

УДК 550.42

А.В. Савенко¹, В.С. Савенко², О.С. Покровский³**МИКРОЭЛЕМЕНТЫ В ВОДАХ РОДНИКОВ МОСКВЫ***ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1**Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050, Томск, просп. Ленина, 36**Lomonosov Moscow State University, 119991, GSP-1, Leninskiye Gory, 1**National Research Tomsk State University, 634050, Tomsk, prosp. Lenina, 36*

Приведены данные о содержании главных ионов (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) и растворенных микроэлементов (Rb, Cs, Be, Sr, Ba, B, Si, $\text{P}_{\min}$, V, Cr, Ge, As, Mo, W, Sb, Te, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Ag, Sn, Pb, Al, Ga, Ti, Zr, U) в водах 30 родников Москвы в период зимней межени. Установлены среднегеометрические значения и диапазоны концентрации изученных компонентов, а также корреляционные связи между ними. Выявлено наличие гидрохимической аномалии растворенных железа и марганца на северо-востоке Москвы с превышением ПДК по этим элементам, тогда как на остальной территории города их концентрация практически повсеместно соответствует природному фону.

Ключевые слова: родниковые воды, главные ионы, растворенные микроэлементы, гидрохимические аномалии, Москва.

Data on the content of major ions (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) and dissolved trace elements (Rb, Cs, Be, Sr, Ba, B, Si, $\text{P}_{\min}$, V, Cr, Ge, As, Mo, W, Sb, Te, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Ag, Sn, Pb, Al, Ga, Ti, Zr, U) in the waters of 30 springs in Moscow during the winter low water period are presented. The geometric mean values and ranges of concentration of the studied components, as well as correlations between them, were established. The presence of hydrochemical anomalies of dissolved iron and manganese in the north-east of Moscow with an excess of maximum allowable concentration (MAC) for these elements was revealed, whereas in the rest of the city their concentration almost everywhere correspond to the natural background.

Key words: spring waters, major ions, dissolved trace elements, hydrochemical anomalies, Moscow.

Введение. Опробование родников — важный элемент эколого-геохимического мониторинга, поскольку состав постоянно обновляющихся родниковых вод отражает текущий уровень загрязнения геологической среды (почвенно-грунтовых толщ). Родники Москвы ранее неоднократно становились объектами гидрогеологических и эколого-геохимических исследований [Храменков и др., 1997; Швеиц и др., 2002; Лиманцева, 2004], однако их микроэлементный состав изучен крайне слабо. Вместе с тем многие микроэлементы даже в очень малом количестве обладают сильно выраженной токсичностью, а также служат чувствительными индикаторами различных природных и антропогенных процессов, участвующих в формировании экологического состояния окружающей среды. Цель нашей работы заключалась в определении уровня концентрации широкого круга растворенных микроэлементов в водах родников Москвы и выявлении проблемных территорий, нуждающихся в более детальном обследовании.

Материалы и методы исследований. Характеристика объектов исследований. Для получения репрезентативной выборки было опробовано 30 родников, равномерно распределенных по территории города (рис. 1, табл. 1). Пробы родниковых вод отбирали в период зимней межени, когда они в наименьшей степени подвержены кратковременным флуктуациям химического состава. Все родники представляют собой зоны разгрузки четвертичных и мезозойских (меловых и частично юрских) водоносных горизонтов. Перетекание из нижележащих горизонтов происходит только на локальных участках [Гидрогеология..., 1966; Швеиц и др., 2002].

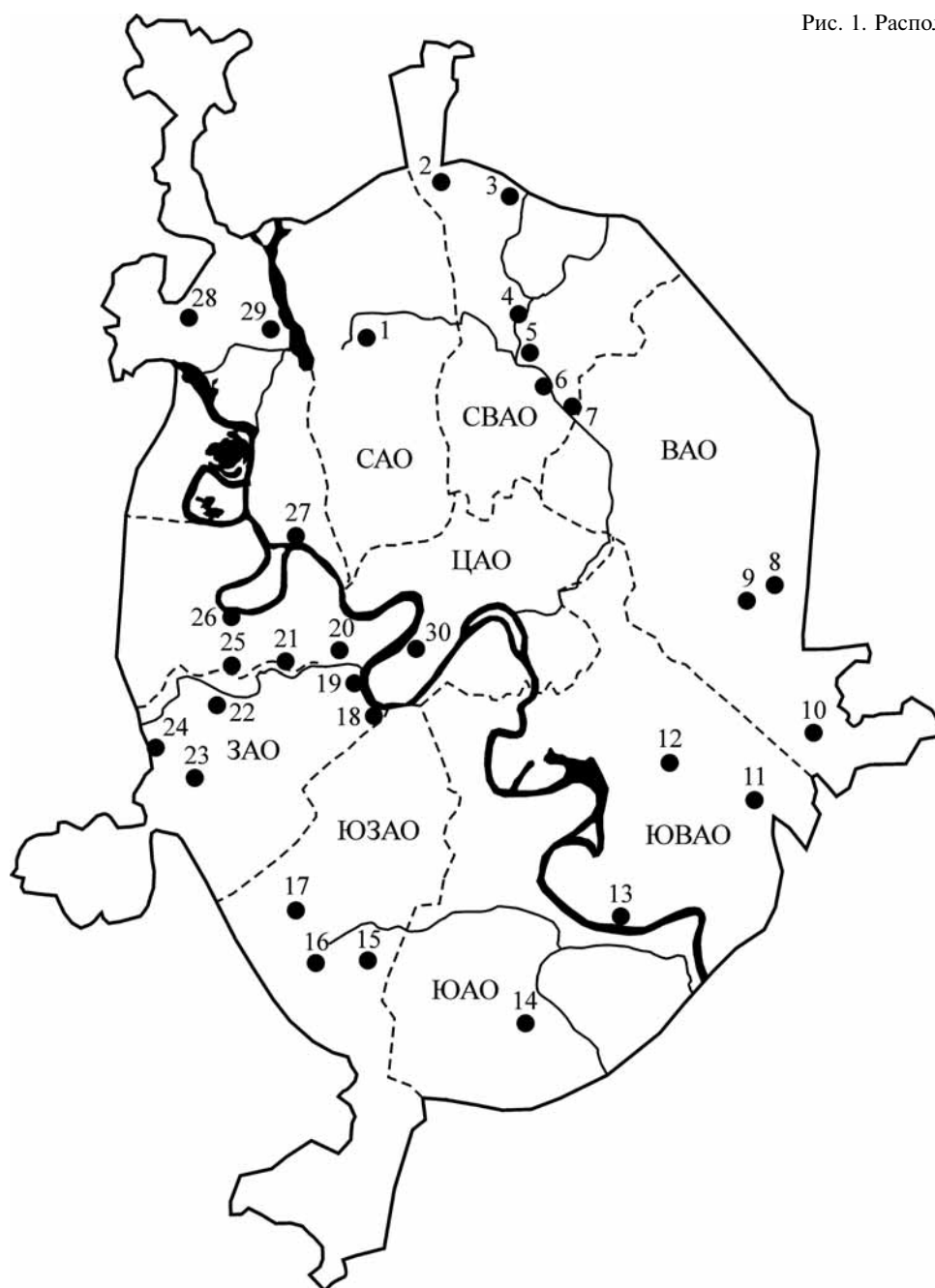
На территории Северного и Северо-Восточного административных округов (АО) родники расположены в районах Коптево, Митино, Свиблово и Отрадное (точки 1–7). Территория этих округов находится в основном в пределах долины р. Яуза, и лишь восточная ее часть — на флювиогляциальной равнине Мещерской возвышенности.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геохимии, ст. науч. с.; e-mail: alla_savenko@rambler.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, профессор, вед. науч. с.; e-mail: alla_savenko@rambler.ru

³ Национальный исследовательский Томский государственный университет, лаборатория биогеохимических и дистанционных методов мониторинга окружающей среды, руководитель лаборатории; e-mail: Oleg.Pokrovski@get.omp.Eu

Рис. 1. Расположение точек отбора проб воды из родников Москвы



Верхнюю часть геологического разреза образуют отложения каменноугольной и четвертичной систем. Водоносные горизонты выделяются в отложениях четвертичного и каменноугольного возраста. Водоносные горизонты аллювиальных, окско-днепровских флювиогляциальных песков и верхнекаменноугольных доломитов образуют объединенный палеозойско-кайнозойский водоносный комплекс. Моренные днепровские суглинки и касимовские глины служат относительными водоупорами, которые разделяют между собой четвертичные и каменноугольные водоносные горизонты. Родники питаются водами мезозойско-кайнозойского водоносного комплекса с участием вод палеозойского водоносного комплекса за счет перетока из каменноугольных отложений.

На территории Восточного АО выходы родников обнаружены в Измайловском парке и Кусковском лесопарке (Вешняки) в пределах волнистого моренно-зандрового ландшафта (т. 8–10). Геологический разрез в рассматриваемом районе представлен до глубины 20 м четвертичными отложениями разных возраста и генезиса. Уровень грунтовых вод находится на глубине 9,5 м во флювиальных песках.

На территории Юго-Восточного АО родники расположены в районах Кузьминки и Марьино (т. 11–13). Район Кузьминки находится в пределах Мещерской зандровой низменности с волнистым морено-зандровым ландшафтом. Геологический разрез территории представлен до глубины 30 м четвертичными отложениями разных возраста

Таблица 1

Описание точек отбора проб воды из родников Москвы

№ точки	Координаты, с.ш., в.д.	Описание места отбора пробы
1	55°49'28", 37°32'17"	Район Коптево, около Большой Академической улицы. Не каптирован
2	55°54'21", 37°35'47"	Северная окраина Лианозовского лесопитомника. Нисходящий, каптирован
3	55°54'15", 37°36'20"	В 700 м на восток от Алтуфьевского пруда, левый берег р. Самотека, в 50 м от МКАД, в основании невысокого склона левого берега реки. Не каптирован
4	55°51'9", 37°37'40"	Около усадьбы Свиблово, на правом берегу р. Яуза, в тыловом шве поймы, в 5 м от уреза воды. Не каптирован
5	55°50'27", 37°38'35"	Территория парка Сад Будущего, в 15 м от северо-восточного берега Леоновского пруда, не каптирован
6	55°49'39", 37°39'45"	В 8 м от левого берега р. Яуза. Восходящий, маломощный, каптирован вертикальной трубой диаметром 20 см, вода дает яркий железистый осадок
7	55°49'59", 37°40'16"	В 15 м от правого берега р. Будайка, в 400 м на север от ж/д платформы Яуза. Нисходящий, не каптирован, вода накапливается в земляной нише
8	55°46'57", 37°48'2"	Измайловский парк. Не каптирован
9	55°46'50", 37°46'7"	Там же, на грунтовой дороге от Главной аллеи к Совхозному пруду. Нисходящий, не каптирован
10	55°44'3", 37°48'20"	Кусковский лесопарк, около Большого пруда. Не каптирован
11	55°41'30", 37°46'22"	Кузьминский лесопарк, рядом с Шибавским прудом, в 10 м от уреза воды р. Пономарка. Не каптирован
12	55°41'27", 37°45'51"	То же, в 30 м от уреза воды р. Пономарка, в тыловом шве поймы. Нисходящий, каптирован подпорной стенкой, из которой выходят две оцинкованные трубы диаметром 3 см
13	55°38'32", 37°43'31"	Марьинский парк. Не каптирован
14	55°36'49", 37°40'45"	Парк Царицыно, правый берег Верхнего Царицынского пруда, в 10 м от уреза воды. Нисходящий, каптирован оцинкованной трубой
15	55°37'56", 37°33'24"	В 900 м на восток от эстакады по Севастопольскому проспекту через р. Чертановка. Нисходящий, не каптирован
16	55°36'50", 37°32'44"	Район Ясенево, Соловьиный проезд. Нисходящий, каптирован
17	55°37'12", 37°32'20"	Битцевский лесопарк, усадьба Узкое. Нисходящий, каптирован
18	55°42'49", 37°32'19"	Бровка оползневого уступа в 330 м на северо-запад от церкви Святой Живоначальной Троицы на Воробьевых горах. Восходящий, каптирован трубой диаметром 40 см, вертикально заглубленной в грунт
19	55°42'29", 37°32'54"	Природный заказник Воробьевы горы, в 40 м вниз по склону от памятника Герцену и Огареву, в тыловом шве террасы оползневого уступа. Нисходящий, каптирован
20	55°43'7", 37°29'10"	Волынский лес, в 100 м от уреза воды р. Сетунь. Нисходящий, не каптирован
21	55°42'49", 37°28'13"	Природный заказник Долина реки Сетунь (Раменки), напротив ул. Веерная, в 25 м от уреза воды реки, на пойме. Не каптирован
22	То же	Там же, выше т. 21. Не каптирован
23	55°42'57", 37°26'47"	Там же, в 70–80 м на северо-восток от пойменного пруда Пятачок, в тыловом шве первой надпойменной террасы, в 50 м от уреза воды реки. Не каптирован
24	55°43'5", 37°29'3"	Волынский лес, в 90 м от уреза воды р. Сетунь на ее правом берегу. Не каптирован
25	55°43'20", 37°30'16"	Природный заказник Долина реки Сетунь, в 20 м вверх по течению реки от Старого Рублевского моста, на правом берегу, в 1,5 м от уреза воды. Не каптирован
26	55°44'45", 37°26'9"	Природно-исторический парк Москворецкий, в 450 м вниз по течению р. Москва от Крылатского моста, в 100 м от уреза воды, у подножия оползневого склона. Нисходящий, каптирован
27	55°46'5", 37°28'44"	Там же, в 200 м вниз по течению р. Москва от Карамышевского моста, на второй надпойменной террасе, в 50 м от уреза воды. Нисходящий, каптирован
28	55°51'18", 37°24'1"	Район Хорошево-Мневники, пойма р. Братовка. Не каптирован
29	55°52'30", 37°26'13"	То же, около ул. Свободы, у остановки «Бутаковский залив», в верховье оврага. Не каптирован
30	55°42'51", 37°34'59"	Район Якиманка, Нескучный сад, в 5 м от уреза воды Андреевского пруда. Восходящий, не каптирован

и генезиса и верхнеюрскими породами. Уровень грунтовых вод находится на глубине 6,0 м в аллювиальных песках.

Южный АО представлен родником в районе Царицыно (т. 14). Территория района находится на третьей надпойменной террасе р. Москва и ее притоков, а также на флювиогляциальной равнине Теплостанской возвышенности на западной окраине. Верхняя часть геологического разреза в Царицыне сформирована отложениями каменноугольного, юрского, мелового и четвертичного возраста. Водоносные горизонты в современных аллювиальных, окско-днепровских флювиогляциальных и нижнемеловых песках образуют объединенный мезозойско-кайнозойский водоносный комплекс, грунтовые воды которого служат главным источником родниковой разгрузки в этом районе. Глинистая толща келловейского яруса средней юры, а также оксфордского и волжского ярусов верхней юры мощностью 14 м создает региональный водоупор, который отделяет вышележащий мезозойско-кайнозойский водоносный комплекс от нижележащего среднекаменноугольного в подольско-мячковских известняках.

На территории Юго-Западного АО родники расположены в районе Ясенево и в Битцевском лесопарке (т. 15–17). Территория района Ясенево находится на моренной равнине Теплостанской возвышенности. Речная сеть представлена р. Чертановка. В гидрогеологическом строении района принимают участие водоносные горизонты в четвертичных, меловых, юрских и каменноугольных отложениях. Водоносные горизонты во флювиогляциальных песках и супесях окско-днепровского и днепровско-московского возраста образуют единый кайнозойский водоносный комплекс общей мощностью 26 м. Нижнемеловые альбские глины служат относительным водоупором, разделяющим кайнозойский и мезозойский водоносные комплексы. Все родники на территории этого округа питаются водами мезозойско-кайнозойского водоносного комплекса.

На территории Западного АО обследованы родники в районах Крылатское (т. 25), Фили-Кунцево (т. 26), Можайский (т. 20, 24) и на Воробьевых горах (т. 18, 19, 21–23).

Большая часть района Крылатское находится в пойме р. Москвы. Основную роль в формировании родникового стока в Крылатском играют мезозойско-кайнозойские отложения. В гидрогеологическом разрезе выделяются водоносные горизонты в аллювиальных песках поймы и третьей надпойменной террасы, а также в нижнемеловых песках, которые составляют объединенный мезозойско-кайнозойский водоносный комплекс. Глины оксфордского и волжского ярусов верхней юры образуют региональный водоупорный комплекс, разделяющий этот водоносный комплекс и водоносный комплекс в известняках среднего

карбона, подземные воды которого имеют напорный характер.

Гидрогеологический разрез района Фили-Кунцево представлен водоносными горизонтами в юрских, меловых и четвертичных песках, которые не имеют четко выдержанных разделяющих их слабопроницаемых пластов и питаются за счет инфильтрации атмосферных осадков и поверхностных водотоков. Это позволяет выделить единый мезозойско-кайнозойский комплекс, который формирует родниковый сток в лесопарке. Средне- и верхнеюрские глинистые отложения келловейского и оксфордского возраста служат региональным водоупором и отделяют мезозойско-кайнозойский водоносный комплекс от объединенного водоносного комплекса в келловей-батских песках средней юры и в известняках верхнего и среднего карбона.

Территория района Можайский находится на Москворецко-Окской моренно-эрозионной равнине в пределах южной увалистой эрозионной Теплостанской возвышенности с древней долиной р. Сетунь.

На Воробьевых горах известняки верхнего и среднего карбона перекрыты толщами юрской, меловой и четвертичной систем. Водоносные горизонты в песчаных отложениях волжского яруса верхней юры, аптского яруса нижнего мела и в четвертичных оползневых песчано-глинистых отложениях образуют совмещенный мезозойско-кайнозойский водоносный комплекс. Келловейские, оксфордские и волжские глины создают региональный водоупор мощностью до 40 м. Водоносный комплекс в известняках верхнего и среднего карбона не влияет на формирование родникового стока.

В Северо-Западном АО родники находятся в районе Хорошево-Мневники (т. 27–29). Здесь волжские пески верхней юры, флювиогляциальные окско-днепровские пески, аллювиальные и местами меловые пески слагают объединенный мезозойско-кайнозойский водоносный комплекс, который играет основную роль в формировании родникового стока. Глинистые отложения волжского и оксфордского ярусов верхней юры представляют региональный водоупор, разделяющий этот водоносный комплекс и объединенный водоносный комплекс в известняках среднего карбона и батских песчаных отложениях средней юры.

На территории Центрального АО родники (т. 30) расположены в районе Якиманка (Нескучный сад). Верхнекаменноугольные отложения представлены мергелями с прослоями глин касимовского яруса. Выше залегают юрские отложения (келловейские и оксфордские глины, волжские пески). В верхней части разреза на волжских песках залегают четвертичные флювиогляциальные и аллювиальные отложения.

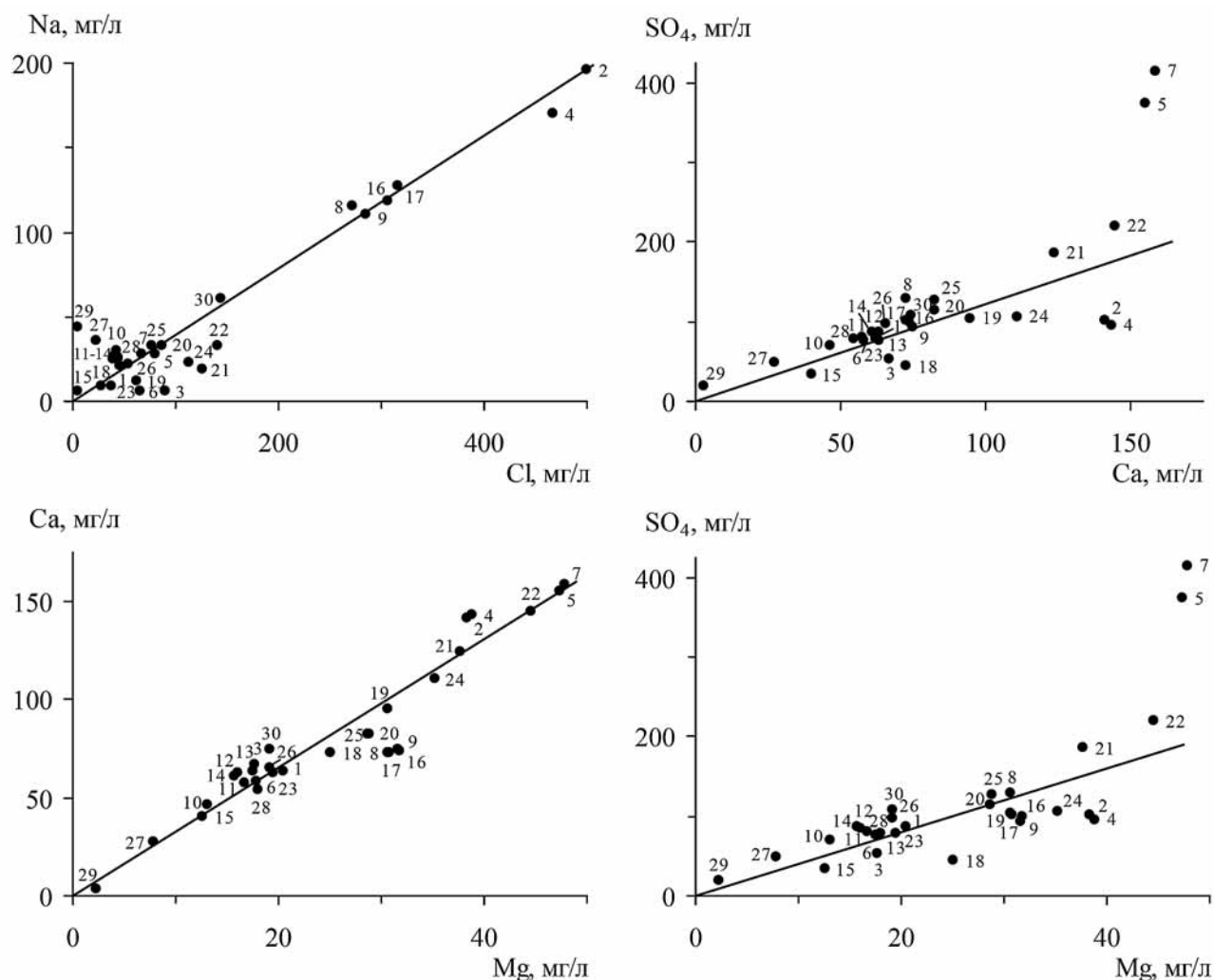


Рис. 2. Взаимосвязь значений концентрации натрия и хлоридов, кальция и магния, а также сульфатов с содержанием кальция и магния в водах родников Москвы. Подписи у значков — номера точек отбора проб

Материалы и методы исследований. Определение общей щелочности ($\text{Alk} \approx \text{HCO}_3^-$), содержания других главных ионов (Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) и фтора выполняли в отфильтрованных через плотный бумажный фильтр пробах объемным ацидиметрическим методом [Лурье, 1971], методом капиллярного электрофореза [Комарова, Каменцев, 2006] и методом прямой ионометрии [Савенко, 1986] соответственно. Концентрацию растворенных микроэлементов измеряли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборе «Agilent 7500ce» в пробах, отфильтрованных сразу после отбора через мембранный фильтр 0,45 мкм в полипропиленовые флаконы с внесенными туда аликвотами 5 N азотной кислоты (0,2 мл на 8 мл пробы). Погрешность отдельных измерений не превышала $\pm 3\%$. Расхождение сумм эквивалентных концентраций катионов и анионов основного солевого состава не превышало 5%.

Результаты исследований и их обсуждение.
Минерализация и компоненты основного солевого состава (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-). Результаты определений содержания главных ио-

нов в водах родников Москвы и их минерализация приведены в табл. 2. Минерализация родниковых вод изменяется в широких пределах: от 188 до 1080 мг/л, однако превышение предельно допустимой концентрации (ПДК) для суммы солей (1000 мг/л [СанПиН..., 2002]) обнаружено только в двух точках (2 и 4), расположенных на северной окраине города, и обусловлено аномально высоким содержанием хлоридов и натрия. В ряде проб (т. 8, 9, 16 и 17) повышенная минерализация (700–750 мг/л) также связана с присутствием хлоридов и натрия, генезис которых не вполне ясен. Некоторая их часть, вероятно, имеет антропогенное происхождение. В трех родниках (т. 5, 7 и 22) повышенная минерализация (750–875 мг/л) сопряжена с высоким содержанием кальция и сульфатов. Между величинами концентрации натрия и хлоридов, а также кальция, магния и сульфатов наблюдаются четко выраженные зависимости (рис. 2), что отражается в значениях коэффициента корреляции (табл. 3). Это указывает на связь повышенной концентрации этих компонентов в родниковых водах с присутствием в составе пород

Таблица 2

Минерализация (*M*) и содержание главных ионов в водах родников Москвы*

№ точки (параметр)	M	Cl ⁻		SO ₄ ²⁻		HCO ₃ ⁻		Na ⁺		K ⁺		Mg ²⁺		Ca ²⁺	
	мг/л	мг/л	%-экв.	мг/л	%-экв.	мг/л	%-экв.	мг/л	%-экв.	мг/л	%-экв.	мг/л	%-экв.	мг/л	%-экв.
1	412	46,3	11,1	87,3	15,5	173	24,1	21,3	7,9	0,98	0,2	20,4	14,3	63,3	26,9
2	1080	500	38,5	102	5,8	101	4,5	196	23,3	2,49	0,2	38,3	8,6	141	19,2
3	344	89,9	24,1	53,2	10,5	108	16,8	5,51	2,3	2,96	0,7	17,8	13,9	66,9	31,7
4	1026	467	37,9	94,3	5,6	110	5,2	170	21,3	2,53	0,2	38,8	9,2	144	20,6
5	859	80,0	8,8	375	30,3	172	10,9	27,4	4,6	1,84	0,2	47,4	15,1	155	30,1
6	332	65,0	18,6	75,7	16,0	107	17,8	5,52	2,4	2,89	0,7	17,8	14,9	58,4	29,6
7	875	67,2	7,2	414	32,9	159	9,9	28,0	4,6	1,53	0,1	47,9	15,0	159	30,2
8	717	272	33,2	129	11,6	93,9	6,7	115	21,6	3,60	0,4	30,6	10,9	72,9	15,7
9	698	285	35,2	92,5	8,4	101	7,2	110	21,0	3,74	0,4	31,6	11,4	74,9	16,4
10	325	42,0	12,6	68,9	15,3	123	21,5	29,8	13,8	0,90	0,2	13,2	11,6	46,7	24,9
11	354	41,3	11,2	80,6	16,1	130	20,5	26,7	11,2	0,82	0,2	16,7	13,2	57,6	27,6
12	428	43,0	10,3	85,1	15,0	193	26,8	26,8	9,9	1,37	0,3	16,1	11,2	62,6	26,5
13	419	40,1	9,7	75,3	13,5	196	27,7	25,0	9,3	0,81	0,2	17,5	12,4	63,6	27,3
14	415	43,8	10,8	86,1	15,6	182	25,9	25,6	9,7	0,74	0,2	15,8	11,3	61,0	26,5
15	235	5,48	2,4	34,6	11,2	135	34,6	6,22	4,2	0,89	0,4	12,7	16,2	39,9	31,0
16	714	306	36,6	99,9	8,8	81,1	5,6	118	21,8	3,33	0,4	31,8	11,1	73,9	15,7
17	752	317	36,5	101	8,6	100	6,7	127	22,6	3,49	0,4	30,8	10,4	72,9	14,9
18	419	28,5	6,8	44,1	7,8	237	33,0	9,38	3,5	1,64	0,4	25,2	17,6	72,9	30,9
19	513	61,8	11,5	104	14,3	208	22,5	12,3	3,5	1,25	0,2	30,6	16,6	94,9	31,3
20	503	86,8	16,0	114	15,5	156	16,7	32,6	9,2	1,91	0,3	28,7	15,4	82,6	26,9
21	636	127	18,0	186	19,5	142	11,7	18,4	4,0	1,25	0,2	37,7	15,6	124	31,1
22	746	141	16,9	219	19,4	162	11,3	32,5	6,0	1,62	0,2	44,6	15,6	145	30,7
23	350	37,2	10,4	78,4	16,1	143	23,1	8,49	3,6	0,96	0,2	19,5	15,9	62,5	30,7
24	585	113	17,7	105	12,1	195	17,7	23,2	5,6	1,82	0,3	35,3	16,1	111	30,6
25	582	77,4	13,2	127	15,9	232	22,9	32,8	8,6	2,00	0,3	28,8	14,3	82,3	24,8
26	407	54,0	12,9	96,6	17,0	149	20,7	22,1	8,1	0,94	0,2	19,2	13,4	65,5	27,7
27	265	23,1	9,0	49,0	14,1	121	27,3	36,2	21,7	1,03	0,4	7,83	8,9	27,1	18,6
28	345	43,9	12,1	77,4	15,8	125	20,0	25,2	10,7	1,11	0,3	18,0	14,5	54,5	26,6
29	188	5,20	3,1	19,3	8,6	113	39,6	43,8	40,7	1,20	0,7	2,23	3,9	3,13	3,3
30	538	144	24,7	109	13,7	123	12,3	60,3	15,9	8,44	1,3	19,1	9,6	74,6	22,6
PB _{сг}	489	72,6	—	93,0	—	140	—	30,0	—	1,66	—	22,1	—	68,6	—
PB _{min}	188	5,20	—	19,3	—	81,1	—	5,51	—	0,74	—	2,23	—	3,13	—
PB _{max}	1080	500	—	414	—	237	—	196	—	8,44	—	47,9	—	159	—
ПВЗВ, по [Шварцев, 1998]	354	15,9	—	18,2	—	222	—	23,8	—	2,74	—	16,5	—	38,3	—
РМ, по [Meybeck, 2004]	85,1	5,92	—	8,40	—	48,6	—	5,52	—	1,72	—	2,98	—	11,9	—

* Здесь и в табл. 4–7: PB_{сг}, PB_{min} и PB_{max} — среднее геометрическое, минимальное и максимальное содержание в родниковых водах Москвы; ПВЗВ и РМ — среднее (взвешенное) содержание в подземных водах зоны выщелачивания умеренного климата и в реках мира соответственно.

гипсо-галитовой примеси, так или иначе взаимодействующей с подземными водами. Наиболее тесные корреляционные связи минерализации отмечены с магнием, кальцием и натрием, а также с хлоридами и в меньшей степени с сульфатами.

Редкие щелочные и щелочноземельные элементы (Rb, Cs, Be, Sr, Ba). За исключением бериллия, концентрация редких щелочных и щелочноземельных элементов в водах родников Москвы не сильно отличается от их среднего содержания в

подземных водах зоны выщелачивания и реках мира (табл. 4). Наблюдается тесная корреляция концентрации рубидия и калия ($r = 0,86$), обладающих очень близкими химическими и геохимическими свойствами. Для цезия значимые корреляционные связи⁴ отмечены с хлоридами ($r = 0,76$), натрием ($r = 0,71$) и барием ($r = 0,75$). В гипергенной геохимии цезия и бария большую роль играют процессы сорбции–десорбции с участием глинистых минералов, что, вероятно, служит

⁴ Здесь и далее рассматриваются корреляционные связи с $r \geq 0,7$.

Таблица 3

Значения коэффициента корреляции между минерализацией и содержанием главных ионов в водах родников Москвы*

Ком- понент	M	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
M	1							
Cl ⁻	0,81	1						
SO ₄ ²⁻	0,59	0,05	1					
HCO ₃ ⁻	-0,15	-0,51	0,15	1				
Na ⁺	0,72	0,95	-0,02	-0,55	1			
K ⁺	0,32	0,45	0,02	-0,38	0,42	1		
Mg ²⁺	0,89	0,53	0,76	0,09	0,36	0,16	1	
Ca ²⁺	0,86	0,47	0,77	0,15	0,30	0,11	0,95	1

* Уровень статистической значимости $p < 0,01$.

причиной возникновения корреляции между этими элементами. Концентрация бария плотно коррелирует с минерализацией ($r = 0,76$) и, аналогично цезию, с хлоридами ($r = 0,94$) и натрием ($r = 0,89$). Для стронция обнаруживается лишь одна значимая корреляционная связь с германием ($r = 0,90$), происхождение которой не ясно.

Концентрация бериллия в родниковых водах изменяется от 0,7 до 10,7 нг/л при среднем содержании 2,5 нг/л. Последняя величина близка к средней концентрации бериллия в водах рек мира (8,9 нг/л), но намного ниже среднего содержания этого элемента в подземных водах зоны выщелачивания умеренного климата (240 нг/л). Значимых корреляционных связей ни с одним из изученных элементов бериллий не образует. До недавнего времени определение низкой концентрации бериллия в природных водах представляло весьма сложную задачу, поэтому не исключено, что оценка С.Л. Шварцевым [1998] его среднего содержания в подземных водах завышена. В то же время концентрация растворенных микроэлементов в подземных водах в большинстве случаев превышает их содержание в речных водах и, возможно, низкое содержание бериллия в родниках Москвы представляет собой региональную особенность. Бериллий относится к чрезвычайно токсичным элементам, величина ПДК в питьевой воде для него составляет 0,2 мкг/л, однако это приблизительно в 80 раз больше среднего и в 20 раз больше максимального содержания в родниковых водах.

Микроэлементы, образующие оксианионы (B, Si, P_{min}, V, Cr, Ge, As, Mo, W, Sb, Te). Многие химические элементы присутствуют в природных водах в форме оксикислот и продуктов их диссоциации — оксианионов. К наиболее распространенным элементам этой группы относятся кремний и фосфор, содержание которых в поверхностных и подземных водах находится на уровне n и $0, n$ мг/л соответственно, тогда как концентрация других элементов на 3–4 порядка ниже и составляет $n-0,0n$ мкг/л.

Таблица 4

Содержание растворенных форм редких щелочных и щелочноземельных элементов в водах родников Москвы

№ точки (параметр)	Rb	Cs	Be	Sr	Ba
	мкг/л	нг/л		мкг/л	
1	0,46	6,1	2,8	246	39,8
2	0,99	43,0	0,8	327	161
3	1,68	1,0	3,4	848	40,6
4	1,00	46,3	0,7	329	161
5	0,53	8,7	1,1	328	40,7
6	1,64	1,6	3,4	858	41,7
7	0,41	6,4	1,5	331	38,8
8	1,61	45,2	6,9	336	159
9	1,69	49,4	6,3	343	159
10	0,37	6,8	10,7	137	23,0
11	0,32	8,3	1,8	154	28,9
12	0,79	8,1	1,9	148	28,3
13	0,31	7,4	3,3	175	31,0
14	0,26	7,4	3,1	147	27,1
15	2,08	2,9	1,0	125	4,0
16	1,60	40,7	6,3	339	160
17	1,51	45,5	10,7	335	158
18	1,28	33,0	2,7	311	17,6
19	0,69	29,6	2,2	387	59,1
20	0,37	16,5	2,5	291	52,9
21	0,38	25,9	1,9	335	76,8
22	0,89	30,9	2,4	367	72,6
23	1,38	3,9	—	234	29,4
24	0,97	54,2	—	387	29,7
25	0,46	15,2	1,6	289	53,2
26	0,43	8,5	2,6	207	35,5
27	0,42	10,8	3,1	117	15,9
28	0,54	9,4	1,5	229	37,0
29	0,51	15,2	2,8	90	7,9
30	4,24	34,7	1,9	320	47,8
PB _{сг}	0,77	13,4	2,5	265	43,3
PB _{min}	0,26	1,0	0,7	90	4,0
PB _{max}	4,24	54,2	10,7	858	161
ПДК, по [Сан-ПиН, 2002]	100	—	200	7000	100
ПВЗВ, по [Шварцев, 1998]	2,55	—	240	185	25,3
РМ, по [Gaillardet et al., 2004]	1,63	11	8,9	60	23

Содержание кремния в водах родников близко к таковому в подземных водах зоны выщелачивания и в реках мира (табл. 5), что обусловлено его поступлением из горных пород, в составе которых преобладают силикаты. Концентрации других оксианионов также сравнимы с их содержанием в подземных водах зоны выщелачивания умеренного климата и в реках мира. Исключение составляет сурьма, поскольку ее среднее содержание в подземных водах зоны выщелачивания почти в 10 раз превышает среднюю концентрацию в родниковых

водах, которая всего лишь на 20% ниже содержания в глобальном речном стоке. Воды всех родников Москвы содержат аниогенные микроэлементы в существенно меньшем количестве по сравнению с ПДК для питьевой воды.

Для родниковых вод прослеживается достаточно плотная корреляционная связь между концентрацией кремния и титана ($r = 0,89$), появление которой связано с тем, что титан, так же, как кремний, относится к основным петрогенным элементам и вместе с ним выщелачивается из силикатных горных пород. Молибден, вольфрам и сурьма значимо коррелируют с железом: $r_{\text{Мо-Fe}} = 0,75$, $r_{\text{W-Fe}} = 0,81$, $r_{\text{Sb-Fe}} = 0,76$. Эти оксианионы активно адсорбируются гидроксидами железа (III) и в условиях гипоксии, когда железо (III) восстанавливается до двухвалентного состояния и образует более растворимые соединения, вместе с железом переходят в раствор.

Тяжелые металлы (Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, Ag, Sn). Химические элементы, относимые к тяжелым металлам, обладают сильной биологической активностью, а при превышении ПДК становятся высокотоксичными веществами. В водах родников Москвы все тяжелые металлы, кроме железа и марганца, содержатся в количестве, зна-

Таблица 5

Содержание растворенных форм аниогенных микроэлементов в водах родников Москвы

№ точки (параметр)	Si	B	P _{min}	V	Cr	Ge	As	Mo	W	Sb	Te
	мг/л	мкг/л							нг/л		
1	5,58	26,5	108	0,83	1,69	0,014	0,45	0,43	86,9	46,9	17,9
2	6,27	15,1	78,8	0,30	0,86	0,020	0,32	0,31	14,7	35,9	13,8
3	6,09	23,9	380	0,10	0,08	0,144	1,91	0,35	57,3	13,3	7,0
4	6,30	15,8	82,0	0,30	0,86	0,018	0,32	0,40	12,3	55,2	9,6
5	5,19	10,6	152	0,16	0,15	0,014	0,52	0,89	118	208	13,2
6	6,02	27,0	413	0,10	0,08	0,145	1,99	0,34	72,2	19,1	9,1
7	4,89	9,9	62,7	0,13	0,12	0,018	0,64	1,18	152	259	12,1
8	6,56	22,7	21,3	0,19	0,67	0,016	0,21	0,03	10,9	36,3	6,3
9	6,64	26,2	24,1	0,22	0,75	0,016	0,22	0,04	18,0	41,4	11,7
10	3,68	35,3	156	0,74	1,03	0,009	0,39	0,43	45,4	49,6	8,2
11	4,04	23,5	208	0,99	2,07	0,006	0,49	0,40	6,7	39,4	10,6
12	4,00	23,5	250	1,00	11,3	0,006	0,45	0,37	6,2	61,1	9,5
13	4,41	24,6	172	0,91	1,40	0,008	0,45	0,41	27,6	39,4	3,9
14	4,00	24,1	194	0,92	1,34	0,005	0,46	0,37	18,8	36,8	8,5
15	8,76	11,2	7,4	0,25	0,23	0,012	0,23	0,39	19,9	118	2,9
16	6,50	23,3	26,0	0,18	1,22	0,018	0,23	0,04	35,1	42,0	15,8
17	6,60	21,5	19,5	0,20	0,74	0,017	0,21	0,03	23,5	34,5	11,6
18	8,93	19,5	117	0,21	4,10	0,017	5,00	0,81	32,6	51,5	7,1
19	7,85	20,6	93,8	0,97	2,78	0,022	0,56	0,44	7,2	48,1	9,9
20	7,40	21,6	470	0,25	1,10	0,016	0,81	0,35	45,1	54,4	9,9
21	7,35	13,6	109	0,95	1,74	0,012	0,31	0,17	2,9	44,8	8,9
22	8,09	11,0	162	0,77	2,13	0,016	0,46	0,19	8,5	30,4	6,6
23	8,22	13,6	39,9	0,49	1,17	0,013	0,34	0,35	9,9	20,6	4,6
24	8,83	22,1	73,1	0,54	0,72	0,014	0,24	0,42	35,9	95,3	7,9
25	7,34	22,4	479	0,26	1,14	0,015	0,83	0,34	82,7	104	19,0
26	4,93	22,0	162	0,94	1,68	0,008	0,45	0,39	1,9	34,8	4,7
27	3,13	55,0	79,9	0,39	0,59	0,012	0,24	0,48	1,0	61,5	2,3
28	5,30	34,9	93,2	0,71	1,52	0,013	0,39	0,46	0,7	42,0	11,5
29	2,49	76,0	11,0	0,02	0,28	0,018	0,09	0,55	2,9	73,0	3,7
30	7,34	62,1	233	5,82	1,17	0,029	2,86	0,23	17,2	122	9,6
PВ _{СГ}	5,82	22,3	94,9	0,38	0,87	0,016	0,47	0,29	16,1	51,0	8,3
PВ _{min}	2,49	9,9	7,4	0,02	0,08	0,005	0,09	0,03	0,7	13,3	2,3
PВ _{max}	8,93	76,0	479	5,82	11,3	0,145	5,00	1,18	152	259	19,0
ПДК, по [Сан-ПиН, 2002]	10	500	—	100	50	—	50	250	50000	50000	—
ПВЗВ, по [Шварцев, 1998]	6,2	55,9	98,2	1,28	2,83	—	1,64	0,89	—	550	—
РМ*	4,07	10,2	38	0,71	0,70	0,0068	0,62	0,42	100	70	—

Примечания: * Si — по [Meubeck, 2004], P_{min} — по [Савенко, Савенко, 2007], остальные элементы — по [Gaillardet et al., 2004].

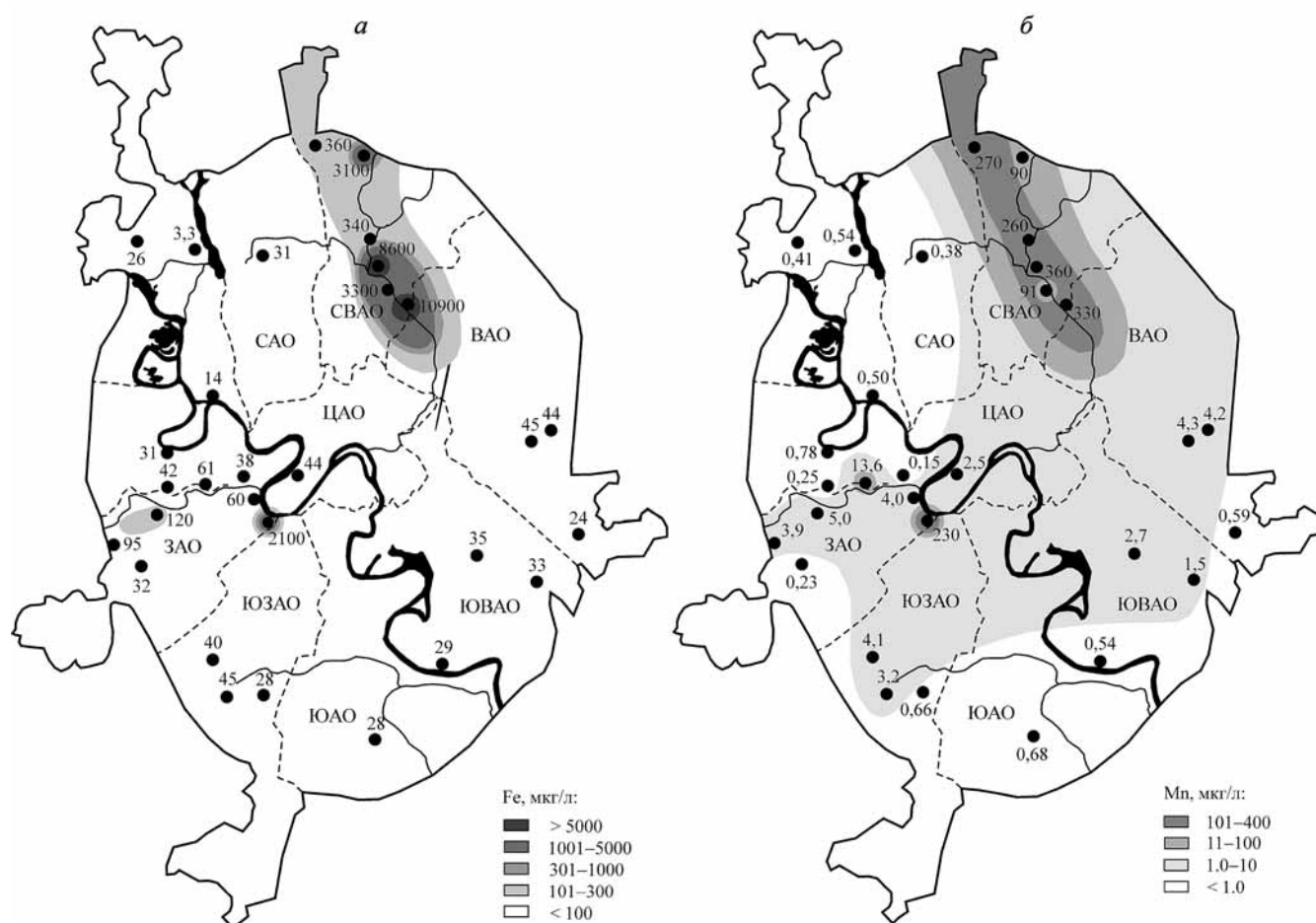


Рис. 3. Пространственное распределение растворенных форм железа (а) и марганца (б) в водах родников Москвы

чительно меньшем ПДК (табл. 6). Концентрация железа и марганца в некоторых пробах (т. 2–7 и 18) превышает ПДК для питьевой воды до 36 и 3,6 раза соответственно. Предшествующее обследование 7 родников [Швец и др., 2002] показало более низкое содержание железа и марганца в пределах 10–330 и ~0–30 мкг/л соответственно, что может быть связано с малочисленностью и неравномерностью отобранных проб. По нашим данным, область максимальной концентрации железа и марганца образует четко выраженную гидрохимическую аномалию на северо-востоке города, тогда как на остальной его территории содержание этих элементов практически везде соответствует природному фону (рис. 3). В том, что отмеченные аномалии не следствие антропогенного загрязнения, убеждает отсутствие в этом районе аномалий других тяжелых металлов.

Величины концентрации растворенных форм железа и марганца тесно коррелируют между собой ($r = 0,77$). Железо, помимо описанных выше связей с молибденом, вольфрамом и сурьмой, также коррелирует с сульфатами ($r = 0,80$) и ураном ($r = 0,84$), а марганец — только с ураном, причем в меньшей степени ($r = 0,72$). Корреляция железа с сульфатами, скорее всего, связана с тем, что оба компонента поступают в подземные воды в

результате окисления пирита вмещающих пород, при котором образуются сульфаты и повышается кислотность водной среды, способствующая переходу железа в растворенное состояние. Для других тяжелых металлов значимые корреляционные связи не установлены.

Элементы-гидролизаты (Al, Ga, Ti, Zr, U).

Содержание элементов-гидролизатов, за исключением урана, в водах родников существенно ниже по сравнению с их концентрацией в подземных водах зоны выщелачивания умеренного климата и в мировом речном стоке (табл. 7). Так, средние значения концентрации алюминия и галлия в водах родников в 8,7 и 5,6 раза меньше, чем в реках мира, и почти на 2 порядка (в 45 и 96 раз соответственно) меньше таковых в подземных водах зоны выщелачивания. Вместе с тем отношения Al/Ga различаются не так сильно, составляя 680, 320 и 1070 для родниковых вод, подземных вод зоны выщелачивания и речного стока соответственно. Учитывая сходство химических и геохимических характеристик алюминия и галлия, последнее обстоятельство можно рассматривать, с одной стороны, как косвенное подтверждение достоверности представленных в статье аналитических данных об этих элементах, а с другой — как свидетельство действия естественных факторов, обуславливаю-

Таблица 6

Содержание растворенных форм тяжелых металлов в водах родников Москвы

№ точки (параметр)	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Pb	Cd	Ag	Sn
	мкг/л							нг/л		
1	0,38	30,9	0,16	0,51	0,66	5,4	0,41	17,7	2,40	57,1
2	272	361	0,09	0,55	1,28	50,6	0,15	14,3	1,40	10,9
3	90,2	3090	0,03	0,11	1,42	32,8	0,35	7,4	1,76	27,2
4	260	338	0,08	0,68	1,52	36,1	0,20	19,8	4,61	21,4
5	357	8640	0,66	1,89	1,05	89,6	0,29	14,3	1,20	15,7
6	91,0	3290	0,03	0,05	0,25	56,7	0,31	4,6	1,28	22,4
7	326	10900	0,63	3,01	0,95	76,1	0,32	12,9	1,06	24,8
8	4,19	44,0	0,09	7,14	2,28	60,5	0,20	47,3	3,36	12,9
9	4,29	44,6	0,09	7,34	2,82	55,6	0,21	35,5	5,37	31,5
10	0,59	24,1	0,24	0,63	0,84	9,9	0,44	—	1,75	33,1
11	1,52	32,9	0,28	1,04	2,45	15,1	0,53	274	0,33	13,6
12	2,68	35,4	0,36	2,40	8,60	27,7	0,60	—	1,74	61,2
13	0,54	29,4	0,24	0,71	0,71	6,8	0,40	168	1,04	28,7
14	0,68	28,1	0,26	0,76	0,74	8,4	0,40	87,1	0,57	24,5
15	0,66	28,2	0,06	0,26	0,94	130	0,23	10,2	0,40	9,0
16	3,21	45,0	1,04	7,56	3,09	63,1	0,37	42,8	11,1	63,3
17	4,14	39,7	0,07	7,19	1,45	126	0,15	30,7	3,45	19,5
18	230	2140	0,29	0,77	1,83	8,8	0,37	20,9	1,47	25,2
19	4,04	60,1	0,05	0,66	1,15	8,2	0,30	10,9	0,71	15,3
20	0,15	38,4	0,08	0,51	0,70	29,7	0,28	9,9	2,01	32,8
21	13,6	61,1	0,05	0,88	2,35	11,3	0,56	37,0	5,92	18,5
22	4,96	120	0,06	1,08	3,44	14,4	0,38	28,6	7,93	18,2
23	0,23	32,5	0,05	0,26	0,51	42,0	0,35	10,0	2,26	2,3
24	3,86	94,7	0,06	1,13	5,08	18,4	0,72	93,6	7,43	59,9
25	0,25	41,5	0,10	1,87	4,69	57,8	0,51	23,1	4,31	106
26	0,78	31,1	0,20	0,90	1,52	8,7	0,41	123	0,34	14,1
27	0,50	13,8	0,18	0,38	0,62	5,7	0,36	26,5	0,12	0,9
28	0,41	25,6	0,13	0,52	1,14	15,5	0,44	32,4	1,06	23,3
29	0,54	3,3	0,10	0,17	0,51	4,5	0,22	21,6	0,42	2,3
30	2,52	44,0	0,76	6,98	1,35	10,7	0,33	74,4	2,92	41,6
PВ _{сг}	4,05	91,1	0,14	0,93	1,37	22,9	0,34	27,7	1,64	19,5
PВ _{min}	0,15	3,3	0,03	0,05	0,25	4,5	0,15	4,6	0,12	0,9
PВ _{max}	357	10900	1,04	7,56	8,60	130	0,72	274	11,1	106
ПДК, по [СанПиН, 2002]	100	300	100	100	1000	5000	30	1000	50000	—
ПВЗВ, по [Шварцев, 1998]	59,2	689	0,34	3,45	4,85	42,8	3,10	150	240	440
РМ, по [Gaillardet et al., 2004]	34	66	0,15	0,80	1,48	0,60	0,079	80	4	—

ших их низкую концентрацию в родниковых водах. Одним из таких факторов может быть контакт вод родников с карбонатными породами и содержащими карбонаты песками и глинами. Растворенные формы алюминия и галлия обладают способностью эффективно сорбироваться на карбонатах кальция и магния, тогда как содержание алюминия и галлия в этих породах, как известно, резко меньше, чем в других главных типах осадочных пород.

Концентрация титана и циркония в водах родников ниже их содержания в подземных водах зоны выщелачивания в 7,5 и 70 раз соответственно, но приближается к средним оценкам для рек мира,

отличаясь от них в 2,4 раза в большую сторону для титана и в 1,8 раза в меньшую сторону для циркония. Среднее содержание урана в водах родников (0,74 мкг/л при диапазоне изменений от 0,01 до 17,6 мкг/л) значимо не отличается от средних значений для подземных вод зоны выщелачивания (0,51 мкг/л) и рек мира (0,37 мкг/л).

Уран, аналогично железу, плотно коррелирует с сульфатами ($r = 0,94$) и сурьмой ($r = 0,81$), что, вероятно, связано с высвобождением этих элементов из оксигидроксидов железа при растворении серной кислотой, образующейся при окислении

Таблица 7

Содержание растворенных форм микроэлементов-гидролизатов
в водах родников Москвы

№ точки (параметр)	Al	Ga	Ti	Zr	U
	мкг/л	нг/л	мкг/л	нг/л	мкг/л
1	2,35	5,5	1,05	70,4	1,91
2	1,79	11,4	1,26	17,0	4,16
3	2,19	6,2	1,47	16,5	0,01
4	3,63	11,4	1,28	14,7	4,20
5	3,64	9,8	1,15	54,1	17,3
6	1,80	6,7	1,52	25,8	0,01
7	3,63	10,4	0,96	66,8	17,6
8	3,90	13,4	1,13	6,3	0,04
9	5,04	13,9	1,20	13,1	0,07
10	2,72	5,3	0,76	26,2	1,04
11	3,04	5,8	0,92	22,2	1,34
12	5,76	5,4	0,99	33,3	1,29
13	3,02	4,8	0,91	28,7	1,47
14	2,80	4,8	0,83	17,3	1,29
15	4,00	1,6	1,48	6,8	0,45
16	6,12	15,7	1,17	41,3	0,04
17	4,31	13,9	1,11	7,1	0,04
18	4,91	7,3	1,64	42,8	0,34
19	3,02	2,9	1,38	54,3	3,01
20	2,74	2,1	1,71	23,9	2,94
21	5,44	3,5	1,41	13,2	2,86
22	12,3	7,0	1,95	12,3	6,39
23	3,58	2,0	1,37	8,1	1,65
24	24,1	8,7	2,03	28,1	1,25
25	3,62	4,5	1,75	46,4	2,93
26	2,32	3,7	0,98	23,9	1,69
27	2,24	2,5	0,62	10,1	0,54
28	3,00	4,1	0,97	41,4	1,64
29	1,76	0,8	0,41	11,9	0,02
30	5,04	4,1	1,54	19,9	1,76
PВ _{сг}	3,66	5,4	1,17	21,5	0,74
PВ _{min}	1,76	0,8	0,41	6,3	0,01
PВ _{max}	24,1	15,7	2,03	70,4	17,6
ПВЗВ, по [Шварцев, 1998]	165	520	8,82	1510	0,51
РМ, по [Gaillardet et al., 2004]	32	30	0,49	39	0,37

пирита. Значимые корреляционные связи с участием других элементов-гидролизатов отсутствуют.

Величина ПДК для алюминия составляет 500 мкг/л [СанПиН..., 2002]. Максимальная концентрация алюминия в родниках Москвы до-

стигает 24 мкг/л, что в 20 раз ниже действующего значения ПДК. Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-

Заключение. Определено содержание макро- и микроэлементов в 30 родниках Москвы в период зимней межени. Среднегеометрические значения концентрации и диапазоны значений для компонентов основного солевого состава и кремния составляют (мг/л): Na^+ 30,0 (5,5–196), K^+ 1,66 (0,74–8,44), Mg^{2+} 22,1 (2,2–47,9), Ca^{2+} 68,6 (3,1–159), Cl^- 72,6 (5,2–500), SO_4^{2-} 93,0 (19,3–414), HCO_3^- 140 (81,1–237), Si 5,82 (2,49–8,93). Соответствующие величины для микроэлементов составляют (мкг/л): Rb 0,77 (0,26–4,24), Cs 0,013 (0,001–0,054), Be 0,0025 (0,0007–0,0107), Sr 265 (90–858), Ba 43,3 (4,0–161), B 22,3 (9,9–76,0), $\text{P}_{\min}$ 94,9 (7,4–479), V 0,38 (0,02–5,82), Cr 0,87 (0,08–11,3), Ge 0,016 (0,005–0,145), As 0,47 (0,09–5,00), Mo 0,29 (0,03–1,18), W 0,016 (0,001–0,152), Sb 0,051 (0,013–0,259), Te 0,0083 (0,0023–0,019), Mn 4,05 (0,15–357), Fe 91,1 (3,3–10900), Co 0,14 (0,03–1,04), Ni 0,93 (0,05–7,56), Cu 1,37 (0,25–8,60), Zn 22,9 (4,5–130), Pb 0,34 (0,15–0,72), Cd 0,028 (0,005–0,274), Ag 0,0016 (0,0001–0,011), Sn 0,020 (0,0009–0,106), Al 3,66 (1,76–24,1), Ga 0,0054 (0,0008–0,016), Ti 1,17 (0,41–2,03), Zr 0,022 (0,006–0,070), U 0,74 (0,01–17,6). Измеренные значения концентрации в пределах порядка величины согласуются со средним содержанием изученных элементов в реках мира и в подземных водах зоны выщелачивания умеренного климата (для последних оценки для Be, Ag, Sn и Sb, полученные ранее с использованием менее точных и чувствительных методов анализа, вероятно, завышены).

Минерализация грунтовых вод Москвы изменяется в широких пределах — от 188 до 1080 мг/л, однако превышение ПДК для суммы солей (1000 мг/л) обнаружено только в двух точках на северной окраине города. Наиболее тесные корреляционные связи минерализации выявлены с магнием, кальцием и натрием, а также с хлоридами и в меньшей степени с сульфатами. Кроме того, существует взаимосвязь между концентрацией отдельных макрокомпонентов: натрия с хлором, магния с кальцием, сульфатов с магнием и кальцием.

Установлено существование гидрохимической аномалии растворенных железа и марганца на северо-востоке Москвы, в пределах которой превышение ПДК по указанным элементам достигает 36 и 3,6 раза соответственно, тогда как на остальной территории города измеренные концентрации практически повсеместно находятся на уровне природного фона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гидрогеология СССР. Т. 1. Московская и смежные области / Под ред. Д.С. Соколова. М.: Недра, 1966.

Комарова Н.В., Каменцев Я.С. Практическое руководство по использованию систем капиллярного электрофореза «КАПЕЛЬ». СПб.: Веда, 2006.

Лиманцева О.А. Условия формирования химического состава родниковых вод на территории Москвы и прогноз его изменения под влиянием техногенной нагрузки: Автореф. канд. дисс. М., 2004.

Лурье Ю.Ю. Унифицированные методы анализа вод. М.: Химия, 1971.

Савенко В.С. Введение в ионометрию природных вод. Л.: Гидрометеиздат, 1986.

Савенко В.С., Савенко А.В. Геохимия фосфора в глобальном гидрологическом цикле. М.: ГЕОС, 2007.

СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. М.: Минздрав РФ, 2002.

Храменков С.В., Матвеев Ю.П., Кузьмина Н.П., Романова Г.И. Оценка качества воды родников // Водоснабжение и санитарная техника. 1997. № 3. С. 5–7.

Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М.: Недра, 1998.

Швец В.М., Лисенков А.Б., Попов Е.В. Родники Москвы. М.: Научный мир, 2002.

Gaillardet J., Viers J., Dupre B. Trace elements in river waters // Treatise on Geochemistry. Vol. 5. Amsterdam: Elsevier–Pergamon, 2004. P. 225–272.

Meybeck M. Global occurrence of major elements in rivers // Treatise on Geochemistry. Vol. 5. Amsterdam: Elsevier–Pergamon, 2004. P. 207–223.

Поступила в редакцию 00.00.2019

Поступила с доработки 00.00.2020

Принята к публикации 00.00.2020