

УДК 504.06/504.4/550.4

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2026-65-1-118-130

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РОДНИКОВЫХ ВОД ЩЕЛКОВСКОГО ГОРОДСКОГО ОКРУГА (МОСКОВСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Дарья Сергеевна Гусарова¹✉, Дарья Андреевна Яблонская²,
Ольга Романовна Филатова³, Ольга Александровна Липатникова⁴,
Татьяна Николаевна Лубкова⁵

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

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; yablonskayada@my.msu.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; orlova8313@yandex.ru

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

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; tanya_lubkova@mail.ru

Аннотация. Проведено комплексное исследование химического состава 12 родниковых вод городского округа Щелково (Московская область). Определены гидрохимические параметры (ХПК, pH, электропроводность) и концентрации основных ионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-). Воды характеризуются слабой минерализацией (0,1–0,7 г/л) и общей жесткостью до 8 мг-экв/л, преобладают ионы кальция и гидрокарбоната. Величина ХПК для ряда родников составляет от 16 до 40 мгО/л. Формирование состава родниковых вод связано с инфильтрацией атмосферных осадков через толщу современных отложений, подверженных техногенной нагрузке. Использованы интегральные индексы (WQI, %Na, MH, PI, PS) для оценки питьевого и поливного качества. Исследованные источники преимущественно относятся к воде отличного и хорошего качества; выявлены четыре родника с неудовлетворительным и удовлетворительным качеством по отдельным показателям.

Ключевые слова: родниковые воды, городской округ Щелково, макросостав, индекс качества

Для цитирования: Гусарова Д.С., Яблонская Д.А., Филатова О.Р., Липатникова О.А., Лубкова Т.Н. Комплексная оценка качества родниковых вод Щелковского городского округа (Московская область) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2026. № 1. С. 118–130.

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE QUALITY OF SPRING WATERS IN THE SHCHELKOVO DISTRICT (MOSCOW REGION)

Darya S. Gusarova¹✉, Darya A. Yablonskaya², Olga R. Filatova³, Olga A. Lipatnikova³,
Tatyana N. Lubkova⁴

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; orlova8313@yandex.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; lipatnikova_oa@mail.ru

⁵ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; tanya_lubkova@mail.ru

Abstract. A comprehensive study was conducted on the chemical composition of 12 spring waters from the Shchyolkovo Urban District (Moscow Region). Hydrochemical parameters (COD, pH, electrical conductivity) and concentrations of major ions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-) were determined. The waters are characterized by low mineralization (0.1–0.7 g/L) and total hardness up to 8 mg-equiv./L, with calcium and bicarbonate ions predominating. The COD values for several springs ranged from 16 to 40 mg O₂/L. The chemical composition of spring waters is influenced by the infiltration of atmospheric precipitation through layers of recent sediments subjected to anthropogenic impact. Integral indexes (WQI, %Na, MH, PI, PS) were used to assess their suitability for drinking and irrigation. The studied sources mostly correspond to water of excellent and good quality; however, four springs exhibited unsatisfactory or acceptable quality based on certain parameters.

Keywords: spring waters, Shchelkovo district, macro composition, quality index

For citation: Gusarova D.S., Yablonskaya D.A., Filatova O.R., Lipatnikova O.A., Lubkova T.N. Comprehensive assessment of the quality of spring waters in the north-east of the Moscow region. *Moscow University Geol. Bull.* 2026; 1: 118–130. (In Russ.).

Введение. Родниковые воды традиционно воспринимаются как пригодные для употребления без дополнительной обработки, что связано с естественной фильтрацией через водовмещающие породы [Шварцев, 1998; Manga, 2001]. Однако формирование

химического состава таких вод зависит от множества факторов — климата, почвенного и растительного покрова, геологии и гидрогеологии [Chaudhry, Malik, 2017]. В условиях интенсивной хозяйственной деятельности сопоставимыми по значимости с природ-

ными могут становиться антропогенные факторы [Giri, Singh, 2014; Prasad, et al., 2020; Chen, et al., 2024].

Особое значение имеют диффузные (неточечные) источники загрязнения — когда загрязнители поступают с обширных территорий без конкретной точки выброса, что затрудняет их выявление и контроль. Они являются одной из основных причин ухудшения качества родниковых вод за счет массовой доставки различных загрязняющих веществ в зону питания родников [Веницианов, Кирпичникова, 2018; Слабунова, Суровикина, 2020; National ..., 2003]. К типичным диффузным источникам относятся соли противогололедных реагентов, приводящие к загрязнению ионами хлора, натрия, кальция и аммония [Kaushal, 2005], а также сельскохозяйственные загрязнения [Янин, 2018]: минеральные удобрения — основные источники азота и фосфора [Schwarzenbach et al., 2010], отходы животноводства и птицеводства — источники сульфатов, хлоридов, фосфатов и аммония [Головатый и др., 2015].

Родниковые воды являются эффективным индикатором диффузных источников загрязнения. В частности, повышенное содержание нитратов отмечается в источниках, расположенных в жилых массивах и садовых товариществах, причем наибольшие концентрации характерны для конца лета — начала осени [Трифонов и др., 2022; Кострикин, 2020]. В городских условиях состав родниковой воды зачастую отличается более высоким содержанием нитратов, сульфатов и хлоридов по сравнению с водопроводной водой [Буймова, Костров, 2008; Новосельцева, 2019].

Таким образом, родниковые воды менее подвержены загрязнению относительно поверхностных вод, однако их состояние требует регулярного контроля из-за прямого воздействия на здоровье населения [Zhang et al., 2019; Kallon, 2024]. Актуальность проблемы подтверждается динамичным ростом спроса на чистую питьевую воду в России — так, в 2023 г. рынок бутилированной воды увеличился почти на 39%, а внутреннее производство — на 14,5% по сравнению с предыдущим годом [Анализ..., 2024].

Несмотря на то, что качество родниковой воды традиционно оценивается путем сравнения содержаний химических компонентов с нормативами предельно допустимых концентраций (ПДК), такой подход имеет определенные ограничения. В частности, он недостаточно учитывает суммарное влияние нескольких параметров одновременно и может не выявлять потенциальные риски, когда показатели лишь близки к нормативам, но формально не превышают их.

В этих случаях особенно полезен интегральный показатель — индекс качества воды (Water Quality Index, WQI) [Aminiyan, 2020], который объединяет ключевые параметры, такие как электропроводность, рН, жесткость, а также концентрации природных (например, гидрокарбонат-ион, кальций) и антропогенных компонентов (хлорид-ион, нитрат-

ион и др.). Каждому из параметров присваивается весовой коэффициент, отражающий его влияние на безопасность и пригодность воды для питья. Рассчитанный таким образом WQI позволяет получить комплексную и системную оценку качества воды в целом, выявлять скрытые риски и учитывать пролонгированный эффект воздействия нескольких загрязнителей, что соответствует требованиям российских санитарных правил и рекомендациям Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ).

Помимо питьевого назначения, родниковая вода нередко используется для полива сельскохозяйственных культур, в том числе при выращивании рассады в домашних условиях. Для оценки ее пригодности в аграрных целях определяются специальные показатели [Bouselsal et al., 2025], позволяющие оценить потенциальное воздействие ионного состава поливной воды на физико-химические свойства почв и продуктивность растений [Устойчивое..., 2021].

В настоящей работе представлены результаты комплексного исследования родниковых вод городского округа Щёлково (Московская область), включающего анализ химического состава и факторов формирования состава вод. Традиционный подход к оценке качества воды сравнением с нормативными показателями дополнен расчетом интегральных показателей питьевого и поливного качества вод, что позволяет учесть совокупный и пролонгированный эффект загрязнения, включая влияние ненормируемых параметров. Результаты исследования позволят определить доминирующие факторы формирования состава вод родников и могут быть положены в основу разработки программ мониторинга, направленных на снижение антропогенной нагрузки и обеспечение безопасности подземных вод как важного источника питьевого водоснабжения.

Территория исследования. Городской округ Щёлково (северо-восток Московской области) расположен на стыке Мещерской низменности и Клинско-Дмитровской гряды (что определяет вариации элементов рельефа) в условиях умеренно-континентального климата (T от -13°C до $+25^{\circ}\text{C}$) с годовым количеством осадков около 500 мм, максимум которых приходится на летний период. Геологическое строение типично для Восточно-Европейской платформы: древний кристаллический фундамент перекрыт мощным чехлом осадочных пород палеозоя, мезозоя, четвертичных ледниковых и аллювиальных образований [Вагнер, 2003].

Исследуемая территория находится в южной приосевой части Московского артезианского бассейна, основные водоносные породы которого — каменноугольные (источник питьевой и технической воды) и девонские трещиноватые известняки и мергели. Мезозойско-кайнозойский водоносный комплекс распространен практически на всей территории округа, за исключением района Щёлковского поднятия, где породы комплекса практически полностью размыты [Генеральный..., 2024]. Разгрузка вод

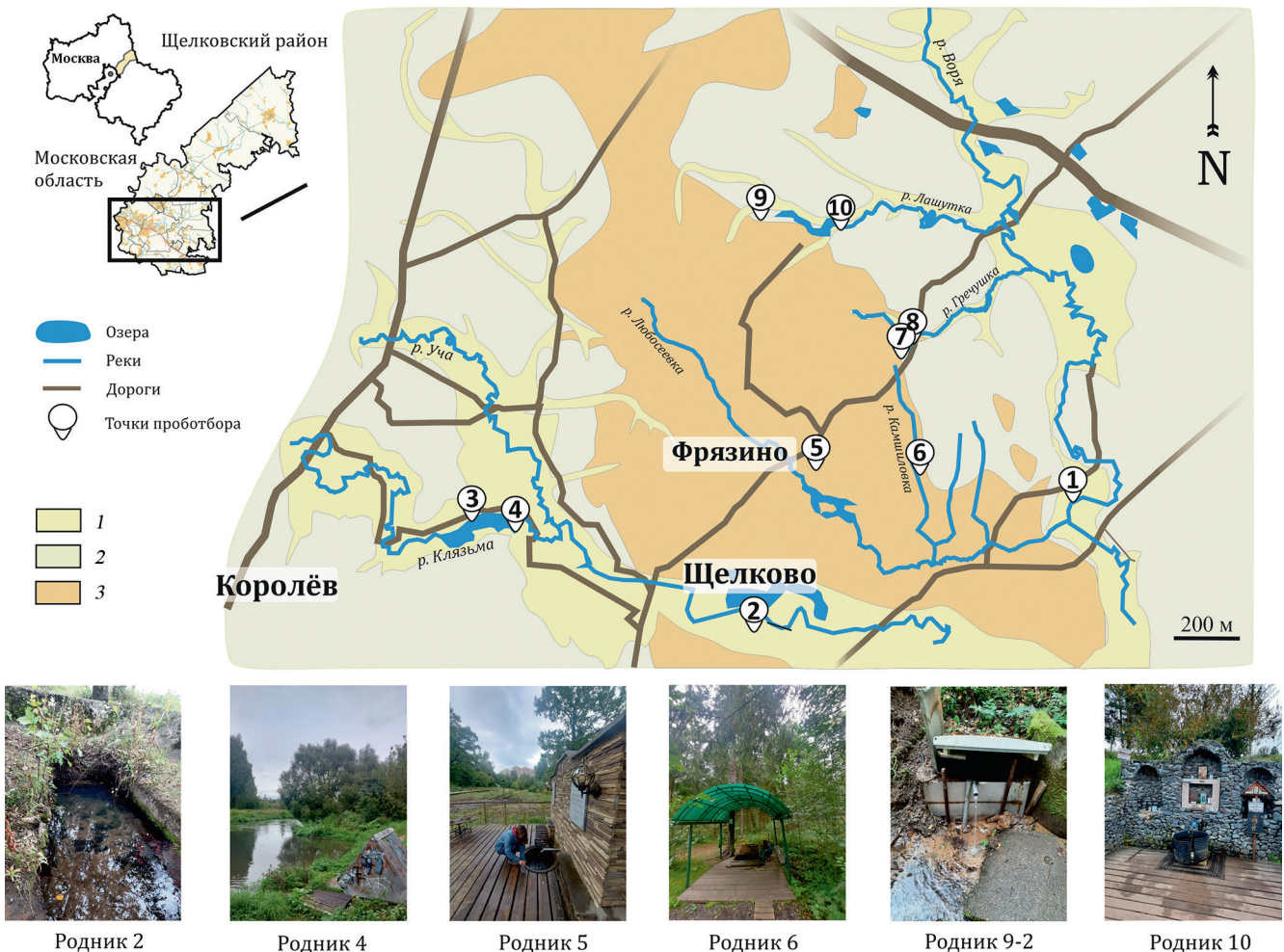


Рис. 1. Расположение исследуемых родников на территории городского округа Щелково. Номера точек соответствуют номерам проб. В точке 9 три выхода родниковых вод, отобраны пробы 9-1, 9-2, 9-3. 1 — Валдайский горизонт. Аллювиальные отложения надпойменной террасы. (aIIv) Пески, суглинки; 2 — Московский горизонт. Водно-ледниковые отложения. (f.lgIIm). Пески, валуны; 3 — Московский горизонт. Ледниковые отложения (морена) (gIIm). Суглинки с гравием

комплекса происходит в реки Клязьма, Любосеевка и Воря, а также в виде многочисленных родников.

Техногенная нагрузка обусловлена предприятиями промышленности (фармацевтика, химия, металлургия и др.), сельским хозяйством (удобрения, мелиоранты и агрохимикаты), строительством дорог, добычей полезных ископаемых (пески и гравий, кирпично-черепичное сырье, карбонатные породы, торф) [Генеральный ..., 2024]. Одним из основных источников загрязнения водных объектов округа являются Щелковские очистные сооружения (ЗАО «Экоаэросталкер») и промышленные/бытовые стоки. Так, в 2020 г. объем сточных вод, поступивших в реку Клязьма, составил 266 млн м³, при этом доля воды, очищенной до нормативных показателей, незначительна [Лямперт и др., 2022].

Методы исследования. В сентябре 2023 г. были отобраны пробы воды из 12 родников (рис. 1) с фиксацией координат GPS. На месте измеряли температуру, электропроводность и pH с помощью портативного анализатора BLE-C600 (табл. 1).

Химическое потребление кислорода (ХПК) определяли методом бихроматной окисляемости с фотометрическим окончанием (спектрофото-

метр Portlab 501) согласно ГОСТ 31859–2012. Для контроля повторяемости применялся подход двукратных измерений одной и той же пробы. Концентрации основных ионов (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻ и NH₄⁺) измеряли методом капиллярного электрофореза (СКЭ Капель-205 со спектрофотометрическим окончанием, оборудование приобретено по программе развития МГУ, заявленная производителем погрешность измерения составляет 8–10%), содержание HCO₃⁻ оценивали методом объемного титрования. Для контроля качества результатов рассчитывали ионный баланс с допустимым расхождением ≤5% (1):

$$\text{ОИБ} = \frac{\text{Кат} - \text{Ан}}{\text{Кат} + \text{Ан}} \times 100\%, \quad (1)$$

где Кат и Ан — суммы катионов и анионов в мг-экв/л.

Обработка 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, построение рисунков выполнено с помощью векторного графического редактора Corel Draw.

Таблица 1

Описание точек отбора образцов воды из родников на территории городского округа Щелково

Номер пробы	Координаты, с.ш., в.д.	Описание места отбора	T, °C	σ, мкСм/см	pH
1	55,946979 38,201247	Родник расположен в 400 м к югу от автобусной остановки «Мизиново», в 300 м к западу от тупика на улице Речная, в понижении у проселочной дороги на окраине деревни Мизиново. Родник каптирован. Вода прозрачная, цвета и запаха не имеет.	14,3	466	5,80
2	55,911439 38,046331	Родник находится на поле в 150 м к северо-западу от ЖК Потапово, в 180 м к северо-востоку от пересечения улиц Заводской и Потаповской. Родник представляет собой искусственный водоем с естественным выходом воды на дне. Вода прозрачная, запаха не имеет.	15,1	792	6,72
3	55,941392 37,910747	Родник расположен на улице Шмидта напротив дома № 3. Обустроен в виде крытого бетонного колодца. Для набора воды используется оцинкованное ведро, прикрепляющееся к одной из стенок. Вода прозрачная, без запаха.	12,0	611	6,41
4	55,937887 37,932187	Мальцевский родник. Расположен в пойме реки Клязьма в 70 м к северу от Дома культуры Мальцево. Вода находится в бетонном колодце с оцинкованной крышей, пот которой крепится оцинкованное ведро для набора воды. Запаха нет, вода прозрачная. Уровень воды низкий, на дне плавала пластиковая бутылка.	14,2	725	7,04
5	55,954226 38,080243	Гребневский родник находится в 20 м к северу от пересечения улиц Саровской и Березовой в облагороженном сквере деревни Гребнево. Родник каптирован. Вода прозрачная и без запаха.	15,0	177	5,76
6	55,953969 38,127907	Родник располагается в 600 м к северу от памятника Погибшим в ВОВ деревни Камшиловка, в 200 м к юго-востоку от пересечения улицы Сафинской и реки Камшиловки. Представляет собой деревянный бревенчатый колодец. Вода прозрачная, запаха не имеет.	13,7	60	5,20
7	55,985986 38,118728	Родник находится в 160 м к югу от пресечения Лунной улицы и Звездного тупика в селе Трубино. Представляет собой деревянный колодец с бетонным основанием. Вода прозрачная, на дне колодца белый осадок, запаха не имеет.	12,9	190	5,59
8	55,988961 38,124729	Родник Серебряный, расположен в 40 м западнее от дома 85Б на Фряновском шоссе. Родник каптирован. Вода прозрачная, без запаха.	14,3	270	6,21
9-1	55,989507 38,127294	Находится между ДНП Феникс и СНТ Корякино, в 100 м к юго-востоку от улицы Лермонтовской. Присутствует три выхода родниковой воды. Все выходы каптированы, вода прозрачная, запаха не имеет.	12,7	112	5,54
9-2			11,4	160	5,71
9-3			11,2	132	6,09
10	56,020860 38,089243	Родник расположен у плотины Богословского водохранилища на р. Лашутка (деревня Костюнино)	13,9	122	6,35

Расчет интегрального показателя выполняли поэтапно: для компонентов воды определяли относительную значимость (2); затем провели нормализацию (3), величина q_{pH} рассчитана по (4); для каждого родника вычислили величину индекса качества воды WQI (Water Quality Index) (5); значения параметров нормировали по нормативам СанПиН № 1.2.3685-21 [2022] и рекомендациям ВОЗ:

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad (2)$$

где W_i — относительный вес, w_i — вес параметра, n — количество параметров;

$$q_i = \frac{C_i}{S_i} \times 100\%, \quad (3)$$

где C_i — измеренная концентрация, S_i — нормативная величина;

$$q_{pH} = \begin{cases} \frac{pH-7}{8,5-7} \times 100 & pH > 7, \\ \frac{7-pH}{8,5-7} \times 100 & pH < 7, \end{cases} \quad (4)$$

$$WQI = \sum_{i=1}^n W_i \times q_i. \quad (5)$$

Показатели поливного качества воды рассчитаны на основе концентраций ионов макросостава, выраженных в мг-экв/л.

Расчет показателя %Na (6) необходим для оценки риска ухудшения свойств почвы, поскольку чем выше концентрация натрия в воде для полива, тем активнее он насыщает почвенный поглощающий комплекс. Это, в свою очередь, увеличивает риск диспергирования и распада почвенных агрегатов, что ведет к разрушению структуры почвы и снижению ее проницаемости.

Таблица 2

Значения физико-химических параметров и макросостав вод родников

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9-1	9-2	9-3	10	ПДК, ВОЗ	СХС
Ca ²⁺	43,9	91,1	101	123	26,5	11,7	28,9	47,9	14,2	14,8	16,9	18,3	75	38,3
Mg ²⁺	11,7	16,8	14,4	21,2	5,6	2,3	6,3	9,9	3,4	6	4,2	4,4	50	16,5
Na ⁺	31,8	50,3	19,8	28,3	9,1	2,5	11,1	8,1	6,5	9,8	7	4,3	200	23,8
K ⁺	8,8	4,8	18,9	3,9	1,4	0,8	1,3	3,3	4,2	11	5,5	4,7	12	2,7
HCO ₃ ⁻	61,3	189	160	317	29,7	14,9	83,3	140	22,6	48,8	42,2	42,2	240	222,0
SO ₄ ²⁻	35,5	136	48	59,8	30,7	23,1	21,8	32,3	34,9	16	13,3	23,4	500	18,2
Cl ⁻	85,1	74,8	117	83,3	27,8	10,2	30,2	23,5	16,2	25	23,2	20,7	350	15,9
NH ₄ ⁺	3,7	0,7	2,0	0,4	0,2	0,1	0,2	0,4	0,4	1,1	0,5	0,3	1,5	0,52
NO ₃ ⁻	47,7	8,9	32	39	16,9	4,6	7,3	10,5	10,4	8,6	9,3	19,3	45	2,13
Минерализация	329	573	513	676	147	70	190	276	112	141	122	137	1500	354
ХПК, мгО/л	27	40	16	17	<5	<5	<5	13	9	7,7	10	8	15	не ука- зано
Жесткость, мг-экв/л	3,1	5,9	6,2	7,9	1,8	0,8	2	3,2	1	1,2	1,2	1,3	10	

Примечание. Содержание ионов в воде дано в мг/л. ПДК — предельно допустимая концентрация. ВОЗ — всемирная организация здравоохранения. СХС — средний химический состав в зоне гипергенеза области умеренного климата [Шварцев, 1998].

$$\begin{aligned} \%Na \text{ (Percentage Sodium)} &= \\ &= \frac{Na^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+}. \end{aligned} \quad (6)$$

Несмотря на важную роль магния в физиологии растений (центральный атом хлорофилла, активация ферментов, транспорт фосфатов) [Воеводина, Воеводин, 2015], расчет показателя МН (7) необходим для оценки риска при повышенном содержании магния в поливной воде. Высокие концентрации магния в воде приводят к его накоплению в почве, увеличивая ее щелочность, что ухудшает условия роста растений.

$$МН \text{ (Magnesium Hazard)} = \frac{Mg^{2+}}{Ca^{2+} + Mg^{2+}} \times 100. \quad (7)$$

В условиях повышенного теплообеспечения при каждом поливе рассады происходит интенсивное испарение воды, что способствует накоплению в почве малорастворимых солей. Таким образом, расчет индекса потенциального засоления PS (8) необходим для оценки долгосрочного кумулятивного эффекта от присутствия сульфат- и хлорид-ионов в анализируемой воде.

$$PS \text{ (Potential Salinity)} = Cl^- + \sqrt{SO_4^{2-}}. \quad (8)$$

Высокое содержание ионов Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ и HCO₃⁻ в родниковой воде снижает доступность влаги для корней растений из-за повышения осмотического давления почвенного раствора. Это может вызвать увядание даже при достаточной влажности почвы. Поэтому расчет индекса потенциальной проницаемости PI (9) необходим для оценки риска ухудшения водоснабжения растений при использовании такой воды.

$$PI \text{ (Permeability index)} = \frac{Na^+ + \sqrt{HCO_3^-}}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+} \times 100. \quad (9)$$

Категории оценки качества воды по указанным показателям приведены в табл. 4.

Результаты и обсуждение. Результаты определения основных физико-химических параметров и содержание ионов макросостава воды приведены в табл. 2. Для оценки качества воды полученные данные были сопоставлены с предельно допустимыми концентрациями (ПДК) по СанПиН № 1.2.3685-21, рекомендациями ВОЗ (выделены курсивом в табл. 2 [Guidelines ..., 2022]), а также со средними химическим составом подземных вод зоны гипергенеза умеренного климата [Шварцев, 1998].

Общий гидрогеохимический состав. При отборе проб температура родниковых вод колебалась в пределах 12–15 °С (в среднем 13 °С). Значения pH варьировали от 5,2 до 7,0, соответствуя слабोकислой и нейтральной среде. Электропроводность воды находилась в диапазоне 60–800 мкСм/см, при этом максимальные значения (до 800 мкСм/см) наблюдались в родниках 1, 2, 3 и 4, расположенных вблизи крупных населенных пунктов. В этих же родниках установлен высокий уровень величины химического потребления кислорода (ХПК 16–40 мгО/л), что может свидетельствовать о повышенной органической нагрузке. В водах остальных родников величина ХПК варьирует от незначимых величин (≤5 мгО/л) до 10 мгО/л.

Исследуемые воды характеризуются минерализацией от 70 до 676 мг/л. Значения ниже 100 мг/л зарегистрированы в родниках 5, 6, 9-1, 9-2, 9-3 и 10. В литературе отмечается, что потребление воды с минерализацией ниже 100 мг/л может вызывать вымывание солей [Рахманин и др., 1989; Guidelines..., 1980] и нарушение водно-солевого баланса

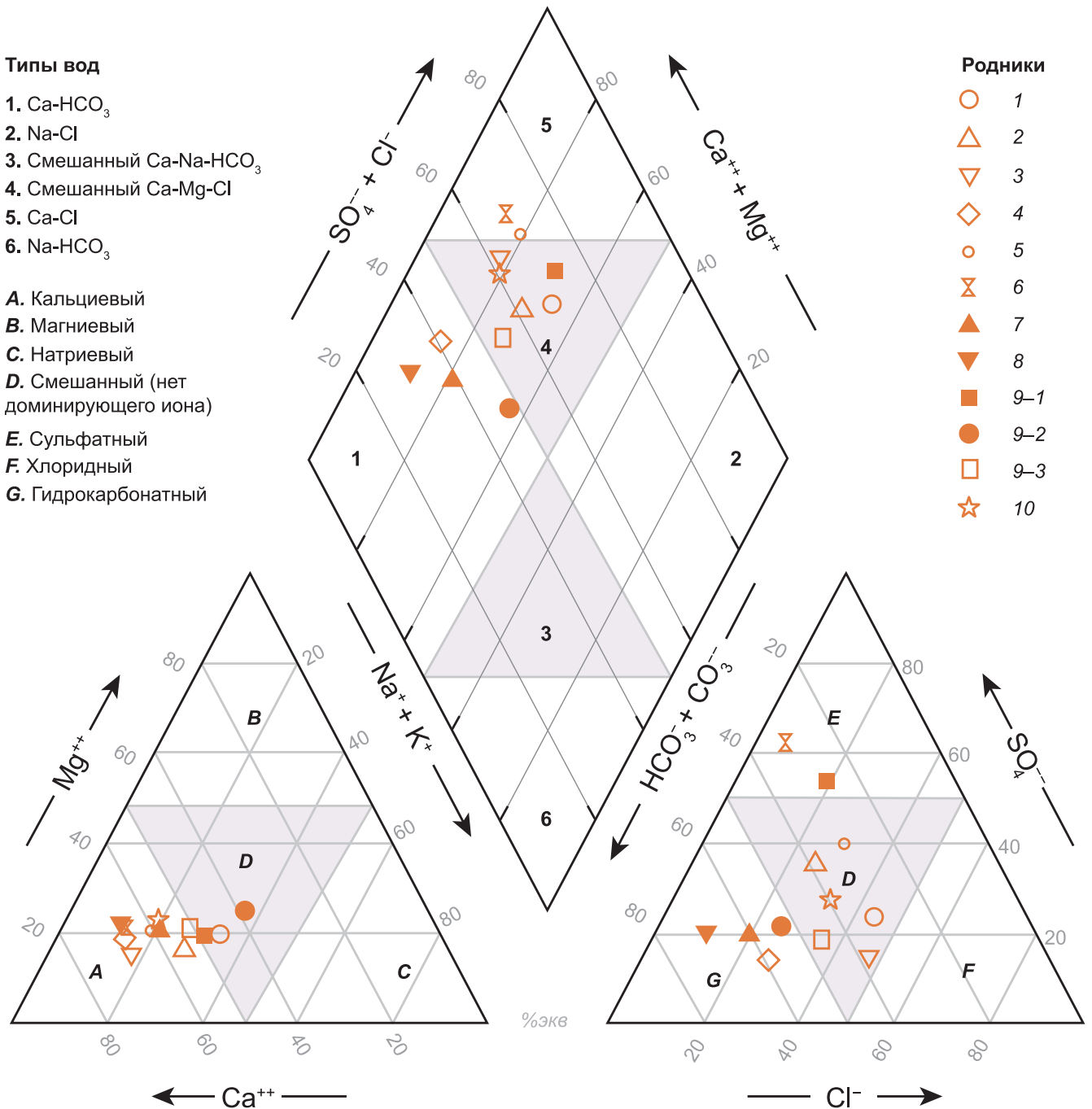


Рис. 2. Группировка изученных родниковых вод по составу

организма [Huang, 2024], что проявляется в повышенном водопотреблении, изменении диуреза и дисбалансе электролитов (Na⁺, K⁺, Mg²⁺) в сыворотке крови [Kozisek, 2005].

Величина общей жесткости вод варьирует от 0,8 до 8 мг-экв/л. Воды родников 6, 9-1, 9-2, 9-3 и 10 относятся к категории очень мягких (до 1,5 мг-экв/л); родников 1, 5, 7 и 8 — мягких (1,5–4,0 мг-экв/л). В родниках 2, 3 и 4 величина общей жесткости составляет 5,9, 5,2 и 7,9 мг-экв/л соответственно, что относит их воды к категории средней жесткости (4–8 мг-экв/л). Хотя высокая жесткость не оказывает прямого неблагоприятного влияния на здоровье, она способствует образованию накипи и увеличенному

расходу моющих средств, что повышает солевую нагрузку на водные ресурсы.

Повышенная концентрация иона аммония определена в родниках 1, 3 и 9-1 — 3,7, 2,0 и 1,1 мг/л при среднем содержании 0,1–0,4 мг/л. Содержание нитрат-иона в воде большинства родников составляет 2–10 мг/л, родники 1, 3, 4, 5 и 10 отличаются более высокими концентрациями — от 16,9 до 47,7 мг/л, что требует учета с точки зрения санитарных нормативов.

Для визуализации результатов определения макросостава построена диаграмма Пайпера (рис. 2). Анализ катионного состава вод показал преобладание кальция в большинстве проб, тогда как

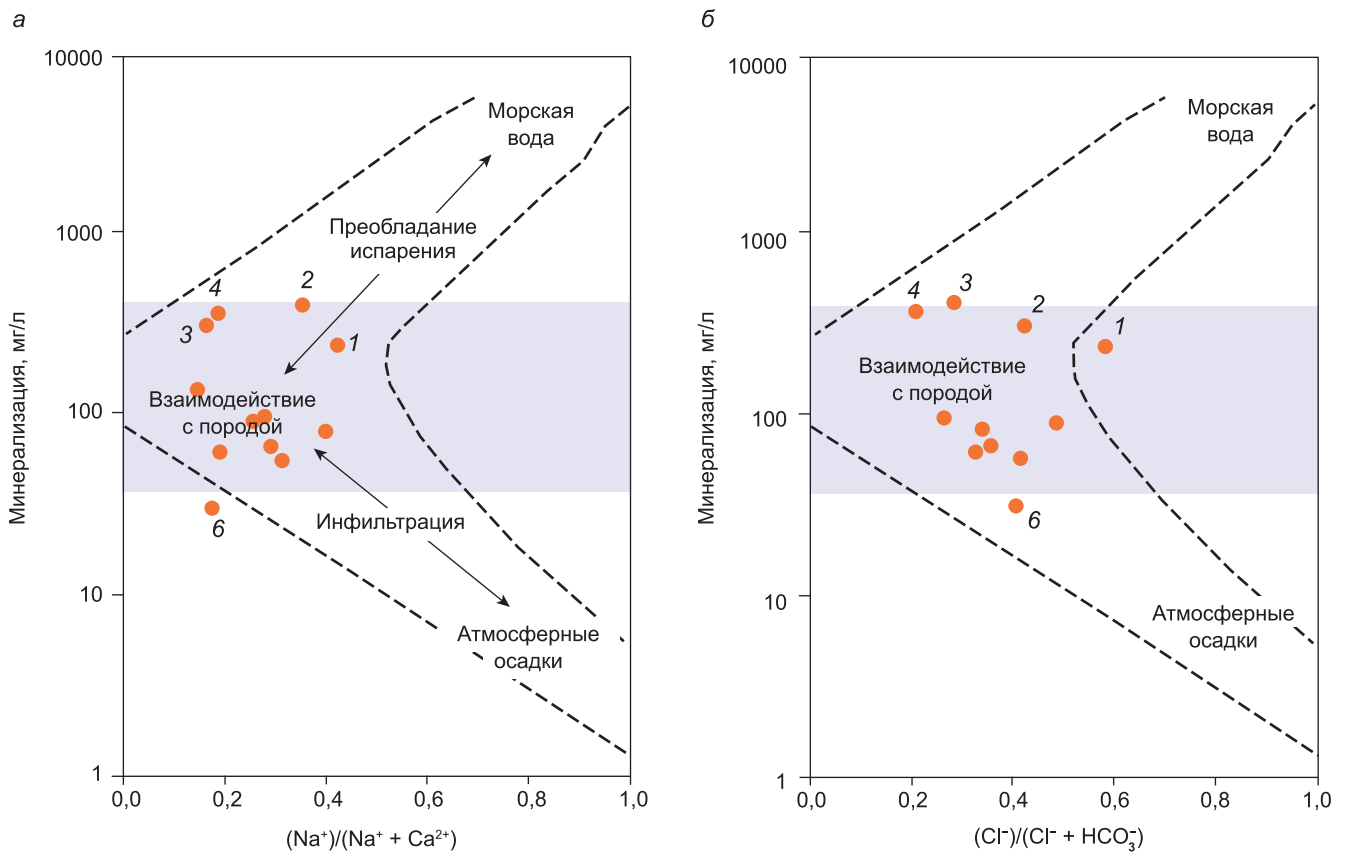


Рис. 3. Диаграммы Гиббса для вод исследованных родников: а — общая минерализация и $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$; б — общая минерализация и $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$

в водах родников 1, 9-1, 9-2 и 9-3 значительную долю составляют ионы магния, натрия и калия. По составу анионов большинство вод относится к смешанному типу, однако можно выделить родники 6 и 9-1 с преобладанием сульфат-иона, повышенное содержание хлорид-иона в водах родников 1 и 2. В водах родников 4, 7 и 8 доминирует гидрокарбонат-ион. Такое разнообразие гидрохимических типов вод ($\text{Ca}-\text{HCO}_3$, смешанный $\text{Ca}-\text{Mg}-\text{HCO}_3$ и $\text{Ca}-\text{Cl}$) отражает сложные процессы формирования вод, обусловленные природным взаимодействием с породами и возможным антропогенным влиянием.

Хлорид-ион служит важным индикатором происхождения и качества вод, позволяя дифференцировать атмосферные, морские и антропогенные источники [Schot, 2022]. В подземных водах умеренных широт естественное содержание Cl^- составляет 6–30 мг/л [Шварцев, 1998], тогда как в родниках 1–4 и 7 наблюдаются повышенные концентрации (до 117 мг/л в роднике 3). Несмотря на физиологическую необходимость хлоридов (поступают с NaCl , ~5,2 г/сутки), их избыток создает нагрузку на почки, а также может вызывать экологические последствия для компонентов экосистем, включая повреждение корневой системы растений [Иванов, 1994]. В условиях городского округа Щелково, где отсутствуют промышленные источники хлоридов [Островская, 2002; Шенькман, 2014], повышенные концентрации обусловлены длительным использованием противогололедных реагентов и удобрений (хлористый

калий) и отражают кумулятивный характер загрязнения.

Факторы формирования состава изученных вод. Для анализа факторов формирования состава подземных вод широко применяются диаграммы Гиббса (1970) и Гайлардета (1999), изначально разработанные для анализа поверхностных вод. Однако, согласно данным Google Scholar за 2024 г., из 623 цитирований, содержащих ключевое слово “groundwater”, 602 ссылаются на использование этих диаграмм. Как отмечают Marandi и Shand (2018), применение диаграмм Гиббса может быть неуместным в случаях, когда подземные воды находятся в изоляции более 12 000 лет и относятся к категории континентальных вод. Кроме того, они теряют информативность при значительном содержании сульфат-иона, образующегося при растворении гипса или окислении пирита, поскольку данный ион не учитывается в их структуре [Shand et al., 2016]. Низкая минерализация и преобладание гидрокарбонат- и хлорид-ионов, свойственные для вод изученных родников делают возможным применение диаграмм Гиббса и Гайлардета в данной работе.

На рис. 3 представлены результаты анализа исследованных родниковых вод с использованием диаграмм Гиббса. Основной вклад в формирование состава родниковых вод вносит взаимодействие с горными породами. Пробы 1, 2, 3 и 4, характеризуются более высокой минерализацией по сравнению с остальными, в то время как вода родника 6

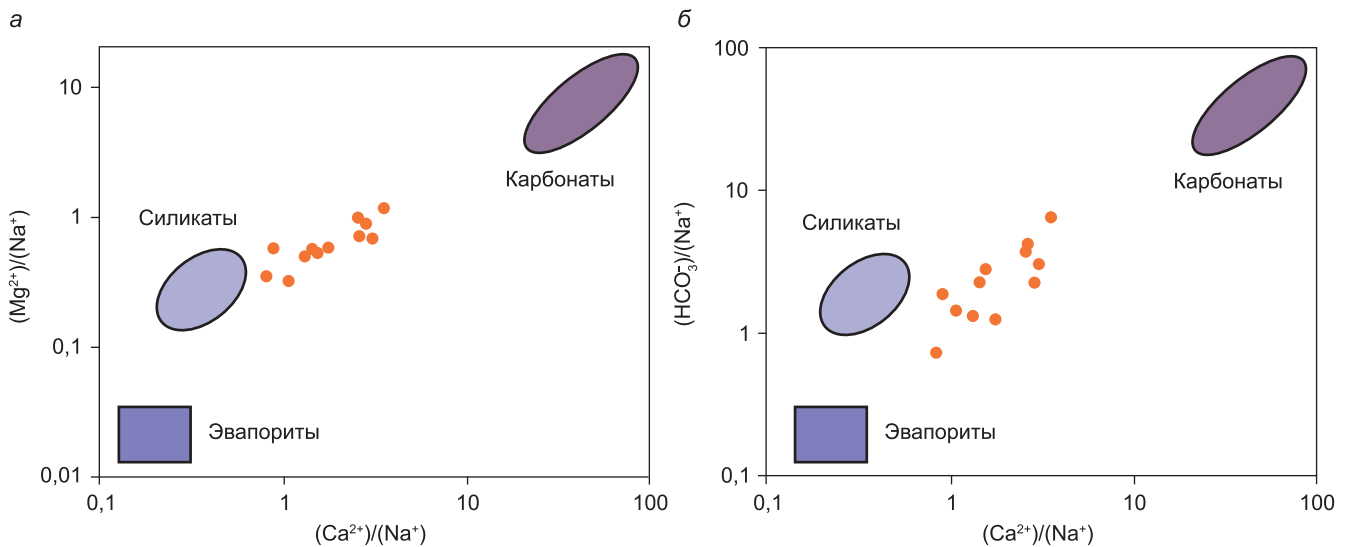


Рис. 4. Диаграмма смешения нормализованных по Na молярных соотношений в водах исследованных родников. а — Ca²⁺ и Mg²⁺; б — Ca²⁺ и HCO₃⁻

отличается минимальной минерализацией. Для вод с низкой минерализацией значительное влияние на химический состав может оказывать атмосферный сток, что подтверждается положением пробы 6 на графике — она находится ниже остальных, хотя не выделяется по соотношению Na⁺/(Na⁺ + Ca²⁺).

Анализ диаграммы Гайлардета (рис. 4) подтвердил, что основное влияние на химический состав родников оказывается выветриванием силикатных пород, о чем свидетельствует характерное распределение проб вдоль соответствующей линии при минимальном вкладе карбонатного выщелачивания. При этом в отдельных родниках отмечается высокое содержание натрия, указывающее на процессы засоления, которые, учитывая отсутствие в регионе эвапоритовых отложений, с высокой вероятностью связаны с применением дорожных реагентов.

Таким образом, состав вод исследуемых родников формируется за счет взаимодействия атмосферных вод с породами мезозойско-кайнозойского водоносного комплекса. Для определения влияющих факторов формирования состава воды была построена матрица соотношений катионов и анионов в воде, с акцентом на значение отношений Ca²⁺/Na⁺ в грунтовых водах [Schoeller, 1977; Малов, 2019].

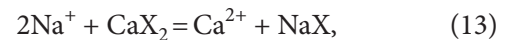
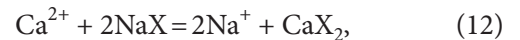
Для оценки направления ионного обмена в родниковых водах рассчитаны хлоридно-щелочные индексы (CAI-I и CAI-II) по формулам 10 и 11 соответственно (все значения в мг-экв/л):

$$CAI-I = \frac{Cl^- - (Na^+ + K^+)}{Cl^-}, \quad (10)$$

$$CAI-II = \frac{Cl^- - (Na^+ + K^+)}{HCO_3^- + SO_4^{2-} + CO_3^{2-} + NO_3^-}. \quad (11)$$

Родники разделились на группы с положительными и отрицательными значениями CAI (рис. 5, а). Данный результат свидетельствует о том, что для

исследуемых вод характерна как прямая (12), так и обратная (13) реакция ионного обмена:



где X — анион. Прямая реакция характерна для вод с преобладанием HCO₃⁻-Ca²⁺, что типично для изучаемых родников, а обратная связана с преобладанием Na⁺, что нехарактерно для данного региона.

Анализ соотношения Na⁺ и Cl⁻ (рис. 5, б) показал, что для ряда проб содержание Cl⁻ превышает линию y=x, что свидетельствует о дополнительном источнике хлорид-иона. Напротив, превышение Na⁺ над Cl⁻, характерное для естественного выветривания силикатных пород, не зарегистрировано.

Существенное превышение содержания Ca²⁺ над HCO₃⁻ в некоторых водах (рис. 5, в) указывает на дополнительное поступление кальция. Соотношение Ca/Mg (рис. 5, д) составляет 2,5–3:1, что значительно превышает типичное для доломитовых пород значение 1,6:1. При этом содержание Ca²⁺ превышает равновесные с SO₄²⁻ значения в 2–4 раза (рис. 5, е), что свидетельствует о не гипсовом источнике кальция.

Для большинства вод соотношение (Ca+Mg-SO₄-HCO₃)/(Na+K-Cl) близко к нулю, что указывает на их сбалансированный состав (отражено их расположением около начала координат на рис. 5, е). Однако в отдельных родниках наблюдаются anomalously высокие концентрации Cl⁻ и Ca²⁺, что можно связать с дополнительным источником поступления хлористого кальция из противогололедных реагентов и, возможно, строительных материалов [Аржанухина, 2010]). Таким образом проявляется техногенный фактор формирования состава родниковых вод.

Значимая роль техногенного фактора формирования химического состава вод подтверждается соотношениями NO₃⁻/Na⁺ и Cl⁻/Na⁺ (рис. 6), позволяющими определить вклад различных источников

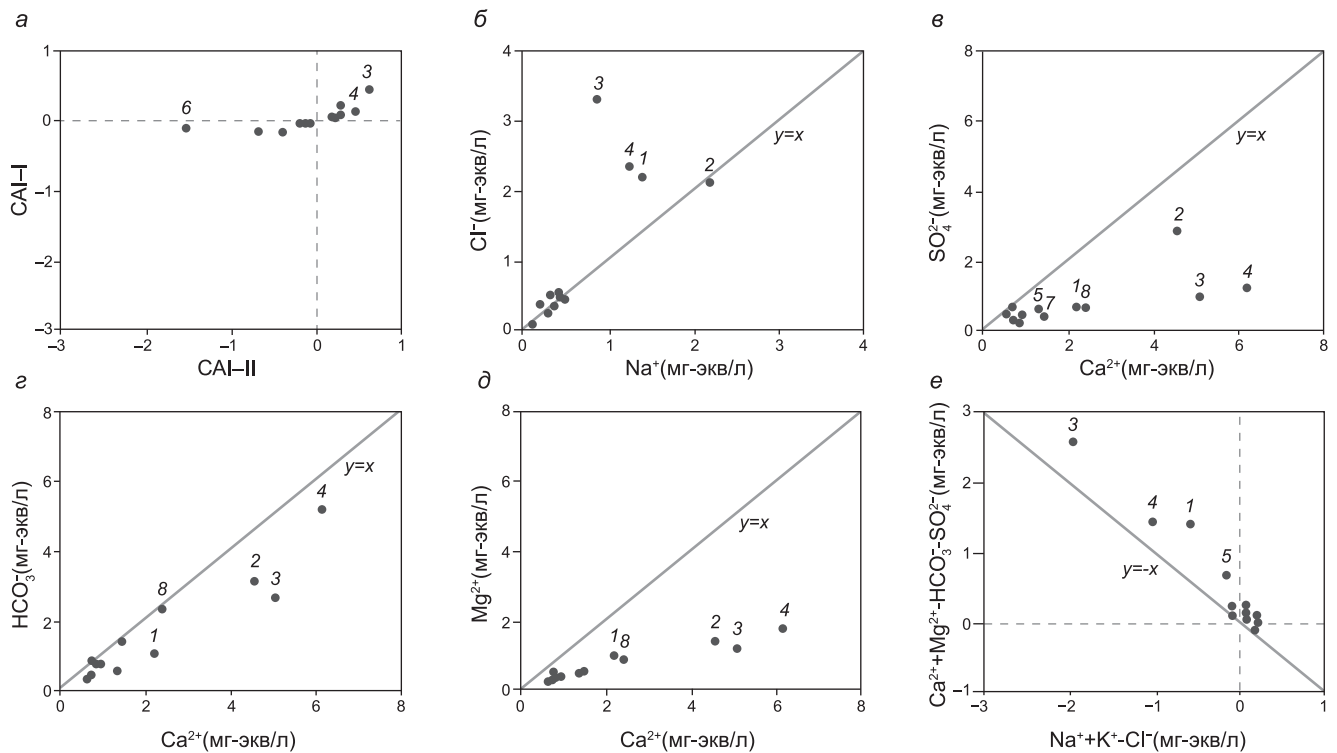


Рис. 5. Ионные соотношения в водах исследованных родников: а — CAI-I и CAI-II, где CAI — хлоридно-щелочной индекс (Chloro-Alkaline Index); б — Cl^- и Na^+ ; в — Ca^{2+} и SO_4^{2-} ; г — Ca^{2+} и HCO_3^- ; д — Ca^{2+} ; е — $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-})$ и $(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$

[Zhang et al., 2024]. Повышенное содержание соединений азота согласуется с данными о загрязнении реки Клязьмы, особенно на участках, прилегающих к населенным пунктам [Лямперт и др., 2022]. Основными источниками данного типа загрязнения выступают интенсивное использование азотных удобрений в сельском хозяйстве и поступление локальных сточных вод, при этом дополнительное влияние могут оказывать очистные сооружения ЗАО «Экоаэросталкер» [Демин, 2017]. Благодаря высокой миграционной способности, азотные соединения активно вымываются в грунтовые и поверхностные воды, приводя к снижению растворенного кислорода и потере биологического разнообразия в водных экосистемах [Chaudhry, 2017].

Таким образом, формирование состава родниковых вод определяется инфильтрацией атмосферных осадков через толщу современных отложений, испытывающих антропогенное воздействие со стороны коммунального, строительного и аграрного секторов. Для визуализации распределения и особенностей химического состава по территории были использованы диаграммы Стиффа (рис. 7).

Питьево и поливное качество воды. Ионы Ca^{2+} , Mg^{2+} , а также HCO_3^- , Cl^- , Na^+ и K^+ , тесно связанные с процессами метаболизма в человеческом организме [Gozhenko, 2020], не превышают значения ПДК и в целом находятся в рекомендуемом ВОЗ диапазоне, за исключением родников 3 и 4 (табл. 2). Содержание NH_4^+ составило 1,5–2,5 ПДК в родниках № 1 и № 3, содержание NO_3^- в роднике № 1 достигает величины ПДК. В родниках № 1–4 величина ХПК

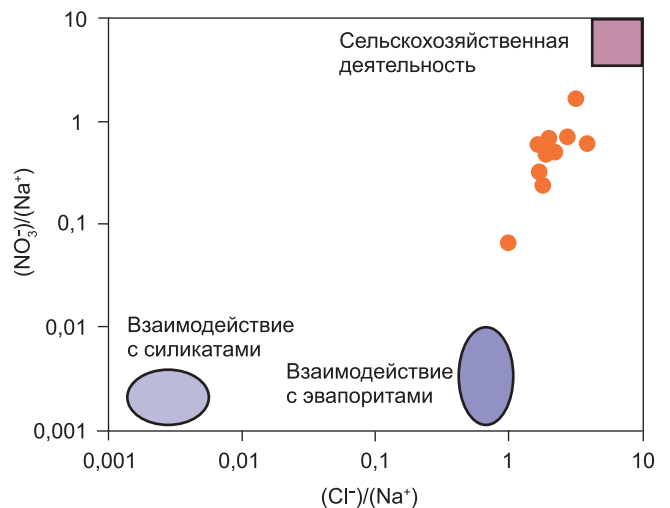


Рис. 6. Диаграмма смешения нормализованных по Na^+ молярных соотношений Cl^- и NO_3^- в водах исследованных родников

превышает норму в 1,1–2,5 раза, что указывает на присутствие органического вещества в воде. Более половины исследованных вод характеризуются пониженными значениями pH (5,2–5,8 при норме 6,0–9,0), что потенциально усиливает их коррозионную активность, а также может влиять на вкусовые характеристики воды.

При оценке качества воды по ПДК не учитывается кумулятивный эффект от длительного потребления вод с пограничными концентрациями загрязнителей. Исследованные родниковые воды характеризуются повышенным содержанием растворенных веществ (NO_3^- , SO_4^{2-} , K^+) по сравнению со средним

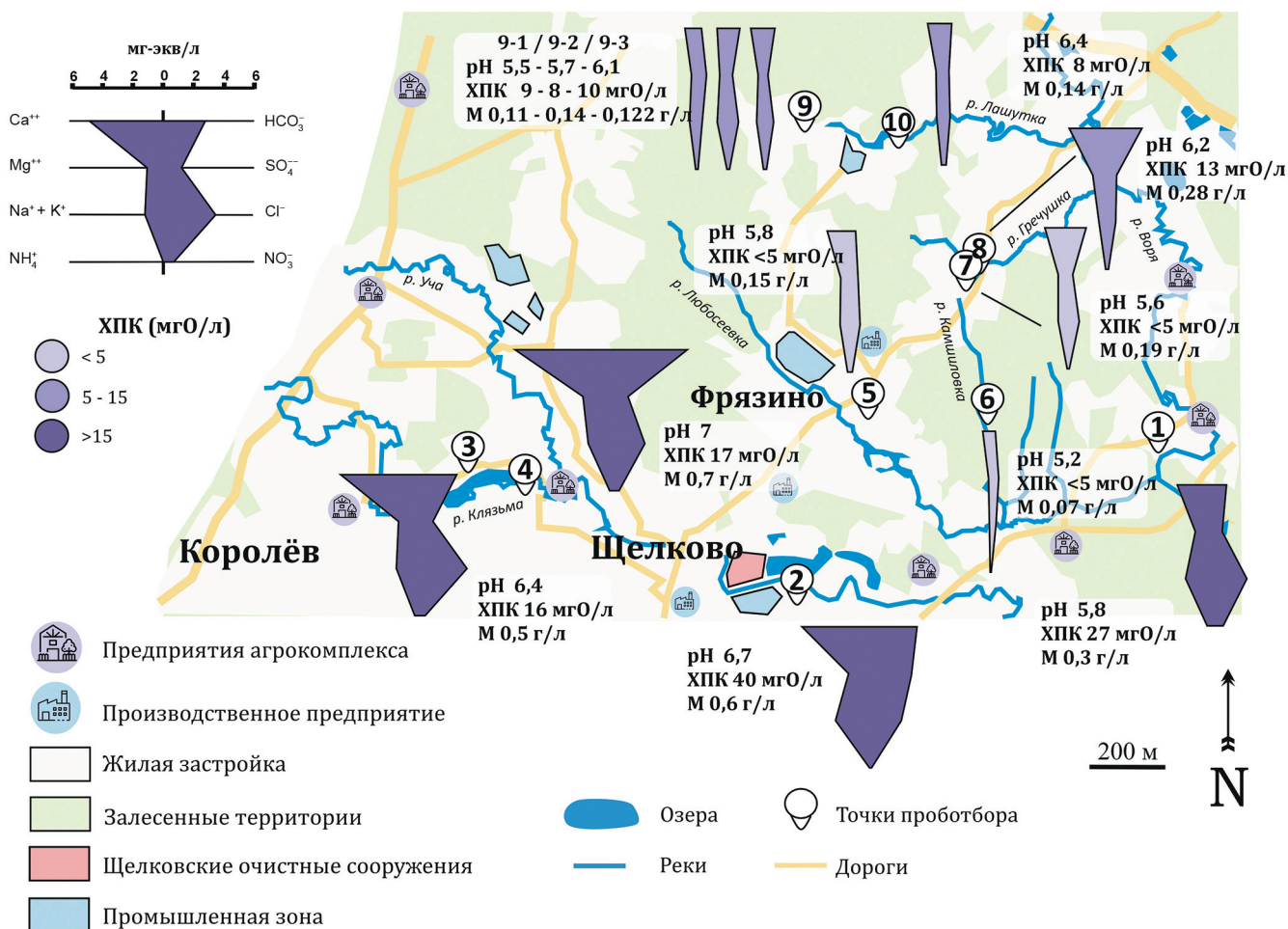


Рис. 7. Состав и основные показатели родниковых вод городского округа Щелково

химическим составом вод в зоне гипергенеза области умеренного климата (табл. 2). В связи с этим была проведена их комплексная оценка как по питьевым, так и по поливным критериям качества.

Для расчета индекса WQI использованы 13 компонентов (табл. 3), каждому из которых присвоен вес (баллы) в зависимости от его значимости для качества воды.

- наибольший вес (5 баллов) получил показатель электропроводности, так как высокая концентрация ионов может сделать воду непригодной для питья;

- вес 4 балла присвоен для показателей рН и минерализации из-за их влияния на вкус воды, а также SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , NH_4^+ , так как их повышенное содержание нетипично для природных вод, часто связано с техногенным загрязнением и снижает безопасность воды;

- вес 3 балла отдан показателю жесткости, Na^+ и K^+ . Они относительно безвредны в норме, но их избыток вызывает негативные эффекты; кроме того, высокий уровень содержания Na^+ и K^+ может сигнализировать о техногенном засолении;

- наименьший вес (2 балла) получили Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , так как это естественные компоненты воды, безопасные при нормальных концентрациях.

По величине WQI (табл. 4) воды родников распределены между категориями низкого качества

(родники 1, 3, 4), хорошего качества (родники 5, 7, 8, 9-2) и отличного (родники 6, 9-1, 9-3, 10). Попадание вод родника 2 в категорию очень низкого качества (WQI 204,5) связано с его расположением в зоне прямого влияния стоков от промзон и близостью Щелковских очистных сооружений.

Результаты расчета показателей поливного качества родниковых вод представлены в табл. 4. Ключевой показатель качества воды — электропроводность, повышенные значения обуславливают риск засоления почв. Вода родников 5, 6, 7, 9_1, 9_2, 9_3, 10 ($EC < 250$ мкСм/см) имеет отличное качество для полива, остальные — хорошее. По показателю %Na пробы 3, 4, 5, 6, 8, 10 относятся к отличному качеству, остальные — к хорошему. Во всех исследованных пробах индекс МН < 50 свидетельствует о сбалансированном содержании магния в воде. Индекс потенциального засоления (PS), варьирует в пределах 0,6–3,8, что соответствует категории вод отличного качества. Оценка индекса проницаемости (PI) показала, что воды двух родников относятся к I классу (100% проницаемости), тогда как остальные образцы соответствуют II классу (75% проницаемости).

Полученные данные свидетельствуют, что воды родников в целом пригодны для питья, а применение их вод для полива не окажет негативного влияния на

Таблица 3
**Распределение весов компонентов,
 используемых для определения WQI**

Компонент	Вес компонента, w_i	Относительный вес, W_i	Норматив, S_i (ПДК, ВОЗ)
ЕС, мкСм/см	5	0,114	1500
pH	4	0,091	7
M, мг/л	4	0,091	500
SO ₄ ²⁻ , мг/л	4	0,091	250
Cl ⁻ , мг/л	4	0,091	350
NH ₄ ⁺ , мг/л	4	0,091	1,5
NO ₃ ⁻ , мг/л	4	0,091	45
Na ⁺ , мг/л	3	0,068	200
K ⁺ , мг/л	3	0,068	12
Жесткость, мг-экв/л	3	0,068	10
Ca ²⁺ , мг/л	2	0,045	75
Mg ²⁺ , мг/л	2	0,045	50
HCO ₃ ⁻ , мг/л	2	0,045	240
	$w_i = 44$	$W_i = 1$	

структуру и свойства почвы в течение длительного периода.

Заключение. Состав родниковых вод городского округа Щелково формируется под воздействием инфильтрации атмосферных осадков через мезозойско-кайнозойские отложения, характерных для гидрогеологических условий Восточно-Европейской платформы. Основными загрязняющими факторами выступают диффузные (неточечные) источники, представляющие собой распространенные загрязнители, поступающие с обширных площадей и затрудняющие локализацию и контроль. К ним относятся соли противогололедных реагентов, селитебные территории и сельскохозяйственные угодья с применением минеральных удобрений, отходы сельскохозяйственного и животноводческого происхождения, выщелачивание компонентов строительных материалов, а также локализованные сточные воды промышленных и коммунальных объектов (очистные сооружения). Совокупное влияние этих факторов приводит к накоплению ионов Cl⁻, Na⁺, Ca²⁺, соединений азота и других загрязнителей в водоносных горизонтах и формирует современное качество родниковых вод исследования.

Комплексная оценка показала, что большинство вод исследованных родников соответствует требованиям питьевой воды и пригодны для сель-

Таблица 4

Категоризация вод по уровню их питьевого и поливного качества

Показатель	Уровень качества (значение)	Родники (значение показателя)
Питьевое качество (WQI)	Отличное (<50)	6 (23), 9-1 (42), 9-3 (47), 10 (47)
	Хорошее (50–100)	5 (55), 7 (57), 8 (81), 9-2 (60)
	Низкое (100–200)	1 (153), 3 (185), 4 (198)
	Очень низкое (200–300)	2 (205)
	Не пригодно (>300)	—
Показатели поливного качества воды		
Электропроводность	Отличное (<250)	5 (177), 6 (60), 7 (190), 9-1 (112), 9-2 (160), 9-3 (132), 10 (122)
	Хорошее (250–750)	1 (466), 2 (792), 3 (611), 4 (725), 8 (270)
	Сомнительное (750–2250)	—
	Плохое (>2250)	—
Процент натрия (%Na)	Отличное (0–20)	3 (18), 4 (14), 5 (19), 6 (14), 8 (12), 10 (19)
	Хорошее (20–40)	1 (34), 2 (28), 7 (21), 9-1 (31), 9-2 (37), 9-3 (27)
	Допустимое/Сомнительное (40–80)	—
Содержание магния (МН)	Удовлетворительное (<50)	1 (31), 2 (23), 3 (19), 4 (22), 5 (26), 6 (25), 7 (27), 8 (25), 9-1 (28), 9-2 (40), 9-3 (29), 10 (29)
	Неудовлетворительное (> 50)	
Индекс проницаемости (PI)	Класс I (>75%)	9-2 (83), 9-3 (78)
	Класс II (75–25%)	1 (55), 2 (49), 3 (39), 4 (39), 5 (51), 6 (69), 7 (68), 8 (54), 9-1 (74), 10 (72)
	Класс III (<25%)	—
Потенциальная соленость (PS)	Отличное–хорошее (<5)	1 (2,6), 2 (3,5), 3 (3,8), 4 (3,0), 5 (0,9), 6 (0,3), 7 (0,7), 8 (0,7), 9-1 (0,6), 9-2 (0,7), 9-3 (0,7), 10 (0,6)
	Хорошее–удовлетворительное (5–10)	—
	Удовлетворительное–неудовлетворительное (>10)	—

скохозяйственного использования. Однако четыре источника (родники 1, 3, 4 и 2) были классифицированы как «удовлетворительные» (первые три) и «плохие» (родник 2) по качеству питьевой воды из-за сверхнормативного содержания органики, нитратов и аммония. Эти результаты подчеркивают необходимость целенаправленного контроля для отдельных объектов.

Полученные данные свидетельствуют о важности комплексного и системного подхода к оценке качества подземных вод с организацией регулярного мониторинга родников. Это позволит своевременно выявлять неблагоприятные изменения,

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Анализ российского рынка питьевой и минеральной воды: итоги 2023 г., прогноз до 2027 г. URL: <https://marketing.rbc.ru/articles/14737/> (дата обращения: 15.07.2024).

Аржанухина С.П., Сухов А.А., Кочетков А.В., Карпеев С.В. Состояние нормативного обеспечения инновационной деятельности дорожного хозяйства // Качество. Инновации. Образование. 2010. № 9. С. 24–29.

Буймова С.А., Костров В.В. Изменение качества родниковых вод в городах Иваново и Кохма Ивановской области // Теоретическая и прикладная экология. 2008. № 2. С. 38–42.

Вагнер Б.Б. Манучаряни Б.О. Геология, рельеф и полезные ископаемые Московского региона: Учебное пособие по курсу «География и экология Московского региона». М.: МГПУ, 2003. 92 с.

Веницианов Е.В., Кирпичникова Н.В. Проблема регулирования неконтролируемых диффузных загрязнений водных объектов // Материалы международной конференции «Экологические проблемы бассейнов крупных рек». 2018. № 6.

Воеводина Л.А., Воеводин О.В. Магний для почвы и растений // Мелиорация и гидротехника. 2015. № 2 (18). С. 70–81.

Генеральный план городского округа Щёлково Московской области. Т. 2. Охрана окружающей среды. URL: <https://shhyolkovo.ru/normativnye-dokumenty/arkhitektura-i-gradostroitelstvo/utverzhdennyy-generalnyy-plan-gorodskogo-okruga-shchelykovo> (дата доступа: 15.03.2024).

Головатый С.Е., Барановский В.С., Савченко С.В. Эколого-геохимическая оценка земель в зоне воздействия птицеводческих комплексов. // Экологический вестник. 2015. № 4(34). С. 90–95.

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

Демин А.П. Сточные воды и качество воды в бассейне реки Волга (2000–2015 гг.) // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2017. № 48. С. 55–71.

Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: Справочник: В 6 кн. / Под ред. Э.К. Буренкова. Кн. 2. Главные р-элементы. М.: Недра, 1994. 303 с.

Кострикин А.В., Кострикин П.А., Бобрович Л.В. Экологическое состояние родников Мичуринска-наукограда // Наука и образование. 2020. Т. 3. № 4.

Лямперт Н.А., Ничипорова И.П., Лобченко Е.Е., Первышева О.А. Современное состояние и динамика качества

минимизировать риски для здоровья населения при длительном потреблении данной воды и предотвращать деградацию почв при использовании вод для полива.

Следует отметить, что результаты отражают состояние вод в период отбора проб и не учитывают сезонные или межгодовые колебания качества. Для более точного понимания динамики качества необходимы долговременные исследования с расширением спектра контролируемых параметров.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-00121, <https://rscf.ru/project/25-27-00121/>

воды р. Клязьма // Успехи современного естествознания. 2022. № 3. С. 104–110.

Малов А.И. Геохимические индикаторы формирования подземных вод Юго-Восточного Беломорья // Отечественная геология. 2019. № 4. С. 75–83.

Новосельцева О.А., Стожко Н.Ю. Сравнительная оценка качества родниковой, водопродной и очищенной воды // Экологическая безопасность в техносферном пространстве. 2019. С. 202–205.

Островская Е.В. Некоторые вопросы экологии природных вод Новомосковского района Тульской области // Записки Горного института. 2002. Т. 152. С. 39–41.

Рахманин О.А., Михайлова Р.И., Филиппова А.В. и др. О некоторых аспектах биологического действия дистиллята // Гигиена и санитария. 1989. № 3. С. 94–95.

СанПиН 1.2.3684-21. (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).

Слабунова А.В., Сурувикина А.П. О проблеме диффузного загрязнения водных объектов // Мелиорация и гидротехника. 2020. № 2 (38).

Трифонов Т.А., Савельев О.В., Марцев А.А. и др. Оценка качества питьевой воды родников г. Владимира // Здоровье населения и среда обитания. 2022. Т. 30, № 6. С. 23–31.

Устойчивое управление почвенными ресурсами в Евразийском регионе. ФАО и Евразийский центр по продовольственной безопасности. 2021. <https://doi.org/10.4060/cb5827.ru> (дата обращения: 03.08.2024).

Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. 2-е изд., исправл. и доп. М.: Недра, 1998. 366 с.

Шенькман Б.М. Зона свободного водообмена Верхнеконского нефтегазоконденсатного месторождения в начале этапа промышленной эксплуатации // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Наука о Земле. 2014. Т. 7. С. 129–144.

Янин Е.П. Техногенные речные илы (условия формирования, вещественный состав, геохимические особенности). М.: НП «АРСО», 2018. 415 с.

Aminiyan M.M., Aminiyan F.M. Comprehensive integrated index-based geochemistry and hydrochemical analyses of groundwater resources for multiple consumptions under coastal conditions // Environmental Science and Pollution Research. 2020. 27. 21386–21406.

Bousalsal B., Satouh A., Egbueri J.C., et al. Groundwater for drinking and sustainable agriculture and public health hazards of nitrate: Developmental and sustainability implications for

an arid aquifer system // *Results in Engineering*. 2025. T. 25. C. 104–160.

Chaudhry F.N., Malik M.F. Factors affecting water pollution: a review // *J. Ecosyst. Ecography*. 2017. T. 7, № 1. C. 225–231.

Gaillardet J.D., Dupré B.L., Louvat B., et al. Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers // *Chemical geology*. 1999. T. 159, № 1–4. C. 3–30.

Gibbs R.J. Mechanisms controlling world water chemistry // *Science*. 1970. T. 170, № 3962. C. 1088–1090.

Giri S., Singh A. K. Human health risk assessment via drinking water pathway due to metal contamination in the groundwater of Subarnarekha River Basin, India // *Environmental monitoring and assessment*. 2015. T. 187, № 3. C. 63.

Gozhenko A., Badiuk N., Nasibullin B., et al. The role of macronutrients in the implementation of the corrective effect of low-mineralized water in experimental metabolic syndrome // *Roczniki Państwowego Zakładu Higieny*. 2020. T. 71, № 4. C. 423–430.

Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda. Geneva: World Health Organization; 2022. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064>

Guidelines on health aspects of water desalination. ETS/80.4. Geneva: World Health Organization, 1980. URL: https://applications.emro.who.int/docs/who_em_es_371_en.pdf

Huang T., Hao Y., Tan Y., et al. Low-Mineral Water Diminishes the Bone Benefits of Boron // *Nutrients*. 2024. T. 16, № 17. C. 2881.

Kallon H. Hydrochemical Characteristics, Controlling Factors and Water Quality Evaluation of Groundwater Quality in Kono, Sierra Leone // *Adv Earth & Env Sci*. 2024. T. 5, № 2. C. 1–17.

Kaushal S. S., Groffman P. M., Likens G. E., et al. Increased salinization of fresh water in the northeastern United States // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2005. T. 102, № 38. C. 13517–13520.

Kozisek F. Health risks from drinking demineralised water // *Nutrients in drinking water*. 2005. T. 1, № 1. C. 148–163.

Manga M. Using springs to study groundwater flow and active geologic processes // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2001. T. 29, № 1. C. 201–228.

Marandi A., Shand P. Groundwater chemistry and the Gibbs Diagram // *Applied Geochemistry*. 2018. T. 97. C. 209–212.

National Management Measures to Control Non-point Source Pollution from Agriculture. 2003. Document No. EPA 841-B-03-004.

Prasad S., Singh A., Korres N.E., et al. Sustainable utilization of crop residues for energy generation: A life cycle assessment (LCA) perspective // *Bioresource technology*. 2020. T. 303. C. 122964.

Schoeller H. Geochemistry of groundwater // *Groundwater studies — an international guide for research and practice*. Paris, 1977. Vol. 15. P. 1–18.

Schot P., Beard J., Hissink R., et al. Adapting classical water quality diagrams for ecohydrological and policy applications // *Journal of Hydrology X*. 2022. T. 17. C. 100137.

Shand P., Gotch T., Love A., et al. Extreme environments in the critical zone: linking acidification hazard of acid sulfate soils in mound spring discharge zones to groundwater evolution and mantle degassing. *Sci. Total Environ.* 568, 1238–1252. 2016.

Schwarzenbach R.P., Egli T., Hofstetter T.B., et al. Global Water Pollution and Human Health // *Annual review of environment and resources*. 2010. T. 35, № 1. C. 109–136.

Schwarzenbach R.P., Escher B.I., Fenner K., et al. The challenge of micropollutants in aquatic systems // *Science*. 2006. T. 313, № 5790. C. 1072–1077.

Chen Y., Peng W., Lin M., et al. Seasonal variations and water chemical control mechanism of water quality in a suburban river near a coal city: a case study in the Xinbian River of Suzhou City, Anhui Province, China // *Water Practice & Technology*. 2024. T. 19, № 3. C. 874–886.

Zhang H., Wang Z., Wang X., et al. Hydrochemical characterization and health risk assessment of different types of water bodies in Fenghuang Mountain Area, Northeast China // *Environmental Geochemistry and Health*. 2024. T. 46, № 8. C. 292.

Статья поступила в редакцию 03.11.2025,
одобрена после рецензирования 12.11.2025,
принята к публикации 27.02.2026