек в северной части области исследования.

Бат-келловейский ярус (J_2bt-k). Отложения залегают на сильно размытой поверхности девона, заполняя древние впадины и ложбины до юрского рельефа, имея широкое распространение в центральной и северной части. В литологическом отношении отложения представлены глинами, песками, алевритами, песчаниками. Мощность отложений изменчива и колеблется от 2 до 17 м.

Меловая система представлена исключительно отложениями нижнего мела. В пределах северной части области эти отложения сохранились отдельными фрагментами от последующих размывов только на водораздельных пространствах. Они со значительным стратиграфическим переывом залегают на отложениях средней и верхней юры и характеризуются наклоном в юго-юго-западном направлении. Отложения представлены морскими терригенными образованиями аптского и сеноманского ярусов.

Аптский ярус (K_1a) имеет ограниченное распространение и залегают на отложениях верхней юры. Он представлен переслаиванием голубовато-зеленовато-серых неравномерно глинистых песков, иногда сцементированными в песчаники. Мощность отложений варьирует от 0 до 8 м.

Сеноманский ярус (K_1s) имеет также ограниченное распространение и включает зеленовато-серые, светло-серые разнозернистые, чаще мелкозернистые, слабоглинистые пески. Мощность яруса от 2 до 10 м.

Четвертичные отложения распространены повсеместно, отсутствуя лишь на небольших участках высоких водоразделов и обрывистых склонах долин. Представлены они неоплейстоценом и голоценом.

Неоплейстоцен. Ледниковые отложения, морена ($glds$) распространены на востоке и северо-востоке территории. Залегают отложения на дочетвертичных породах, перекрываются водноледниковыми образованиями времени отступления донского ледника и покровными суглинками. Представлена морена суглинками грубыми красновато-бурыми с включениями гальки, гравия, щебня и валунов разнообразных изверженных пород. Мощность донской морены 10–15 м.

Покровные почвенно-лессовые образования, залегающие на нижнеплейстоценовых отложениях ($L, I-III$), распространены в области донского оледенения и представлены лессовидными суглинками. На склонах водоразделов и балок они переработаны делювиально-солифлюкционными процессами и представлены суглинками плотными с прослоями песков с гравием, галькой и обломками коренных пород. Мощность отложений от 2–4 м до 6 м.

Голоцен. Аллювиальные отложения (aIV) слагают поймы всех рек и ручьев и представлены русловыми и пойменными фациями. Аллювий протягивается вдоль русел рек в виде извилистых полос шириной от нескольких десятков метров до

нескольких километров. Мощность отложений от 0,2 до 8 м. Пойменная фация аллювия представлена песками серыми, желтыми кварцевыми, преимущественно разнозернистыми. Базальный горизонт (мощность 0,5–1,0 м) оснований русловых отложений представлен галькой и щебнем карбонатных пород, реже песчаниками, кремнистыми образованиями.

Гидрогеология

Водоносный современный аллювиальный горизонт (aIV) распространен в пределах русловых и пойменных отложений р. Ока и ее притоков. Водовмещающими породами являются неоднородные по составу супеси, разнозернистые пески, гравий, реже суглинки. Мощность водоносного горизонта от 2 до 5 м. Выдержанного подстилающего водоупора горизонт не имеет. Воды горизонта в основном безнапорные, уровни устанавливаются на глубинах 0,7–4 м. Дебиты колодцев и родников 0,01–0,6 дм³/с, скважин – 0,6–2 дм³/с, коэффициент фильтрации 0,4–10 м/сут. Питание водоносного горизонта осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков и перетока воды из нижележащих горизонтов в бортах долин, а разгрузка происходит в реки и многочисленные ручьи. По химическому составу воды гидрокарбонатные магниевые, хлоридно- или сульфатно-гидрокарбонатные натриево-магниевые с минерализацией 0,2–0,7 г/дм³. Горизонт практического значения для хозяйственно-питьевого водоснабжения не имеет.

Водоносный средне-верхнечетвертичный аллювиальный горизонт ($aII-III$) приурочен к аллювиальным отложениям первой и второй надпойменных террас речных долин. Водосодержащими породами являются разнозернистые пески мощностью от 1 до 3 м. Водоносный горизонт безнапорный, гидравлически взаимосвязан с водами нижележащих горизонтов. Дебиты родников не превышают 0,3–1,3 дм³/с, коэффициенты фильтрации изменяются в пределах 0,05–4 м/сут. Питание осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков, разгрузка происходит в виде нисходящих родников.

По химическому составу воды гидрокарбонатные кальциевые, магниевые, сульфатно-гидрокарбонатные магниевые, хлоридно-сульфатные магниевые с минерализацией 0,3–7 г/дм³. Водоносный горизонт также практического значения для хозяйственно-питьевого водоснабжения не имеет.

Слабоводоносный (локально водоносный) средне-верхнечетвертичный почвенно-лессовый горизонт (L, II-III) развит на водораздельных пространствах и их склонах. Водовмещающими породами являются прослой супесей и песков в толще суглинков. Мощность его непостоянна и изменяется от 1,5 до 7 м. Горизонт безнапорный, глубина залегания уровня в пределах 0,6–4 м, дебит колодцев до 0,5 дм³/с, коэффициенты фильтрации 0,02–1 м/сут. Питание горизонта осуществляется за счет атмосферных осадков, разгрузка – в нижележащие водоносные горизонты, а также в балки и овраги в виде мочажин и родников. По химическому составу воды гидрокарбонатные магниевые-кальциевые с минерализацией 0,3–0,7 г/дм³.

Водоупорный донской ледниковый горизонт (f,lglds) занимает преимущественно водораздельные пространства и их склоны. Горизонт имеет непостоянную мощность (от первых см до 23 м) и сложен валунными суглинками, глинами с включениями щебня. Водоупор способствует формированию на водораздельных пространствах грунтовых вод в покровных и водно-ледниковых отложениях, одновременно являясь барьером на пути проникновения загрязнения в нижележащие водоносные горизонты (комплексы) на участках его распространения.

Водоносный донской водно-ледниковый горизонт (f,lglds) приурочен к водно-ледниковым отложениям времени наступления донского ледника и представлен желтовато-серыми кварцевыми песками с гравием и галькой изверженных и осадочных пород мощностью до 8 м. Дебит родников менее 0,05 дм³/с, коэффициент фильтрации 0,1 м/сут, минерализация 0,23–0,36 г/дм³. По химическому составу воды горизонта преимущественно гидрокарбонатные кальциевые.

Водоупорный келловейский терригенный горизонт (J₂k) распространен на водоразделах и их склонах. Он сложен плотными глинами мощностью от первых см до 30 м. Наличие этого водоупора предопределяет источник питания и степень загрязнения подземных вод ниже залегающих водоносных горизонтов.

Слабоводоносный бат-келловейский терригенный комплекс (J₂bt-k) распространен отдельными фрагментами на севере области. Водовмещающими породами являются разномерные неравномерно-глинистые пески общей мощностью до 13 м, залегающие на размытой поверхности известняков и доломитов лебедянской и оптуховской свит и имеющие с ними гидравличес-

кую связь. Водоупорным перекрытием служат келловейские глины. Водообильность комплекса низкая. Удельные дебиты скважин изменяются в пределах 0,007–0,01 дм³/с, коэффициенты фильтрации водовмещающих пород составляют 0,2–1 м/сут. Питание комплекса происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков и перетекания из смежных горизонтов. Разгрузка вод осуществляется в долинах местной эрозионной сети. По химическому составу воды гидрокарбонатные магниевые-кальциевые с минерализацией 0,3–0,5 г/дм³. Воды комплекса широко используются населением с помощью колодцев.

Водоносный озерско-хованский карбонатный комплекс (D₃os-hv) распространен довольно широко в северной части области на водоразделах и их склонах. Водовмещающими породами являются трещиноватые известняки с прослоями глин и доломитов общей мощностью 17–20 м. Воды комплекса безнапорные, коэффициенты фильтрации не превышает 2 мм/сут. Удельные дебиты скважин незначительны (0,05–0,1 дм³/с). Питание комплекса происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков через перекрывающие отложения и перетекания из смежных горизонтов и комплексов, разгрузка – в виде родников, а также в современный аллювий. По химическому составу воды гидрокарбонатные магниевые-кальциевые с минерализацией до 0,5 г/дм³.

Водоносный плавский карбонатный комплекс (D₃pl) распространен повсеместно. Водовмещающими породами служат серые трещиноватые, иногда закарстованные плитчатые доломиты мощностью до 65 м. Воды безнапорные. Питание комплекса происходит за счет атмосферных осадков и перетока из вышележащих водоносных горизонтов, разгрузка осуществляется в современную овражно-балочную сеть. По химическому составу воды гидрокарбонатные магниевые-кальциевые с минерализацией 0,3–0,5 г/дм³. Водоносный комплекс изучен слабо, однако используется для водоснабжения совместно с задонско-оптуховским комплексом.

Водоносный задонско-оптуховский карбонатный комплекс (D₃zd-op) распространен повсеместно. Водовмещающая толща сложена неравномерно трещиноватыми, в верхней части иногда закарстованными, светло-серыми известняками мощностью 100–132 м. Трещиноватость и закарстованность карбонатных пород с глубиной резко уменьшается. В пойменных частях рек и ручьев водоупорная кровля практически отсутствует. На

водоразделах и их склонах этот комплекс перекрывается глинистыми известняками и мергелями (киселево-никольский водоупор, D_3ksn).

Водоупорным ложем служат плотные разновидности глинистых известняков и глин задонского горизонта (D_3zd) мощностью до 12 м. Подошва и мощность устанавливались по одной из скважин глубиной 614 м. Водоносный комплекс вскрыт и опробован в районе исследования многими эксплуатационными, разведочными и наблюдательными скважинами на воду. Воды комплекса безнапорные. Уровни воды устанавливаются на водоразделах на глубинах 60–83 м, в долинах рек – на глубинах 5–20 м.

Дебиты скважин изменяются в широких пределах от 10 до 70 dm^3/c , удельные дебиты – от 0,5 до 8 dm^3/c . Наибольшая водообильность наблюдается в долинах рек; наименьшая – на водоразделах. Коэффициент фильтрации изменяется от 1 до 15 м/сут. Питание водоносного комплекса осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков и талых вод, разгрузка – в местную гидрографическую сеть. По химическому составу воды гидрокарбонатные кальциево-магниевые с минерализацией 0,4–1,2 г/ dm^3 . Воды задонско-опуховского комплекса являются основным источником хозяйственно-питьевого водоснабжения населения северной части области.

Водоносный воронежско-ливенский карбонатный комплекс (D_3vr-lv) распространен повсеместно, однако в районе исследования стронциевого загрязнения не вскрыт. Водоносный комплекс представлен слабо трещиноватыми известняками, реже доломитами, в верхней части разреза имеющими монолитную текстуру. Водовмещающие породы обладают весьма низкими фильтрационными свойствами. Дебиты скважин не превышают 7,5 dm^3/c , удельные дебиты изменяются в интервале 0,1–0,2 dm^3/c . По химическому составу воды гидрокарбонатно-сульфатные кальциево-магниевые с минерализацией 0,7–1,1 г/ dm^3 .

Все нижележащие водоносные горизонты и комплексы из-за низкой водообильности, глубокого залегания и повышенной минерализации практического интереса для хозяйственно-питьевого водоснабжения, а, соответственно, и для исследования стронциевого загрязнения, не представляют.

Гидрогеодинамика

Для прогноза загрязнения подземных вод методом геофильтрационного моделирования необ-

ходимо получить гидродинамические характеристики пласта, по которому происходит распространение стронция, установить скорость движения естественного потока, учесть дисперсию.

Для установления гидродинамических характеристик были проанализированы результаты опытных откачек, выполненных ТЦ «Орелгеомониторинг», также исследованы фондовые материалы, по которым устанавливались необходимые гидродинамические параметры [6].

При изучении движения стронциевого фронта можно исходить из двух подходов. Первый, более простой, – механизм «поршневого вытеснения» [11], который предполагает простое движение водного потока без образования «язычков». Другой учитывает дисперсию между двумя жидкостями (между той, что содержит стронций, и без него). Он обусловлен микронеоднородностью порового пространства. Такой процесс по В.М. Шестакову называется фильтрационной диффузией [12, 13]. Ниже проведены вычисления по принципу «поршневого вытеснения».

Согласно этому принципу истинная скорость потока согласно закону Дарси, определяется следующим образом:

$$u = \frac{v}{n_a}, \quad (1)$$

где u – истинная скорость потока, (м/сут), v – скорость фильтрации (м/сут), n_a – активная пористость.

$$v = K_\phi I, \quad (2)$$

где, K_ϕ – коэффициент фильтрации (м/сут), I – напорный градиент.

Отношение разности напоров к длине пути фильтрации называется гидравлическим (напорным) градиентом. Чем градиент выше, тем больше скорость движения.

$$I = \frac{\Delta H}{l}, \quad (3)$$

где $\Delta H = H_1 - H_2$ – разность напоров (м); l – длина пути фильтрации (м). Отсюда:

$$u = \frac{K_\phi}{n_a} I, \quad (4)$$

В качестве расчетной формулы коэффициента для безнапорного пласта в условиях установившейся фильтрации используется следующее выражение:

$$K_{\phi} = \frac{0,73Q(\lg R_n/r_0 + 0,217\xi)}{(2H - S_0)S_0}, \quad (5)$$

где Q – дебит скважины ($\text{м}^3/\text{сут}$);

R_n – приведенный радиус при откачке – 1000м;

r_0 – радиус скважины (м);

H – мощность безнапорного водоносного горизонта (м);

S_0 – понижение уровня в скважине (м);

ξ – сопротивление за счет несовершенства скважин (безразмерная величина).

При определении ξ рассчитываются значения l/m и m/r_0 , где l – длина водоприемной части скважины, m – мощность водоносного пласта.

Из формул видно, что для вычисления необходимы основные гидродинамические характеристики исследуемых объектов, такие как Q – дебит, r_0 – радиус скважины, S_0 – понижение уровня в скважине, H – устоявшийся уровень. Гидрогеодинамические характеристики приведены в табл. 2.

Из гидрогеологического описания следует, что основным водоносным комплексом, в котором распространяется стронций, является задонско-оптуховский карбонатный комплекс. Он в соответствии с гидрогеологическим разрезом водозабора ОАО «Орелсельпром» (г. Мценск) залегает повсеместно. Для установления основных миграционных параметров взята самая глубокая скважина водозабора 54205008 (глубина 140 м).

Таблица 2

Поправки на несовершенство условий откачки ξ

l/m	m/r ₀									
	0,5	1	3	10	30	100	200	500	1000	2000
0,05	0,00423	0,135	2,3	12,6	35,5	71,9	94	126	149	169
0,1	0,00391	0,122	2,04	10,4	24,3	42,8	53,8	68,5	79,6	90,9
0,3	0,00297	0,0908	1,29	4,79	9,2	14,5	17,7	21,8	24,9	28,2
0,5	0,00165	0,0494	0,656	2,26	4,21	6,5	7,86	9,64	11	12,4
0,7	0,000546	0,0167	0,237	0,879	1,69	2,67	3,24	4,01	4,58	5,19
0,9	0,000048	0,0015	0,0251	0,128	0,3	0,528	0,664	0,846	0,983	1,12

Таблица 3

Гидрогеологические характеристики скважин в районе исследования водозабора

№ скв.	Q, м ³ /сут	R _n , м	r ₀ , м	H, м	S ₀ , м
54201181	86,40	1000	0,12	66,00	24,20
54201880	190,00	1000	0,15	87,00	18,00
54201879	240,00	1000	0,08	68,00	5,00
54201878	167,60	1000	0,12	70,00	4,00
54202175	259,20	1000	0,08	56,00	3,00
54202176	720,00	1000	0,15	64,00	2,00
54202177	360,00	1000	0,08	65,00	3,00
54201889	216,00	1000	0,16	62,00	10,00
54201888	172,80	1000	0,08	58,00	10,00
54202173	120,00	1000	0,12	60,00	2,00
54205006	285,12	1000	0,10	106,00	3,00
54205008	362,88	1000	0,10	87,00	5,00
54205011	480,00	1000	0,10	100,00	2,00

Согласно формуле (5) вычисляем

$$K_{\phi} = \frac{0,73 \cdot 362,88(\lg 1000/0,10 + 0,217 \cdot 24,9)}{(2 \cdot 87 - 5) \cdot 5} = 2,94 \text{ м/сут}$$

Проведя перпендикуляр к ближайшей изогипсе с отметкой уровня 150 м, из формулы (3) получим:

$$I = \frac{159 - 150}{2500} = 0,0036$$

Согласно формуле (4) и выше полученным результатам скорость естественного потока будет равна:

$$u = \frac{2,94}{0,1} \cdot 0,0036 = 0,10584 \text{ м/сут.}$$

Следовательно, продвижение фронта стронция через 10000 суток (27 лет) составит 1058 м.

Оценим, насколько значительно влияние диффузии на движение границы раздела стронциевых вод и вод, находящихся в кондиционном состоянии. Для этого определим размеры зоны дисперсии. Согласно В.М. Шестакову [12] размеры такой зоны в условиях плоско-параллельного прямолинейного движения определяется по формуле:

$$\Delta l = 4 \sqrt{\left(\frac{D_m + D_0}{v}\right) \frac{vt}{n_0}}, \quad (6)$$

где D_m – коэффициент молекулярной диффузии в пористой среде (м²/сут). Величина D_m варьирует обычно в пределах $10^{-3} - 10^{-5}$ м²/сут;

D_0 – линейный параметр (м), имеющий размерность длины и величину 0,001 – 0,002м;

v – скорость фильтрации, м/сут;

t – время (сут);

n_0 – активная пористость.

Результаты расчетов при максимуме и минимуме обоих параметров помещены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчетов для Δl

D_m , м ² /сут	D_0 , м	Δl , м	Погрешность, %
10^{-3}	0,001	40,2	3,8
10^{-5}	0,002	7,06	0,7
10^{-3}	0,002	40,42	3,8
10^{-5}	0,001	5,7	0,5

Прохождение при расчетной скорости без учета дисперсии будет равно 1058 м. В итоге при разных параметрах D_0 размеры зоны дисперсии будут составлять от 0,5 до 3,8 %. Следовательно, ошибка в оценке расстояния перемещения стронциевого фронта будет незначительной.

Для моделирования переноса фронта была выбрана геофильтрационная модель с шагом сетки 500 м, которая показала, что на пути движения фронта в пределах рассчитанных расстояний существенных изменений гидродинамических параметров не имеется, в том числе нет влияющих антропогенных факторов на динамику подземных вод, таких, как крупные водозаборы. Результаты расчетов для скважин показаны в табл. 5.

Таблица 5

Результаты расчетов гидродинамических характеристик для скважин в районе водозабора ОАО «Орелсельпром»

№ скв.	Q, м ³ /сут	R _n , м	r ₀ , м	H, м	S ₀ , м	ξ	K _ф , м/сут
54201181	86,40	1000	0,12	66,00	24,20	4,01	0,1
54201880	190,00	1000	0,15	87,00	18,00	21,80	0,4
54201879	240,00	1000	0,08	68,00	5,00	24,90	2,5
54201878	167,60	1000	0,12	70,00	4,00	9,64	1,4
54202175	259,20	1000	0,08	56,00	3,00	4,01	2,9
54202176	720,00	1000	0,15	64,00	2,00	4,01	9,8
54202177	360,00	1000	0,08	65,00	3,00	11,00	4,5
54201889	216,00	1000	0,16	62,00	10,00	964,00	29,5
54201888	172,80	1000	0,08	58,00	10,00	24,90	1,1
54202173	120,00	1000	0,12	60,00	2,00	21,80	3,2
54205006	285,12	1000	0,10	106,00	3,00	24,90	3,1
54205008	362,88	1000	0,10	87,00	5,00	24,90	2,9
54205011	480,00	1000	0,10	100,00	2,00	79,60	18,8

Попадая из водовмещающих, обогащенных стронцием карбонатных пород в водную среду, стронций накапливается в растениях и живых организмах с водой.

Необходим всесторонний контроль и постоянное наблюдение за концентрацией стронция в подземных водах, так как сложная гидрогеологическая обстановка района располагает как к уменьшению, так и к увеличению концентрации природного загрязнителя. Природный стронций в водной среде мало изучен, но по литературным данным не опасен для организма человека [14], хотя и относится к элементам второй группы опасности, а также входит в группу санитарно-токсикологических элементов [4]. Организм человека, потребляющего природную воду с повышенным содержанием этого элемента, адаптируется и не испытывает затруднений в функционировании. Однако длительное употребление такой воды может привести к нарушениям органов пищеварения и кровообращения.

Заключение

В юго-западной части Московского артезианского бассейна на территории Орловской области стронций содержится, главным образом в подземных водах задонско-оптуховского водоносного комплекса, залегающих на глубине ниже 150 м. Этот комплекс является одним из основных источников водоснабжения промышленных и сельскохозяйственных предприятий, а также селитебных зон севера Орловской области. Содержания стронция, превышающие ПДК, являются одним из факторов формирования химического состава подземных вод, а также оказывают влияние на техногенные объекты, которые так или иначе контактируют с одноименным карбонатным комплексом верхнего девона, породы которого характеризуются наличием таких минералов, как стронцианит, кальциостронцианит, целестин. Некондиционные воды с превышением по стронцию связаны с влиянием региональной стронциевой провинции, масштабы которой в пределах Орловской области ранее недооценивались.

Математическая модель геофильтрации позволяет прогнозировать продвижение фронта стронциевого загрязнения подземных вод задонско-оптуховского комплекса в юго-восточном направлении на 1058 м за 27 лет. При расчете долгосрочного прогноза, при условии плоско-параллельного прямолинейного движения подземных вод эффект диффузии оказывает минимальное

влияние, и отклонение составляет от 0,5 до 3,8 % от общего пути продвижения.

Для водоснабжения существующих и проектируемых промышленных и сельскохозяйственных предприятий в зоне влияния стронциевой провинции помимо кондиционных подземных вод задонско-оптуховского водоносного комплекса целесообразно использовать мощности локально залегающего плавского горизонта (D_3pl) предварительно исследовав химический состав и оценив ресурсы его пресных подземных вод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольдберг В. М. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения / В. М. Гольдберг, С. Газда. – М. : Недра, 1984. – 262 с.
2. Бочаров В. Л. Эколого-экономические проблемы рационального использования водных ресурсов Российской Федерации / В. Л. Бочаров, А. Я. Смирнова, В. С. Стародубцев // Высокие технологии в экологии. Тр. I Междунар. науч. тех. конф. Ч. 2. – Воронеж : Мундир, 1998. – С. 69–72.
3. Смирнова А. Я. Экология подземных вод бассейна Верхнего Дона / А. Я. Смирнова, А. И. Бородкин. – Воронеж : Изд-во Воронеж. ун-та, 2003. – 180 с.
4. СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. – М. : Минздрав России, 2001. – 110 с.
5. Селезнев К. А. Стронций в подземных водах Орловской области / К. А. Селезнев // Пути повышения устойчивости растениеводства к негативным техногенным воздействиям : мат. Междунар. науч.-практ. конф. мол. ученых, аспирантов и студентов. – Орел : Орел. гос. агр. ун-т, 2011. – С. 299–301.
6. Селезнев К. А. Подземные воды Орловской области и прогноз их загрязнения в районе животноводческих комплексов : автореф. дис. ... канд. геогр. наук / К. А. Селезнев. – Воронеж : Воронеж. гос. пед. ун-т, 2012. – 23 с.
7. Смольянинов В. М. Подземные воды Центрально-Черноземного региона: условия их формирования, использование / В. М. Смольянинов. – Воронеж : Истоки, 2003. – 240 с.
8. Бочаров В. Л. Экологическая гидрогеохимия. Русско-английский словарь-справочник основных терминов и понятий / В. Л. Бочаров, Л. Н. Титова, Л. Н. Строгонова. – Воронеж : Воронеж. ун-т, 2004. – 220 с.
9. Бабкина О. А. Геохимия стронция и бария в хлоридно-натриевых минеральных водах и рассолах бассейна среднего течения р. Хопер / О. А. Бабкина // Вестник Воронеж. ун-та. Серия: Геология. – 2011. – № 1. – С. 236–240.
10. Савко А. Д. Геология Воронежской антеклизы / А. Д. Савко // Труды НИИ Геологии Воронеж. ун-та. – Воронеж : Воронеж. ун-т, 2002. – Вып. 2. – 165 с.

11. *Мироненко В. А.* Динамика подземных вод / В. А. Мироненко. – М. : Недра, 1983. – 367 с.

12. *Шестаков В. М.* Гидрогеодинамика / В. М. Шестаков. – М. : Изд-во КДУ, 2009. – 334 с.

13. *Шестаков В. М.* Практикум по динамике подземных вод / В. М. Шестаков, И. П. Кравченко,

И. С. Пашковский. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1975. – 270 с.

14. Аналитическая химия стронция / под ред. Н. С. Полуэктова. – М. : Наука, 1978. – 223 с.

Воронежский государственный университет

В. Л. Бочаров, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой гидрогеологии, инженерной геологии и геоэкологии

Тел. 8 (473) 220-89-80

gidrogeol@mail.ru

Voronezh State University

V. L. Bocharov, Doctor of Geology-Mineralogical Sciences, Professor, Head of Chair of Hydrogeology, Engineering Geology and Geoecology

Tel. 8 (473) 220-89-80

gidrogeol@mail.ru

К. А. Селезнев, аспирант кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и геоэкологии

Тел. 8 (473) 220-89-80

gidrogeol@mail.ru

K. A. Seleznev, graduate student of Chair of Hydrogeology, Engineering Geology and Geoecology

Tel. 8 (473) 220-89-80

gidrogeol@mail.ru