

УДК 554.8.02:551.12

МАССОПОТОКИ СТРОНЦИЯ И БАРИЯ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ РУССКОЙ ПЛИТЫ

© 2004 г. Н. Н. Богданова, В. П. Зверев, И. А. Костикова

Представлено академиком В.И. Осиповым 10.09.2003 г.

Поступило 12.09.2003 г.

Одной из важнейших проблем современной фундаментальной гидрогеологии является исследование массопотоков химических элементов в подземных водах, обусловленных взаимодействием последних с горными породами, которое контролирует химическое выветривание и многие экзогенные геологические процессы.

Масштабы выноса подземными водами макрокомпонентов были оценены ранее [4, 5] как на региональном, так и глобальном уровнях. Несомненно, что для получения более полной картины процессов взаимодействия воды и породы необходимо изучение выноса подземными водами микрокомпонентов, присутствующих в горных породах.

В связи с этим были исследованы гидрогеохимические особенности миграции элементов и оценены массопотоки стронция и бария – химических элементов второй группы Периодической системы Менделеева – сингенетичных карбонатной и частично сульфатной толщам верхнего девона и карбона центральной части Русской плиты. Этот район является водоразделом Балтийского, Черного, Азовского и Каспийского морей, отсюда берут начало крупнейшие реки Европейской части России: Волга, Ока, Дон, Днепр и Западная Двина. Гидрогеологически исследуемая территория представляет собой центральную часть Московского артезианского бассейна (2), гидродинамические особенности и условия формирования химического состава подземных вод которого в основном определяются геологоструктурным строением Московской синеклизы.

Изменение химического состава подземных вод Московского артезианского бассейна подчинено общим гидрогеохимическим закономерностям, на фоне которых выявлены зоны с повышенными концентрациями стронция и бария, обусловленные

более высоким, чем обычно, содержанием сульфатов стронция и бария в горных породах [1].

Основными водовмещающими породами центральной части Московского артезианского бассейна являются известняки и доломиты карбонатной формации, осложненные лагунной сульфатно-доломитовой субформацией нижнетурнейских и верхнефеноменских отложений [2].

Сингенетичный целестин установлен в доломитовой пачке озерской толщи, в периферической части сульфатно-доломитовых зон. Его наиболее мощные и протяженные слои образовались при резкой смене условий осадконакопления на контакте гипсов и доломитов. Несомненно, что эти образования послужили источником для имеющего широкое распространение эпигенетического целестина, который прослеживается в краевой зоне размыва гипсов. Максимальное содержание стронция (более 4000 г/т) наблюдается в породах девонского водоносного комплекса в бассейне р. Дон [3].

Среди минералов бария в исследуемом районе наиболее распространен барит, присутствующий в отложениях карбона. По данным спектральных анализов максимальное содержание бария характерно для терригенно-карбонатных пород каширского горизонта.

Вынос химических элементов подземными водами из толщи горных пород осуществляется в основном из зоны активного водообмена, охватывающей преимущественно два верхних водоносных горизонта. Гидрогеохимически это сравнительно маломинерализованные (200–750 мг/л) гидрокарбонатно-кальциевые, реже магниевые-кальциевые воды со сравнительно большим диапазоном колебания стронция (от 1 до 21 мг/л) и бария (от 0.02 до 0.25 мг/л) (табл. 1).

Термодинамическое моделирование состояний химических элементов в подземных водах известково-доломитовой формации верхнего девона и карбона центральной части Московского артезианского бассейна, выполненное по программе SOLMINEQ [6], показало, что основными формами миграции стронция и бария являются ионы Sr^{2+} и

Таблица 1. Результаты химического анализа подземных вод известняково-доломитовой толщи (мг/л)

Компонент	Водоносные комплексы					
	C ₂	C ₂	C ₁	C ₁	D ₃	D ₃
pH	6.95	7.3	7.35	6.85	7.06	7.37
Минерализация	230	588	588	763	2072	558.5
Cl	15	38	25	38	10.2	15.3
SO ₄ ²⁻	26	95	156	124	1229.9	124.7
HCO ₃ ⁻	126	295	246	397	408.8	427.1
Na ⁺	6.5	20.5	34.2	14.3	65.75	96.1
K ⁺	2.5	12.8	13	9.2	–	–
Ca ²⁺	38	67	64	123	352.7	66.1
Mg ²⁺	12	42	39	39	143.4	23.1
Sr ²⁺	1.2	11.9	20.6	4.4	11.0	12.8
Ba	0.021	0.053	0.15	0.249	0.0	0.0
SiO ₂	4	16	10	16	–	–

Таблица 2. Массопотоки химических элементов в подземных водах Центральной части Московского артезианского бассейна

Бассейн		Площадь, 10 ³ км ²	Модуль стока, л/с · км ²	Массопоток под.вод, 10 ³ л/с	Массопоток, г/с					
море	река				Минерализация	Ca ²⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Sr	Ba
Балтийское	З. Двина	13.54	1.16	15.66	5275.62	1340.81	558.91	379.54	57.58	0.21
Черное	Днепр	33.26	1.75	58.26	21327.76	4230.48	2109.49	394.41	154.85	1.18
Азовское	Дон	15.07	1.79	27.04	10447.79	1618.38	1866.80	427.19	156.41	0.00
Каспийское	Волга	31.21	1.72	53.62	20984.24	4262.87	2505.18	372.42	87.45	4.33
	Ока	90.21	1.76	158.57	72508.52	12643.01	7105.05	1184.71	512.97	10.33
Всего		183.29	1.71	313.15	130543.93	24095.55	14145.43	2758.27	969.26	16.05

Ba²⁺ при на порядок меньших концентрациях нейтральных частиц SrSO₄⁰ и BaSO₄⁰. Моделирование также позволило оценить характер равновесно-неравновесного состояния подземных вод с минеральным веществом известково-доломитовой формации. Установлено, что подземные воды неравновесны с основным породообразующим минералом – кальцитом, и в большинстве случаев равновесны с доломитом. Почти все рассмотренные пробы воды оказались неравновесны со стронцийсодержащими минералами (целестином и стронцианитом). Из барийсодержащих минералов барит большей частью равновесен с подземными водами, а виверит – неравновесен.

Таким образом, изучение равновесно-неравновесного состояния стронциевых и бариевых минералов с подземными водами показывает, что в верхних водоносных горизонтах центральной части Московского артезианского бассейна существуют благоприятные условия для выноса стронция и перераспределения и выноса бария.

Оценка массопотоков подземных вод выполнена по их подземному притоку в реки, который был рассчитан как полусумма расходов водотоков за зимний и летний меженьный период продолжительностью 30 дней, за период с 1981 по 1990 гг., опубликованных в ежегодниках Государственного водного кадастра. Всего были использованы данные по 310 гидрологическим постам в бассейнах рек Волга, Ока, Дон, Днепр, Западная Двина и их многочисленных притоков. Эти данные послужили основой для картирования модулей массопотоков подземных вод в л/с · км² для центральной части Московского артезианского бассейна в масштабе 1 : 500000. В итоге (табл. 2) установлено, что на площади 185.29 · 10³ км² массопоток подземных вод составляет 313 · 10³ л/с при среднем модуле 1.71 л/с · км².

Используя данные нескольких тысяч химических анализов подземных вод, разгружающихся в

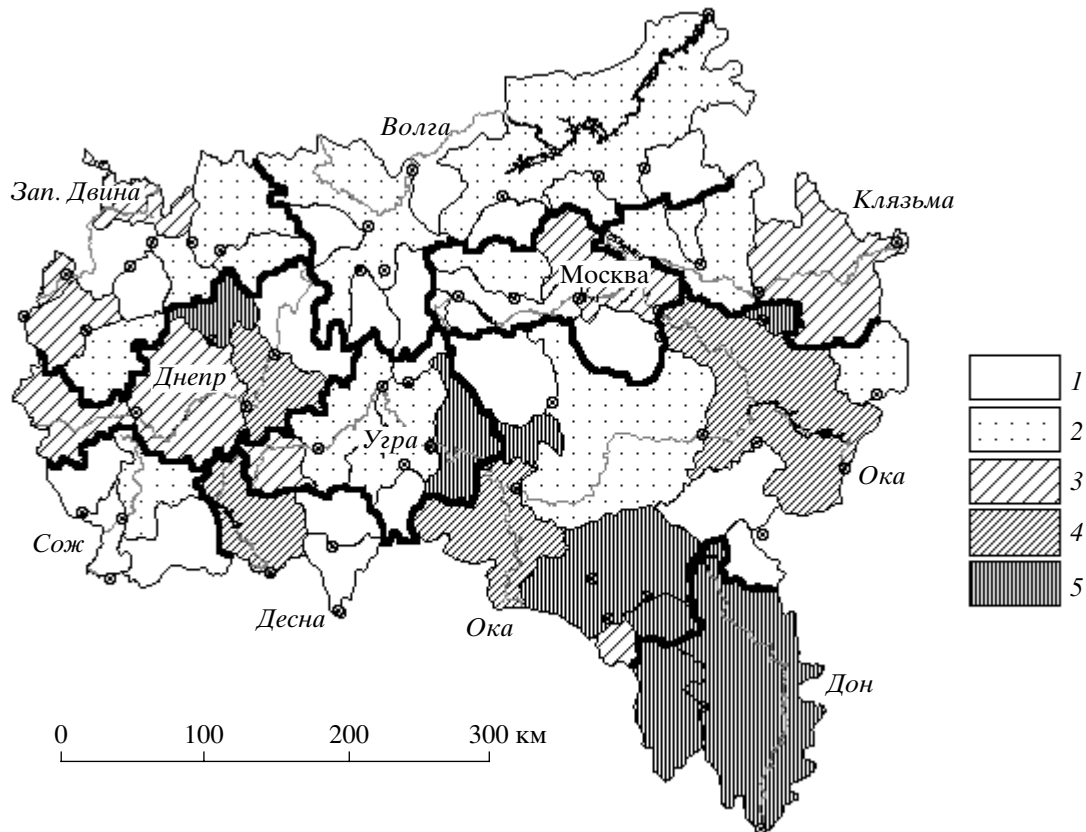


Рис. 1. Массопотоки стронция в подземных водах центральной части Московского артезианского бассейна. Модуль массопотока стронция в подземных водах в $\text{мг/с} \cdot \text{км}^2$: 1 – < 2.5 ; 2 – $2.5\text{--}5$; 3 – $5\text{--}7.5$; 4 – $7.5\text{--}10$; 5 – > 10 .

реки, были оценены массопотоки суммарного выноса химических элементов, а также Ca, SO_4 , Cl, Sr и Ba (табл. 2). Показано, что модули массопотоков стронция меняются от 0.58 до $20.54 \text{ мг/с} \cdot \text{км}^2$, а бария – от 0.006 до $0.364 \text{ мг/с} \cdot \text{км}^2$, т.е. более чем на порядок. На основании большого количества определений впервые было выполнено картирование модулей массопотоков стронция и бария. Рассмотрены только стабильные изотопы этих элементов. Для картирования (М 1 : 500000) ис-

пользованы величины модулей выноса стронция и бария подземными водами в $\text{мг/с} \cdot \text{км}^2$ в пределах сравнительно небольших речных бассейнов. Схемы массопотоков Sr и Ba в подземных водах приведены на рис. 1 и 2.

Картирование модулей массопотоков стронция и бария показывает значительную неоднородность этих показателей на площади изученного региона, которая подчинена следующим зако-

Таблица 3. Массопотоки стронция в подземных водах Центральной части Московского артезианского бассейна

Область дренирования	Площадь, 10^3 км^2	Массопоток подземных вод, 10^3 л/с	Модуль массопотока подземных вод, $\text{л/с} \cdot \text{км}^2$	Средняя концентрация Sr, мг/л	Массопоток Sr, 10^{-3} г/с	Модуль массопотока Sr, $10^{-3} \text{ г/с} \cdot \text{км}^2$
Нижний девон и карбон на юге региона	26.36	38.01	1.44	3.93	152.39	5.78
Девон и нижний карбон на западе региона	33.61	52.23	1.55	6.06	364.68	10.85
Остальная часть бассейна	123.32	222.91	1.80	2.02	452.19	3.67
Центр Московского артезианского бассейна	183.29	313.15	1.71	3.09	949.26	5.29

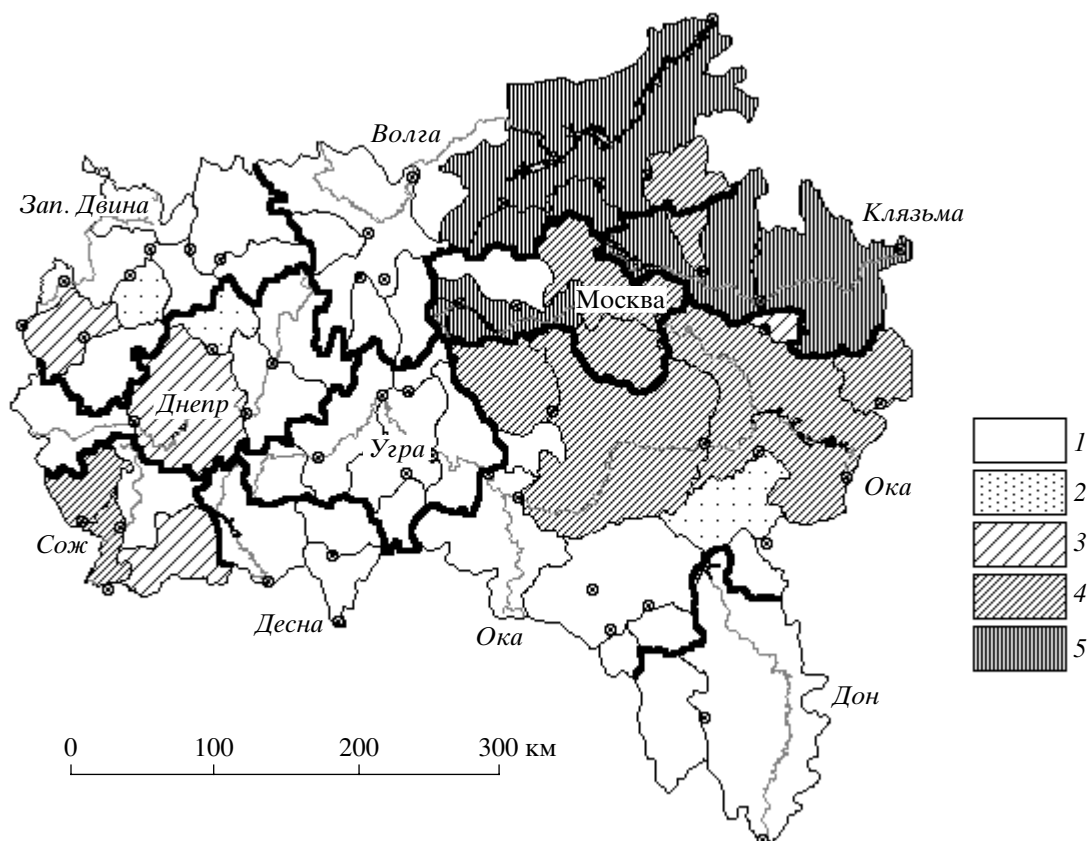


Рис. 2. Массопотоки бария в подземных водах центральной части Московского артезианского бассейна. Модуль массопотока бария в подземных водах в $\text{мг/с} \cdot \text{км}^2$: 1 – < 0.025 ; 2 – $0.025\text{--}0.05$; 3 – $0.05\text{--}0.02$; 4 – $0.01\text{--}0.02$; 5 – >0.2 .

номерностям. Наибольшие значения выноса стронция приурочены к южной и юго-западной частям, где распространены отложения нижнего карбона и девона с повышенным содержанием стронция (рис. 1), а бария – в северо-восточной части территории, где в верхне- и среднекаменноугольных разностях отмечено более высокое содержание этого элемента в известняках и доломитах (рис. 2). Эти закономерности хорошо иллюстрируют табл. 3 и 4, в которых показано, что модули массопотоков стронция и бария в этих районах значительно превышают как средние значения для всей изученной территории, так и

особенно для областей, где содержание стронция и бария в горных породах существенно меньше.

Таким образом установлена четкая связь между содержанием таких элементов, как Sr и Ba, в известняково-доломитовой формации девона и карбона и массопотоками этих элементов в подземных водах. Считая, что основным источником стронция в породах является целестин, а бария – барит, оценивали интенсивность их выщелачивания в пределах центральной части Русской плиты, которая составила на площади ~ 183 тыс. км^2 соответственно $6.29 \cdot 10^7$ и $0.89 \cdot 10^7$ г/год. Проведенные исследо-

Таблица 4. Массопотоки бария в подземных водах Центральной части Московского артезианского бассейна

Область дренирования	Площадь, 10^3 км^2	Массопоток подземных вод, 10^3 л/с	Модуль массопотока подземных вод, $\text{л/с} \cdot \text{км}^2$	Средняя концентрация Ba, мг/л	Массопоток Ba, 10^{-3} г/с	Модуль массопотока Ba, $10^{-3} \text{ г/с} \cdot \text{км}^2$
Верхний и средний карбон	75.59	138.75	1.83	0.099	13.81	0.183
Остальная часть бассейна	107.64	174.4	1.62	0.013	2.25	0.021
Центр Московского артезианского бассейна	183.23	313.15	1.71	0.051	16.05	0.087

вания позволили впервые количественно оценить и закартировать массопотоки стронция и бария, минералы которых сингенетичны известково-доломитовой толще центральной части Русской плиты. Установлено, что их массопотоки зависят как от содержания этих элементов в горных породах и подземных водах, так и от интенсивности водообмена последних в верхних горизонтах Московского артезианского бассейна.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 02-05-64098а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Богданова Н.Н.* Сергеевские чтения. М.: ГЕОС, 2003. В. 5. С. 313–317.
2. *Гидрогеология СССР. Т. 1. Московская и смежные области.* М.: Недра, 1966. 423 с.
3. *Евсеева В.И.* // Геол. вестн. Центр. р-нов России. 1999. № 4. С. 16–23.
4. *Зверев В.П.* Роль подземных вод в миграции химических элементов. М.: Недра, 1982. 182 с.
5. *Зверев В.П.* Массопотоки подземной гидросферы. М.: Наука, 1999. 97 с.
6. *Perkins E.H., Kharaka Y.K., Gunter W.D., Debraal J.D.* // ACS Symp. Ser. 1990. № 416. P. 117–127.