

УДК 504.06/504.4/550.4

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-1-95-104

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ И САНИТАРНО-ХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВОД РОДНИКОВ БОГОРОДСКОГО И ЛОСИНО-ПЕТРОВСКОГО ГОРОДСКИХ ОКРУГОВ МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Дарья Сергеевна Гусарова¹✉, Дарья Андреевна Яблонская²,
Ольга Александровна Липатникова³, Татьяна Николаевна Лубкова⁴,
Ольга Романовна Филатова⁵

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; siren16@yandex.ru ✉

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; daria.yablonskaya@gmail.com

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; lipatnikova_oa@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; tanya_lubkova@mail.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; orlova8313@yandex.ru

Аннотация. Изучен состав вод 12 родников Богородского и Лосино-Петровского округов Московской области. Приводятся результаты определения ряда параметров воды (ХПК, pH, электропроводность), данные о содержании макрокомпонентов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-) и микроэлементов (Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, Sr, Ba, Mn). Воды слабокислые-околонейтральные (pH 5,5–7,5), диапазон величин минерализации от 0,07 до 0,5 г/л, общая жесткость 0,63–5,7 мг-экв/л, состав воды вариативен. По макрокомпонентам родниковые воды разделены на четыре группы: хлоридно-сульфатно-гидрокарбонатные (магниево)-кальциевые; (сульфатно)-гидрокарбонатно-хлоридные натриево-кальциевые; (хлоридно)-гидрокарбонатные кальциевые; смешанный состав. Результаты моделирования форм микроэлементов показали, что для большинства из них основной формой их переноса является свободная, однако для меди и свинца факторами формирования миграционных форм являются преобладающие анионы макросостава воды, а также присутствие органического вещества в воде. Согласно полученным данным, формирование состава родниковых вод связано с инфильтрацией атмосферных осадков через толщу современных отложений, подверженных техногенной нагрузке, о чем свидетельствуют повышенные значения ХПК и содержания нитрат-иона и ионов аммония в водах отдельных родников. Величина остальных санитарно-химических показателей вод (минерализация, pH, общая жесткость, хлориды, сульфаты, магний, натрий, марганец), содержание нормируемых микроэлементов существенно ниже их ПДК в водах хозяйственно-питьевого назначения.

Ключевые слова: воды родников, Богородский округ, Лосино-Петровский округ, родниковые воды, макросостав, растворенные микроэлементы, термодинамический расчет

Для цитирования: Гусарова Д.С., Яблонская Д.А., Липатникова О.А., Лубкова Т.Н., Филатова О.Р. Геохимическая и санитарно-химическая характеристика вод родников Богородского и Лосино-Петровского городских округов Московской области // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 1. С. 95–104.

GEOCHEMICAL AND SANITARY-CHEMICAL CHARACTERISTICS OF WATER SPRINGS OF BOGORODSKY AND LOSIN-PETROVSKY DISTRICTS OF THE MOSCOW REGION

Darya S. Gusarova¹✉, Darya A. Yablonskaya², Olga A. Lipatnikova³,
Tatyana N. Lubkova⁴, Olga R. Filatova⁵

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, siren16@yandex.ru ✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, daria.yablonskaya@gmail.com

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, lipatnikova_oa@mail.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, tanya_lubkova@mail.ru

⁵ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, orlova8313@yandex.ru

Abstract. This paper is the results of evaluated of water parameters (COD, pH, electrical conductivity), the content of major ions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-) and microelements (Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, Sr, Ba, Mn) for 12 springs in the Bogorodsky and Losino-Petrovsky districts of the Moscow region. The waters are slightly acidic-near-neutral (pH 5.5–7.5) with the mineralization from 0.07 to 0.5 g/l, the total hardness is 0.63–5.7 mg-eq/l, the composition of the water is variable. Spring waters are divided into four groups: $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3\text{-(Mg)-Ca}$; $(\text{SO}_4)\text{-HCO}_3\text{-Cl-Na-Ca}$; $(\text{Cl})\text{-HCO}_3\text{-Ca}$; and mixed composition. Based on the thermodynamic calculation using the Visual-MINTEQ, it was found that the predominant dissolved forms of Ba, Sr, Mn, Zn, Cd, Ni, Co in the waters in the waters of the surveyed springs are free ions. For Cu and Pb, the factors for the formation of migration forms are the predominant anions of water, as well as the presence of organic matter in water. COD values and nitrogen compound in the waters of individual springs are indicate that the formation of the composition of spring waters is

associated with the infiltration of atmospheric precipitation through the modern sediments subject to antropogenic press. The values of other sanitary-chemical indicators (mineralization, pH, total hardness, chlorides, sulfates, magnesium, sodium, manganese), the content of standardized microelements are lower than their maximum permissible concentrations in drinking water.

Keywords: Moscow region, spring water, major ions, dissolved trace components, thermodynamic calculation

For citation: Gusarova D.S., Yablonskaya D.A., Lipatnikova O.A., Lubkova T.N., Filatova O.R. Geochemical and sanitary-chemical characteristics of water springs of Bogorodsky and Losin-Petrovsky districts of the Moscow region. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 1: 95–104. (In Russ.).

Введение. Родниковые воды формируются за счет выхода подземных и грунтовых вод на поверхность и играют значительную роль в снабжении населения питьевой водой. Формирование состава родниковых вод происходит за счет просачивания атмосферных осадков через толщу осадочных пород различного литологического состава. При этом, на площади питания родников, популярных среди населения, расположены жилые массивы, оживленные дороги, промышленные предприятия и сельскохозяйственные земли, что приводит к высокой техногенной нагрузке, особенно для вод родников, локализованных в близповерхностных условиях [Липатникова, 2023; Савенко и др., 2020; Жинжакова и др., 2019; Реутова, 2017; Pontara, 2011]. Загрязняющие вещества, фильтруясь вместе со сточными водами, атмосферными осадками и частью поверхностного стока, проникают в первые от поверхности водоносные горизонты, слабо защищенные от возрастающего многофакторного антропогенного воздействия, и изменяют их качество — химический и органолептический состав, физические свойства [Злобина и др., 2019; Каюкова, Котова, 2017; Лукашевич, Чернышова, 2018].

Проведение анализа состава вод родников и сравнение полученных результатов с санитарно-эпидемиологическими нормами с одной стороны обусловлено необходимостью определения степени загрязнения родниковых вод и принятия мер по их защите, с другой стороны — родниковые воды подобны индикаторам, так как они реагируют на любые изменения, происходящие в природных экосистемах и являются хорошими показателями изменений в окружающей среде [Пасечник и др., 2022; Michalik, 2008; Ragno, 2007]. Следует учитывать также, что наряду с определенным вкладом родниковой воды в обеспечение человека необходимыми микроэлементами [Дроздова и др., 2017; Дребенкова, Зайцев, 2016; Воробьева, 2015], сверхнормативное содержание микрокомпонентов в воде может привести к серьезным нарушениям работы физиологических механизмов в организме человека и интоксикации [Буймова, 2006; Нефедьева, 2018; Bertoldi et al, 2011].

Цель работы состояла в исследовании вод родников, расположенных в селитебной (городская и частная застройка) и сельской местности Богородского и Лосино-Петровского городских округов северо-востока Московской области и используемых населением в качестве источников питьевого водо-

снабжения. Богородский городской округ включает 82 населенных пункта, административным центром является город Ногинск [Официальный сайт...]. Лосино-Петровскому городскому округу с одноименным административным центром подчинены 18 населенных пунктов. Население округов составляет около 300 тысяч человек. Низкое качество централизованного водоснабжения, связанное с изношенностью коммуникаций, использованием устаревших технологий, отсутствием капитального ремонта и значительной перегрузкой сетей, обуславливает активное использование вод местных родников для питьевых и хозяйственных нужд.

Техногенная нагрузка на компоненты природной среды городских округов формируется, в первую очередь, за счет промышленности, основными отраслями которой являются: химическое производство; производство материалов, применяемых в медицинских целях, производство пищевых продуктов, включая напитки; производство текстильных, резиновых и пластмассовых изделий; производство прочих неметаллических продуктов; производство машин, электрооборудования, электронного и оптического оборудования и пр. Широко развит агропромышленный комплекс, представленный более чем 20 предприятиями и фермерскими хозяйствами, специализирующимися на молочном и племенном животноводстве, птицеводстве, растениеводстве.

В последние годы рост техногенной нагрузки на территории округов связан со строительством и реконструкцией крупных федеральных автомобильных дорог с сопутствующим появлением крупных складских и транспортно-логистических центров («Атлант-парк», ТЛЦ «Восточный») и активным развитием индустриальных и многофункциональных парков, которые представляют из себя крупные зоны сосредоточения наукоемких высокотехнологичных производств с одновременным развитием социальной инфраструктуры (ИП «Богородск», МП «Успенский»).

Площади городских округов локализованы на территории обширной Мещерской низменности, относящейся к Восточно-Европейской равнине, ландшафт территорий округов определяется рекой Клязьма и ее притоками — Ворей, Шерной и Вохной, в долинах которых расположены выходы родников (табл. 1, рис. 1).

Исследуемый район расположен в пределах развития девонских, верхнекаменно-угольных, верхнеюрских и нижнемеловых терригенно-карбонатных

Таблица 1

Описание точек отбора образцов воды из родников городских округов Богородский и Лосино-Петровский

Номер пробы	Координаты, с. ш., в. д.	Описание места отбора		T, °C	pH	σ, мкСм/см
1	55,845700 38,385266	Родник в поле в 500 м к юго-западу от поселка Солнечный Богородского городского округа, к северу от пересечения Магистральной улицы с Горьковским шоссе. Он представлен небольшой лужицей в выкопанной яме, опознается по деревянному кресту, поставленному рядом. На дне видны небольшие восходящие ключики		15,5	5,9	85
2	55,835897 38,292443	Пойма реки Шаловка, в 100 м к востоку от рабочего поселка Обухово Богородского городского округа, на северной окраине поля, под линией электропередачи. Родник каптированный, под трубой был обнаружен восходящий ключик		13,2	5,9	149
3	55,837715 38,265546	Родник в 280 м к северу от поворота с Советской улицы на улицу Ключик поселка Обухово Богородского городского округа, на границе садовых участков. Вода находится в бетонном кольце, как в колодце		14,5	6,1	495
4	55,857228 38,214286	Родник на окраине жилой застройки деревенского типа к востоку от Монинского шоссе, в 5 м к востоку от улицы Новослободская, окружен деревьями. Оборудован домиком-колодец		12,7	7,5	616
5	55,779979 37,932122	Родник находится на понижении рельефа под Монинским шоссе в Лосино-Петровском городском округе, в 150 м к востоку от автозаправки, в 50 м к юго-западу от реки Клязьмы. На месте обустроен домик и навес		12,3	6,6	650
6	55,899108 38,165077	Родник на северной окраине садового товарищества Парус городского округа Лосино-Петровский. Построен высокий герметичный бетонный колодец. Вода качается ручным железным насосом, при отборе ощущается слабый запах железа		11,2	5,6	105
7	55,967942 38,264333	Родник расположен в лесу в 600 м к северу от улицы Сосновая поселка Дядькино Богородского городского округа. Родник каптирован		12	5,4	100
8-1	55,938560	Два родника в 160 м на восток от дороги в поселке Медное-Власово Лосино-Петровского городского округа, родники находятся в лесопарке рядом с рекой Воря	Родник каптирован	12,7	5,5	214
8-2	38,203815		Родник каптирован	12,3	6,3	161
9	55,922833 38,229790	Родник располагается в западной части деревни Авдотьино Богородского городского округа, в конце улицы Нижняя. Место благоустроено, родник каптирован, труба пластиковая		12,5	6,3	426
10	55,933094 38,235414	Святой Источник Николая Чудотворца. Родник находится в 250 м к северо-востоку от местечка Бирлюки в деревне Авдотьино Богородского городского округа, за Никольской часовней		11,2	6,2	179
11	55,802054 38,495454	Родник находится на улице Спортивная в 120 м к юго-востоку от теннисного центра «Кристалл». Он представляет собой бетонный колодец в беседке, вода льется под большим напором из вертикальной металлической трубы		12,6	7,3	543



пород, перекрытых четвертичными песчаными отложениями. Мощность осадочной толщи увеличивается с юга на север [Макеев, 2019]. Гидрогеологические условия территории характеризуются наличием зоны активного водообмена, которая охватывает до 10 и более водоносных горизонтов. К верхней водонасыщенной толще, которая состоит из песков, супесей и других отложений четвертичного и мезозойского возрастов относятся [Гидрогеологическая..., 1961]:

– в четвертичных отложениях — современный четвертичный озерно-болотный оторфованный (I,hQ_{IV}), современный четвертичный аллювиальный горизонт (alQ_{IV}); верхне-среднечетвертичный аллювиально-флювиогляциальный (al,fglQ_{II-III}), валдайско-московский аллювиально-флювиогляциальный (fglQ_{II-III}m-v), московско-днепровский аллювиально-флювиогляциальный (fglQ_{II}dn-m), днепровско-окский аллювиально-флювиогляциальный (fglQ_{I-II}ok-dn), воды спорадического распространения в московской и днепровской моренах (gl Q_{II} m + PrQ_{III} и gl Q_{II} dn);

– в юрских и меловых отложениях — апт-неокомский и волжский (J₃v + K₁nc + ap) водоносный комплекс.

Нижняя водонасыщенная толща состоит из карбонатных пород с прослоями глин верхне- и нижнегжельского водоносного горизонта (C₃g₂₋₁). На большей части территории верхняя и нижняя толщ разделены непроницаемыми слоями верхнеюрских глин, которые служат региональным водоупором. Согласно крупномасштабному картированию гидрогеологических условий Москвы и Московской области залегающую над юрскими глинами водоносную толщу принято объединять в надбюрский водоносный комплекс [Позднякова и др., 2012].

Материалы и методы исследований. Отбор проб воды родников проводился в сентябре 2022 г. и сопровождался определением координат места отбора, замерами температуры воды, pH и электропроводности с использованием портативного анализатора BLE-C600 (табл. 1). Для определения макросостава и химического потребления кислорода (ХПК) воду отбирали «под крышку» в бутылки из полиэтилена. Для определения содержания микроэлементов пробы фильтровали в пробирки из полипропилена через стерильные насадки (из ацетат целлюлозы с диаметром пор 0,45 мкм), фильтрат подкисляли до pH < 2 с помощью HNO₃ (ос.ч.).

ХПК определяли методом бихроматной окисляемости с фотометрическим окончанием (спектрофотометр Portlab 501) [ГОСТ 31859-2012]. Содержание Ca²⁺, Mg²⁺, Cl[–] и HCO₃[–] оценивали методами объемного титрования; NO₃[–] и NH₄⁺ — методом потенциометрии; SO₄^{2–} — методом рентгенофлуоресцентного анализа с предконцентрированием по методу высушенной капли [Лубкова и др., 2022].

Содержания K⁺, Na⁺ и микроэлементов в воде анализировали методом ИСП-МС на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой SUPEC 7000, адаптированном для работы с системой лазерного пробоотбора, приобретенном по Программе развития Московского университета. Калибровку осуществляли по растворам мультиэлементного стандарта (набор ICP–MS–68 A, B, High-Purity Standards, США). Правильность измерений контролировали использованием внутреннего стандарта (Indium ICP Standard CertiPUR 1002 мг/л ± 0,4%, Merck, Германия). Контроль точности проводили измерением стандартного раствора CRM–TMDW (Trace Metals in Drinking Water Standard, High Purity Standards, США).

Таблица 2

Макрокомпонентный состав вод родников городских округов Богородский и Лосино-Петровский

№ пробы	ПДК	1	2	3	4	5	6	7	8-1	8-2	9	10	11
pH	6,0–9,0	5,9	5,9	6,1	7,5	6,6	5,6	5,4	5,5	6,3	6,3	6,2	7,3
ХПК, мгО/л	15	<10	–	<10	<10	12,4	<10	–	<10	<10	18,2	<10	<10
Жесткость, мг-экв/л	10	0,8	1,0	3,6	4,9	3,7	0,9	1,0	1,4	1,1	2,3	1,7	5,6
Ca, мг/л	–	12,8	15,9	51,7	77,3	60,2	13,9	15,2	22,0	17,7	28,9	27,3	75,3
Mg, мг/л	50	2,4	2,8	12,7	12,7	8,9	2,3	2,6	3,2	2,5	10,1	3,7	22,6
Na, мг/л	200	2,0	5,1	19,0	24,2	42,2	2,6	2,7	15,5	12,1	18,3	6,3	5,2
K, мг/л	–	0,9	2,5	7,6	7,2	9,6	1,3	1,7	2,2	0,8	34,1	3,4	5,1
NH ₄ ⁺ , мг/л	1,5–2	0,9	0,8	2,2	1,8	2,4	0,5	0,5	0,4	0,7	6,3	0,8	1,2
HCO ₃ [–] , мг/л	–	22,8	31,0	111	219	109	21,7	12,9	43,9	23,4	78,5	35,1	308
SO ₄ ^{2–} , мг/л	500	15,0	15,0	65,0	39,0	38,0	25,0	21,0	22,0	29,0	36,0	36,0	28,0
Cl [–] , мг/л	350	8,6	16,5	33,0	48,0	83,2	7,9	12,2	29,4	22,2	32,3	17,9	13,6
NO ₃ [–] , мг/л	45	4,4	5,6	26,5	35,7	46,4	3,3	8,3	9,5	10,4	37,4	11,5	3,3
M, г/л	–	0,1	0,1	0,3	0,5	0,4	0,1	0,1	0,2	0,1	0,3	0,1	0,5

Примечания. Прочерк — информация отсутствует; ПДК — предельно-допустимая концентрация химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, согласно [СанПиН 1.2.3684-21].

Таблица 3

Содержание растворенных форм микроэлементов (мкг/л) в водах родников городских округов
Богородский и Лосино-Петровский

№ пробы	ПДК	1	2	3	4	5	6	7	8-1	8-2	9	10	11
Al	200	87,3	14,5	29,3	7,2	18,9	27,6	119	24,0	45,0	8,0	70,3	21,6
Ti	100	0,51	0,49	1,10	0,73	0,97	0,41	0,75	0,58	0,65	1,01	0,75	0,78
V	100	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	1,81	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,56	<0,5
Cr	50	2,43	2,41	7,13	5,94	4,19	2,29	4,86	0,85	2,62	0,64	2,97	7,98
Mn	100	17,6	6,57	19,3	8,25	0,50	9,28	27,9	2,50	3,91	9,54	19,2	2,92
Fe	300	217	260	27,4	<50	<50	483	<50	<50	<50	<50	<50	<50
Co	100	0,59	0,11	0,30	0,29	0,39	0,13	1,28	0,20	0,24	0,20	1,59	0,10
Ni	20	3,67	3,79	14,4	2,61	4,07	3,38	6,63	1,96	2,48	3,34	8,75	1,07
Cu	1000	1,82	1,54	9,99	2,47	1,43	0,85	1,04	1,80	1,02	1,63	2,40	0,38
Zn	5000	11,4	8,44	16,5	6,02	2,46	56,7	11,6	4,36	5,49	4,29	25,6	2,47
As	10	0,74	0,85	0,56	1,35	1,70	0,42	0,11	0,61	0,51	0,43	0,60	0,59
Se	10	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0
Rb	—	0,80	0,29	1,36	0,71	2,17	0,35	0,82	1,39	0,32	26,47	1,94	2,20
Sr	7000	61,6	91,4	257	160	140	71,6	133	125	92,8	104	128	788
Mo	70	0,17	0,10	0,34	0,17	2,04	0,14	0,29	0,43	0,13	0,14	0,19	0,73
Ag	50	0,39	0,43	0,41	0,40	0,38	0,39	0,42	0,32	0,39	0,24	0,37	0,36
Cd	1	0,11	0,04	0,16	0,02	0,04	0,06	0,17	0,05	0,06	0,01	0,12	0,01
Ba	700	10,2	10,9	101	36,4	49,0	23,6	48,0	15,8	19,0	10,4	31,8	135
Pb	10	0,41	2,74	0,48	3,50	0,24	0,18	1,89	0,62	0,93	0,47	1,24	2,92
U	15	0,02	0,01	0,39	0,56	1,66	0,02	0,01	0,03	0,02	0,02	0,04	0,04

Примечания. Прочерк — информация отсутствует; ПДК — предельно-допустимая концентрация химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, согласно [СанПиН 1.2.3684-21].

Результаты определения макрокомпонентного состава вод родников представлены в табл. 2, содержание растворенных форм микроэлементов приведено в табл. 3.

Термодинамический расчет растворенных форм нахождения макрокомпонентов (Ba, Sr, Mn, Zn, Cd, Ni, Co, Cu и Pb) в водах проводили в программе Visual-MINTEQ [https://vminteq.lwr.kth.se]. При выполнении расчетов применены базы данных comp_2008.vdb, thermo.vdb, type6.vdb и gaussian.vdb. Исходный состав системы задавали по результатам химических анализов (табл. 2 и 3), при этом параметр DOC (Dissolved Organic Carbon), необходимый для расчета комплексообразования с органическими кислотами в соответствии с Гауссовой моделью растворенного органического вещества (Gaussian DOM), рассчитывали как $DOC = 0,375 \cdot ХПК$, где $0,375 = M(C)/M(O_2) = 12/32$ (данный прием указан в работе [Лозовик и др., 2007]).

Обработка полученных данных проведена с помощью Microsoft Excel, визуализация макрокомпонентного состава вод — с помощью модулей GSS и Gtplot программного пакета The Geochemist's Workbench (GWB) в варианте бесплатной версии GWB Community Edition [https://www.gwb.com].

Результаты исследований и их обсуждение. Величины основных санитарно-химических показателей вод родников приведены в табл. 2.

Кислотно-щелочные условия вод, определяемые показателем pH, характеризуются значениями 5,4–7,5, что в целом укладывается в нормативный диапазон, с некоторым отклонением от нижней границы нормы. По величине общей жесткости воды родников соответствуют нормативу, относятся к категории очень мягких (до 1,5 мг-экв/л) и мягких (1,5–4,0 мг-экв/л), лишь в родниках 4 и 11 величина общей жесткости составляет 4,9 и 5,6 мг-экв/л соответственно, что относит их воды к категории средней жесткости (4–8 мг-экв/л). Величина ХПК в воде большинства родников менее 10 мгО/л, родники 5 и 9 характеризуются значением ХПК 12 и 18 мгО/л соответственно, в последнем случае значение ХПК выше допустимого норматива.

В родниках 3, 4, 5 и 9 зафиксированы превышения ПДК иона аммония в воде, родник 5 также отличается концентрацией нитрат-иона в воде на уровне ПДК. Значения ПДК основных анионов и катионов воды в родниках не превышены.

По результатам определения макросостава воды родников были составлены формулы ионного состава и типизирован состав вод (табл. 4). По вариациям макрокомпонентного состава, визуализированным на диаграммах Стиффа (рис. 2), были выделены 4 группы.

В первую были включены пробы из родников 1, 2, 6, 7, 10. В выделенных пяти образцах воды средние

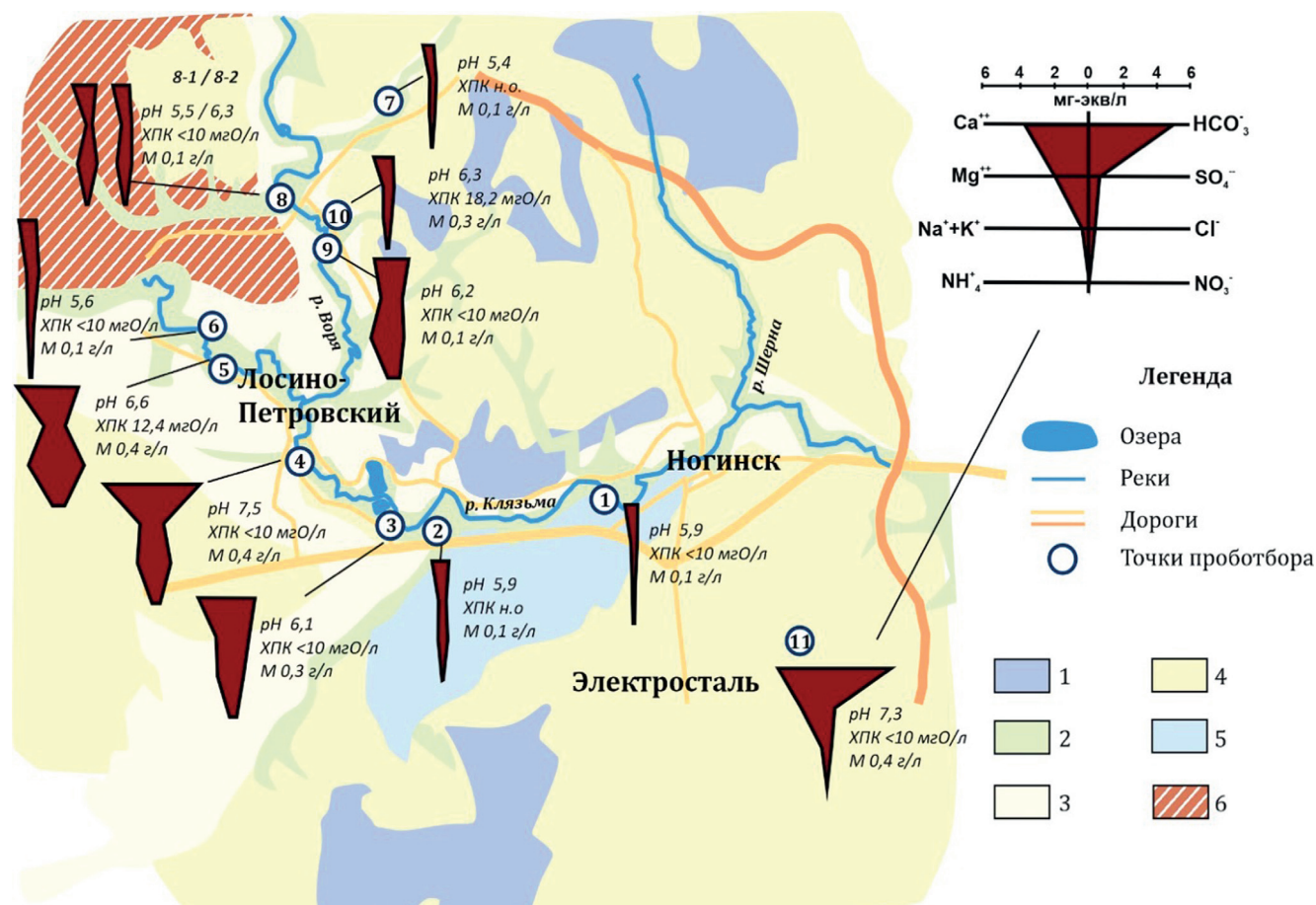


Рис. 2. Макрокомпонентный состав вод родников (диаграммы Стиффа). Основа — гидрогеологическая схема района исследований (составлена по материалам [Гидрогеологическая..., 1961]). Содержания ионов для построения диаграмм Стиффа выражены в мг-экв/л, все диаграммы построены по единой шкале, указанной на образце в верхней правой части рисунка. 1 — современночетвертичный озерно-болотный водоносный горизонт (l, hQ_{IV}); 2 — современночетвертичный аллювиальный водоносный горизонт (alQ_{IV}); 3 — верхне-среднечетвертичный аллювиально-флювиогляциальный водоносный горизонт (al, fglQ_{II-III}); 4 — московско-днепровский аллювиально-флювиогляциальный водоносный горизонт (fglQ_{II} dn-m); 5 — верхнежелтецкий водоносный горизонт (C₃g₂); 6 — подземные воды спорадического распространения в морене московского оледенения и в покровных отложениях (glQ_{III} m + PrQ_{III})

значения минерализации 0,1 г/л и менее, жесткости — около 1 мг-экв/л. Практически равнозначную роль в составе анионов играют сульфат-ион, хлорид-ион и гидрокарбонат-ион, основным катионом является кальций. Концентрация соединений азота в водах минимальна, содержания нитрат-иона 4,5–11,5 мг/л, иона аммония 0,5–0,9 мг/л. К этой же группе отнесена и вода родника 3, где при всей наблюдаемой схожести состава вод величина минерализации составляет 0,3 г/л.

Во вторую группу выделена проба номер 9, с минерализацией 0,3 г/л, жесткостью воды 2,3 мг-экв/л, отличающаяся смешанным составом вод с практически равнозначным вкладом анионов, в том числе и нитрат-иона и катионов. Вода этого родника отличается самым высоким содержанием калия — 34 мг/л, на фоне диапазона 0,8–9,6 мг/л в водах остальных родников. Также здесь определено самое высокое значение величины ХПК — 18 мгО/л.

Воды родника 8, отобранные в одном месте, но в двух разных выходах на расстоянии двух метров между собой (8-1 и 8-2), составили третью груп-

пу с водой из родника 5. Их объединили схожие по составу хлоридные натриево-кальциевые воды с подчиненной ролью сульфат-иона и гидрокарбонат-иона. При этом вода родника 5 отличается более высокой минерализацией и жесткостью воды (0,4 г/л и 3,7 мг-экв/л соответственно), величиной ХПК 12 мгО/л и содержанием нитрат-иона 46,4 мг/л. Вода источников 8-1 и 8-2 при некоторых вариациях между собой характеризуется минерализацией 0,1–0,2 г/л, жесткостью в среднем 1,3 мг-экв/л, величиной ХПК менее 10 мгО/л, содержание нитрат-иона около 10 мг/л.

В четвертой группе объединены гидрокарбонатные, кальциевые и магниевые-кальциевые воды из родников 4 и 11. Для этих вод характерны значения водородного показателя 7,3–7,5, что является самым высоким среди всех исследованных вод, величина минерализации и жесткости также максимальны (0,5 г/л и более 5 мг-экв/л соответственно). Однако родник 4, расположенный на окраине жилой застройки деревенского типа, отличается повышенным содержанием нитрат-иона и хлорид-иона

(36 мг/л и 48 мг/л) относительно воды родника 11 (3,3 мг/л и 13 мг/л соответственно), находящегося в центре городской застройки (г. Электросталь).

Присутствие соединений азота, сульфат-иона и хлорид-иона в водах родников обусловлено применением азотных и калийных удобрений предприятиями агропромышленного комплекса территории, а также обработкой дорог противогололедными реагентами в зимний период, с сопутствующим загрязнением почв. Повышенное содержание соединений азота и органических соединений в водах родников соответствует результатам многолетних гидрохимических наблюдений за качеством вод реки Клязьма, одним из источников питания которой является поверхностный сток с площади питания родников. Несмотря на очистные сооружения, повторяемость случаев превышения ПДК аммонийного и нитритного азота, легкоокисляемых органических веществ (по БПК₅) в водах реки наблюдается постоянно с 2001 г. [Лямперт и др., 2022].

Содержания микроэлементов в водах отличаются значительными вариациями. Наименьшее различие концентраций (в 2–3 раза) характерно для содержаний (мкг/л) Ti (0,4–1,1), V (0,6–1,8), Ag (0,2–0,43). Различия в 10–30 раз установлены для Al (7,2–119), Cr (0,6–7,9), Fe (27–483), Co (0,1–1,6), Ni (1,1–14,4), As (0,1–1,7), Sr (61,6–788), Mo (0,1–2,0), Cd (0,01–0,17), Ba (10,2–135), Pb (0,2–3,5), Cu (0,4–10,0) Zn (2,5–56,7); в 50–100 раз — для Mn (0,5–27,9), Rb (0,3–26,5) и U (0,01–1,66). При этом, содержание микроэлементов не превышает ПДК питьевых вод [СанПиН 1.2.3684–21], что свидетельствует об отсутствии существенного загрязнения вод исследованных родников и в целом согласуется с известными данными о состоянии площади их питания [Корженевский и др., 2021]. Исключением является вода из родника 6, где концентрация железа составляет 1,6 ПДК, что скорее всего связано с организацией выхода воды на поверхность (вода накачивается ручным железным насосом из герметично закрытого бетонного колодца). Следует отметить, что при отборе воды ощущается слабый запах железа, однако выпадения осадка при отстаивании емкости с водой не наблюдалось.

Термодинамическое моделирование растворенных форм нахождения проведено для Sr, Ba и Mn, отражающих природные особенности формирования вод, а также для Co, Ni, Cu, Zn, Cd и Pb, которые являются основными элементами-индикаторами техногенной нагрузки. Обобщенные результаты термодинамических расчетов представлены на рис. 3. Выше были выделены группы родников по содержанию основных анионов в водах: при смешанном составе анионов первая отличается малым содержанием органических соединений; во второй и третьей группах роль органических соединений в водах возрастает; в четвертой группе состав вод определяется исключительно гидрокарбонат-ионом. Данные различия макросостава определяют основ-

Таблица 4

Типизация вод родников городских округов Богородский и Лосино-Петровский

№ пробы	Формула ионного состава	Название воды (по содержанию ионов более 25%экв)
1	$M_{0,1} \frac{HCO_3,37 SO_4,31 Cl,24 NO_3,7}{Ca,64 Mg,20 Na,9 NH_4,5 K,2} pH_{5,9}$	(хлоридно)-сульфатно-гидрокарбонатная кальциевая
2	$M_{0,1} \frac{HCO_3,37 Cl,34 SO_4,23 NO_3,7}{Ca,59 Mg,17 Na,16 K,5 NH_4,3} pH_{5,9}$	(сульфатно)-хлоридно-гидрокарбонатная кальциевая
3	$M_{0,3} \frac{HCO_4,40 SO_4,30 Cl,20 NO_3,9}{Ca,54 Mg,22 Na,17 K,4 NH_4,3} pH_{6,2}$	сульфатно-гидрокарбонатная кальциевая
4	$M_{0,5} \frac{HCO_5,57 Cl,21 SO_4,13 NO_3,9}{Ca,62 Mg,17 Na,17 K,3 NH_4,2} pH_{7,5}$	гидрокарбонатная кальциевая
5	$M_{0,4} \frac{Cl,41 HCO_3,32 SO_4,14 NO_3,13}{Ca,50 Na,31 Mg,12 K,4 NH_4,2} pH_{6,6}$	гидрокарбонатно-хлоридная натриево-кальциевая
6	$M_{0,1} \frac{SO_4,45 HCO_3,31 Cl,19 NO_3,5}{Ca,65 Mg,18 Na,11 K,3 NH_4,2} pH_{5,6}$	гидрокарбонатно-сульфатная кальциевая
7	$M_{0,1} \frac{SO_3,39 Cl,31 HCO_3,19 NO_3,12}{Ca,66 Mg,18 Na,10 K,4 NH_4,2} pH_{5,4}$	хлоридно-сульфатная кальциевая
8-1	$M_{0,2} \frac{Cl,38 HCO_3,33 SO_4,21 NO_3,7}{Ca,52 Na,32 Mg,12 K,3 NH_4,1} pH_{5,5}$	гидрокарбонатно-хлоридная натриево-кальциевая
8-2	$M_{0,1} \frac{Cl,35 SO_4,34 HCO_3,22 NO_3,9}{Ca,53 Na,32 Mg,12 K,1 NH_4,2} pH_{6,3}$	сульфатно-хлоридная натриево-кальциевая
9	$M_{0,3} \frac{HCO_3,36 Cl,26 SO_4,21 NO_3,17}{Ca,34 K,20 Mg,19 Na,19 NH_4,8} pH_{6,3}$	смешанный состав (условно: хлоридно-гидрокарбонатная, кальциевая)
10	$M_{0,1} \frac{SO_3,37 HCO_3,29 Cl,25 NO_3,9}{Ca,66 Mg,15 Na,13 K,4 NH_4,2} pH_{6,2}$	хлоридно-гидрокарбонатно-сульфатная кальциевая
11	$M_{0,2} \frac{HCO_3,83 SO_4,10 Cl,6 NO_3,1}{Ca,62 Mg,31 Na,4 K,2 NH_4,1} pH_{7,3}$	гидрокарбонатная магниевно-кальциевая

ные особенности форм переноса микроэлементов в водах.

Основная часть Sr, Ba, Mn в воде присутствуют преимущественно в свободной форме (80–95%), остальную долю составляют гидрокарбонатные и сульфатные соединения. Похожие результаты получены для кобальта и никеля: преобладают свободные формы, перенос в сульфатной форме, однако увеличивается доля карбонатных форм (до 15–20%) в водах четвертой группы родников. Для бария и никеля также возможно присутствие в составе органических соединений (до 5%) в водах второй группы родников.

Превалирующая форма переноса кадмия и цинка в воде — свободная. Для кадмия характерен перенос в хлоридной форме (3–7%). Присутствие карбонатов (четвертая группа родников) и органического вещества (вторая группа родников) в водах увеличивает долю соответствующих форм кадмия до 7% и 5% соответственно, а цинка до 6% и 9% соответственно.

Более разнообразен состав форм свинца и меди, для которых, наряду с присутствием в виде свободных ионов (максимально 51% и 63% соответственно), возрастает роль органических комплексов

Формы нахождения микроэлементов, % от общего содержания растворенных форм

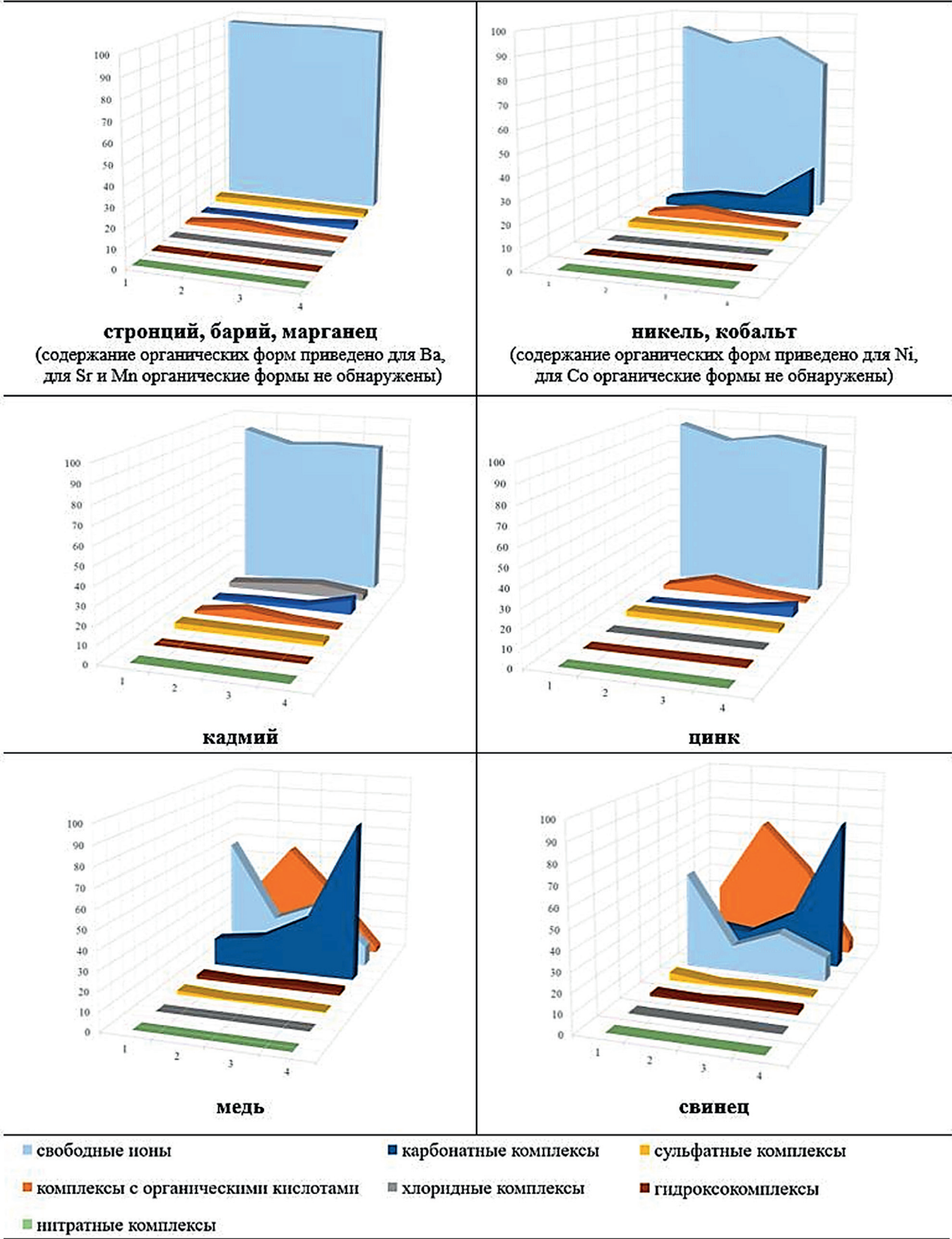


Рис. 3. Результаты термодинамических расчетов распределения растворенных форм нахождения микроэлементов в водах родников Богородского и Лосино-Петровского городских округов. Группы вод родников по составу основных анионов и содержанию органического вещества: 1 — равнозначную роль в составе анионов играют сульфат-ион, хлорид-ион и гидрокарбонат-ион, органического вещества в воде практически нет; 2 — смешанный состав анионов в том числе и нитрат-иона, повышенное содержание органического вещества; 3 — хлоридные воды с повышенным содержанием органики; 4 — гидрокарбонатный состав вод, содержание органического вещества минимально

(до 70%) при повышенном содержании органического вещества в воде (вторая и третья группы), а в водах преимущественно гидрокарбонатного состава (четвертая группа) основными формами переноса становятся карбонатные.

Местоположение точек пробоботбора было соотнесено с гидрогеологической картой [Гидрогеологическая..., 1961] для уточнения водоносных горизонтов, к которым относятся родники (рис. 3). Родник 1, исходя из полевых наблюдений и химического состава воды, был отнесен к современно-четвертичному аллювиальному водоносному горизонту (alQ_{IV}). Воды из родников 2, 3, 4, 5, 6, 8-1, 8-2 и 9 вероятнее всего относятся к верхне-среднечетвертичному аллювиально-флювиогляционному водоносному горизонту ($al, fgl Q_{II-III}$), сложенному песками с гравием и галькой. Согласно [Объяснительная записка..., 1975], он характеризуется пестрым составом вод, что объясняет разброс по макрокомпонентным составляющим в исследованных родниках, а также частым загрязнением вод. Родники 7 и 10 по местоположению были отнесены к московско-днепровскому аллювиально-флювиогляционному водоносному горизонту ($fglQ_{II}dn-m$), состав вод этих родников (хлоридно-(гидрокарбонатный)-сульфатный, кальциевый) соответствует данным, приведенным в [Объяснительная..., 1975].

Родник 11 отнесен к верхнегжельскому водоносному горизонту (C_3g_2), сложенному доломитами и известняками, из-за гидрокарбонатного, магниевое-кальциевого состава проб, что согласуется с описанием горизонта в [Объяснительная..., 1975]. Минимальное содержание в воде ионов аммония, нитрата и хлорида указывает хорошую защищенность вод данного родника от поверхностного загрязнения.

Для определения условий формирования вод родников также были использованы: 1) подход расчета по соотношениям генетических коэффициентов (rNa/rCl ; $(rNa-rCl)/rSO_4$; $(rCl-rNa)/rMg$), принятый в классификации В.А. Сулина; и 2) принцип деления по преобладающим ионам и по соотношениям между ними, разработанный О.А. Алекиным [Справочник..., 1989]. И в том, и в другом случае результаты расчетов показали, что химический состав исследованных вод: 1) соответствует морской и глубинной обстановке формирования состава подземных вод, фактором формирования состава является выщелачивание компонентов из пород морского генезиса или карбонатного состава; 2) относится к сильноминерализованным подземным водам, водам соляных

озер, морей и океанов. Эти результаты противоречат реальной обстановке формирования вод, исследованные родники локализованы в современных отложениях, значимая роль хлорид- и сульфат ионов в составе воды связана с техногенной нагрузкой на площади питания родников.

Заключение. Исследование родников на территории Богородского и Лосино-Петровского городских округов Московской области позволило составить общую характеристику родниковых вод района. Диапазон значений минерализации вод — от 0,1 до 0,5 г/л, значений pH — от 5,4 до 7,5, общей жесткости — 0,8–5,6 мг-экв/л, содержание органического вещества в водах в целом менее 10 мгО/л.

По результатам анализа макрокомпонентного состава воды родников были разделены на четыре группы: 1 — хлоридно-сульфатно-гидрокарбонатные (магниево)-кальциевые; 2 — (сульфатно)-гидрокарбонатно-хлоридные натриево-кальциевые; 3 — (хлоридно)-гидрокарбонатные кальциевые; 4 — смешанного состава. Содержания микроэлементов в изученных образцах воды варьируют в широком диапазоне. Результаты моделирования форм нахождения микроэлементов в воде показали, что для большинства из них основной формой их переноса является свободная, однако для меди и свинца факторами формирования миграционных форм являются преобладающие анионы макросостава воды, а также присутствие органического вещества в воде.

Согласно полученным данным, исследованные родники относятся к современным отложениям, испытывающим техногенную нагрузку от предприятий агропромышленного и автотранспортного комплекса, о чем свидетельствует значимая роль хлорид- и сульфат ионов в составе воды. При этом величина большинства санитарно-химических показателей вод (минерализация, pH, общая жесткость, хлориды, сульфаты, магний, натрий, марганец), как и содержание нормируемых микроэлементов существенно ниже их ПДК в водах хозяйственно-питьевого назначения. Превышение ПДК наблюдается в единичном случае для концентрации железа в воде, а также по таким показателям как значения ХПК и содержания нитрат-иона и ионов аммония в водах отдельных родников.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госбюджетной темы «Развитие комплексных методов физической, прогнозно-поисковой и экологической геохимии» (контракт № 5-3-2021, номер ЦИТИС: 121061600048-7).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буймова С.В. Оценка качества родниковых вод Ивановской области, их влияния на здоровье населения: Автореф. канд. дисс. Иваново, 2006. 18 с.
2. Воробьева Т.И., Жинжакова Л.З., Чередник Е.А. и др. Исследование содержания макро- и микропримесей в водах реки Нальчик на территории активных воздействий // Доклады Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Ч. 2. Нальчик: ООО «Печатный двор», 2015. С. 351–363.

3. Гидрогеологическая карта СССР (N-37-III). Серия Московская. Масштаб: 1:200 000 / Под ред. Б.Э. Урбан. М.: ВСЕГИНГЕО, 1961.

4. ГОСТ 31859-2012. Вода. Метод определения химического потребления кислорода: межгосударственный стандарт. М.: Стандартинформ, 2014. 11 с.

5. Дребенкова И.В., Зайцев В.А. Микро-и макро-элементы в питьевой воде // Медицина труда и экология человека. 2016. № 4 (8). С. 69–74.
6. Дроздова Е.В., Бурая В.В., Суворец Т.З. и др. Оценка питьевых вод, потребляемых населением республики Беларусь, по макро- и микроэлементному составу // Медицина труда и экология человека. 2017. № 1 (9). С. 44–49.
7. Жинжакова Л.З., Воробьева Т.И., Чередник Е.А. Состав родниковых вод Кабардино-Балкарской республики // ВХР. 2019. № 5. С. 40–48.
8. Злобина В.Л., Медовар Ю.А., Юшманов И.О. Негативное воздействие хозяйственной деятельности на подземные воды // East Eur. Sci. J. 2019. № 4 (44). Р. 28–40.
9. Корженевский Б.И., Толкачев Г.Ю., Коломийцев Н.В., Ильина Т.А. Особенности загрязнения донных отложений малых рек тяжелыми металлами в результате различной хозяйственной деятельности // Известия НВ АУК. 2021. № 3 (63). С. 415–426.
10. Каюкова Е.П., Котова И.К. Особенности формирования химического состава подземных вод зоны активного водообмена бассейна Р. Бодрак (юго-западный Крым) // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2017. № 4. С. 343–356.
11. Липатникова О.А., Лубкова Т.Н., Яблонская Д.А. и др. Состав и формы нахождения элементов в воде родников южной части городского округа Балашиха (Московская область) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. № 2. С. 139–151.
12. Лозовик П.А., Морозов А.К., Зобков М.Б. и др. Аллохтонное и автохтонное органическое вещество в поверхностных водах Карелии // Водные ресурсы. 2007. Т. 34, № 2. С. 225–237.
13. Лубкова Т.Н., Липатникова О.А., Филатова О.Р., Балыкова И.В. Рентгенофлуоресцентный анализ сульфат-иона в водных растворах по методу высушенной капли с использованием портативного спектрометра // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 2. С. 59–67.
14. Лукашевич О.Д., Чернышова Н.А. Безопасность воды в родниках города Томска // XXI век. Техносферная безопасность. 2018. Т. 3, № 2 (10). С. 81–97.
15. Лямперт Н.А., Ничипорова И.П., Лобченко Е.Е., Первышева О.А. Современное состояние и динамика качества воды р. Клязьма // Успехи современного естествознания. 2022. № 3. С. 104–110.
16. Макеев В.М., Суханова Т.В., Макарова Н.В., Коробова И.В. Геолого-геоморфологическое строение и геоэкологические условия Ногинско-Клязьминского района Московской области // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2019. № 4. С. 68–78.
17. Нефедьева Т.А., Благовещенская Н.В. Качество родниковой воды Ульяновской области // Ульяновский медико-биологический журнал. 2018. № 4. С. 143–155.
18. Объяснительная записка. Геологическая и гидрогеологическая карты СССР масштаба 1:200000. Серия Московская. Лист N-37-III. М.: ВСЕГЕИ, 1975. 154 с.
19. Официальный сайт органов местного самоуправления Богородского городского округа Московской области. URL: <https://bogorodsky-okrug.ru/article/3-tysyachizhitelej-bogorodskogo-g-o-budut-obespecheny-pitevoj-vodoj-313757> (дата обращения: 29.08.2023).
20. Пасечник Е.Ю., Льготин В.А., Савичев О.Г. и др. Химический состав родников как индикатор природно-техногенной эволюции городской экосистемы (на примере города Томска, юго-восток Западной Сибири) // Известия ТПУ. 2022. № 7. С. 195–206.
21. Позднякова И.А., Кожевникова И.А., Костикова И.А., Томс Л.С. Оценка условий взаимосвязи водоносных горизонтов на основе крупномасштабного картирования геологического строения и гидрогеологических условий г. Москвы // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2012. № 6. С. 527–539.
22. Реутова Н.В., Реутова Т.В., Дреева Ф.Р. и др. Химический состав родниковых вод высокогорной и среднегорной зоны КБР // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2017. № 2. С. 83–89.
23. Савенко А.В., Савенко В.С., Покровский О.С. Микроэлементы в водах родников Москвы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2020. № 1. С. 69–80.
24. СанПиН 1.2.3684-21. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий (Зарегистрировано в Минюсте России 29.01.2021 № 62297). Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573536177> (дата обращения: 22.02.2023).
25. Справочник по гидрохимии / Под ред. А.М. Никаноровой. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 390 с.
26. Bertoldi D., Bontempo L., Larcher R., et al. Survey of the chemical composition of 571 European bottled mineral waters // Journal of food composition and analysis. 2011. Т. 24, № 3. С. 376–385.
27. Michalik A. The use of chemical and cluster analysis for studying spring water quality in Świętokrzyski National Park // Polish Journal of Environmental Studies. 2008. Т. 17, № 3. Р. 357–362.
28. Ragno G., de Luca M., Ioele G. An application of cluster analysis and multivariate classification methods to spring water monitoring data // Microchemical Journal. 2007. Т. 87, № 2. Р. 119–127.
29. Pontara A.V., de Oliveira C.D.D., Horiquni A.B., et al. Microbiological monitoring of mineral water commercialized in Brazil // Brazilian Journal of Microbiology. 2011. Т. 42. Р. 554–559.

Статья поступила в редакцию 14.09.2023,
одобрена после рецензирования 02.10.2023,
принята к публикации 05.03.2024