ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ
HYDROLOGICAL REGIME OF WATER OBJECTS

Научная статья / Scientific paper
УДК: 556.5
DOI: 10.34753/HS.2026.8.1.87

Гидрохимический режим малых водоёмов урбанизированных территорий (на примере прудов г. Самары)

О. Я. Червяцова[1], Д. С. Казадаев[2], Д. В. Киселёва[3], Т. Г. Окунева[3]
[1]Государственный природный биосферный заповедник «Шульган-Таш», Республика Башкортостан, Россия; [2]Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия;
[3]Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия
e-mail: kittary@yandex.ru

Аннотация. На территории городской застройки Самары сохранилось более 35 искусственных прудов, созданных в доурбанистический период (конец XIX – начало XX века). Изначально эти водоёмы обустраивались на базе существовавшей овражно-балочной сети малых водотоков для ирригационных целей на территориях бывших дач и совхозов. В настоящее время они представляют собой ценный рекреационный ресурс: на их основе организованы зелёные зоны и места отдыха, востребованные среди городского населения. Однако в результате включения в зону городской застройки водосборная площадь прудов сократилась, вследствие чего многие из них перешли в деградирующее состояние. Целью исследования являлась гидрохимическая и изотопная характеристика вод городских прудов города Самары в контексте региональных геологических и гидрогеологических условий. На основе полученного массива данных и применения ряда методов статистической обработки – включая классификацию по типам вод, кластеризацию, анализ данных методом главных компонент (PCA), расчёт ионных соотношений и другие подходы – были предприняты попытки диагностировать типы питания прудов и основные механизмы метаморфизации их вод. Выявлено, что для водоёмов, расположенных на водораздельной поверхности, преобладает подземный тип питания. Такие водоёмы достаточно уязвимы: их состояние может быстро деградировать при потере связи с водоносным горизонтом, например, в результате заполнения котловины донными осадками. Для водоёмов, размещённых на хорошо дренируемых склонах долин рек Волги и Самары, доминирует питание за счёт поверхностного стока. Основными факторами, обусловливающими гидрохимическое разнообразие прудов помимо типа питания, являются техногенное засоление, закисление, испарительное концентрирование, а также биологические процессы.

Ключевые слова: химический состав вод; городские водоёмы; пруды г. Самары.
Для цитирования: Червяцова О. Я., Казадаев Д. С., Киселёва Д. В., Окунева Т. Г. Гидрохимический режим малых водоёмов урбанизированных территорий (на примере прудов г. Самары) // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2026. Т. 8. Вып. 1. С. 87–110. DOI: 10.34753/HS.2026.8.1.87.

Hydrochemical Regime of Small Water Bodies in Urban Areas (Using Samara City Ponds as an Example)

Olga Y. Chervyatsova[1], Dmitry S. Kazadaev[2], Daria V. Kiseleva[3], Tatyana G. Okuneva[3]
[1]"Shulgan-Tash" State Natural Biosphere Reserve, Russia; [2]Togliatti State University, Togliatti, Russia;
[3]Academician A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia
e-mail: kittary@yandex.ru

Abstract. More than 35 artificial ponds created during the pre-urbanisation period (late 19th – early 20th century) have been preserved within Samara's urban area. These water bodies were originally developed based on the existing network of ravines and small watercourse channels for irrigation purposes on sites of former dachas and state gardens. Today, they represent valuable recreational resources, with green spaces and leisure areas established

around them that are in high demand among the urban population. However, their inclusion within the urban development zone has caused their catchment area to shrink, resulting in many of the ponds falling into disrepair. The study investigated the hydrochemical and isotopic properties of waters in urban ponds in Samara, considering regional geological and hydrogeological contexts. Using a range of statistical methods, including classification by water type, clustering and principal component analysis (PCA), as well as the calculation of ion ratios, the study aimed to identify the types of water recharge to the ponds and the main mechanisms of water transformation. It has been found that, for water bodies situated on a watershed, groundwater recharge is the predominant source of water recharge. These water bodies are highly vulnerable and can degrade rapidly if they lose contact with the aquifer, for instance if it fills with sediment. In contrast, for water bodies located on the well-drained slopes of the Volga and Samara River valleys, surface runoff is the dominant source of water. Apart from the type of water recharge, the main factors controlling the hydrogeochemical diversity of ponds are anthropogenic salinization, acidification, evaporative concentration and biological activity.

Keywords: chemical composition of water; urban water bodies; Samara city ponds.

For citation: Olga Y. Chervyatsova, Dmitry S. Kazadaev, Daria V. Kiseleva, Tatyana G. Okuneva. The Hydrochemical Regime of Small Water Bodies in Urban Areas (Using Samara City Ponds as an Example). Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2026, vol. 8, iss. 1, pp. 87–110. DOI: 10.34753/HS. 2026.8.1.87. (In Russian; abstract in English).

Введение

Пруды и озёра играют важную роль в городском ландшафте, представляя разнообразные экосистемные услуги, такие как регуляция микроклимата, удержание фосфора и азота, поддержание биоразнообразия и др. Они являются ценным рекреационным ресурсом, имеют эстетическое и культурное значение.

Проблемы сохранения городских водоёмов часто связаны с потерей водосборной площади при застройке и прокладке коммуникаций. При этом, сокращение растительного покрова и обилие асфальтовых покрытий увеличивают скорость стока, способствуя развитию эрозии и накоплению донных осадков. В результате таких воздействий городские водоёмы часто деградируют.

На территории городской застройки г. Самары сохранилось более 35 прудов, созданных в доурбанистический период. Эти водоемы хорошо изучены в биотическом отношении [1–5], но сведения об их гидрологическом и гидрохимическом режиме носят фрагментарный характер [6–8]. Исключение составляет Нижний пруд Ботанического сада, где проводились комплексные исследования, позволившие выявить меромиктический характер этого водоёма [9]. Целью работы является генетическая интерпретация гидрохимических и изотопных данных (полученных в рамках настоящего проекта и опубликованных ранее) для выявления особенностей питания прудов – в частности, предполагавшегося ранее [9] участия подземных вод.

Район исследования

Геологические и гидрогеологические условия. Территория г. Самары находится в междуречье рек Волги и Самары. Воды этих рек находятся в подпоре Саратовского водохранилища с абсолютной отметкой уреза 28 м. Водораздельный массив (рисунок 1) представляет собой эрозионно-денудационное плато [10], сложенное отложениями уржумского яруса P_2ur [11] (ранее относившихся к татарскому ярусу P_2t [12, 13]). Эти отложения представлены глинами и алевролитами с прослоями мергелей, доломитов и песчаников [12, 13]. Водораздельные склоны сложены породами казанского яруса, подразделяющегося на два подъяруса: верхний P_2kz_2 (преимущественно терригенные породы с подчиненной ролью карбонатов) и нижний P_2kz_1 (преимущественно карбонатные породы). Во всех стратиграфических подразделениях могут локально встречаться прослои гипсов и ангидритов [14]. Коренные породы покрыты прерывистым чехлом рыхлых элювиально-делювиальных четвертичных отложений [10], мощность которых в некоторых местах достигает 30–40 м [15], а в восточной и северной части города – аллювиальными отложениями (QI-III) надпойменных террас рек Самары и Волги.

Основной региональный водоносный комплекс г. Самары приурочен к карбонатным породам P_2kz_1 [12]. Его пьезометрический уровень контролируется реками Волга и Самара и находится на отметках 31–37 м н.у.м. [16]. В районе исследования так же распространены пластово-поровые воды терригенных пород уржумского яруса [13] и локальные водоносные горизонты в четвертичном покрове над слабопроницаемыми разностями коренных пород [10, 15–17], которые наиболее важны в контексте данной работы.

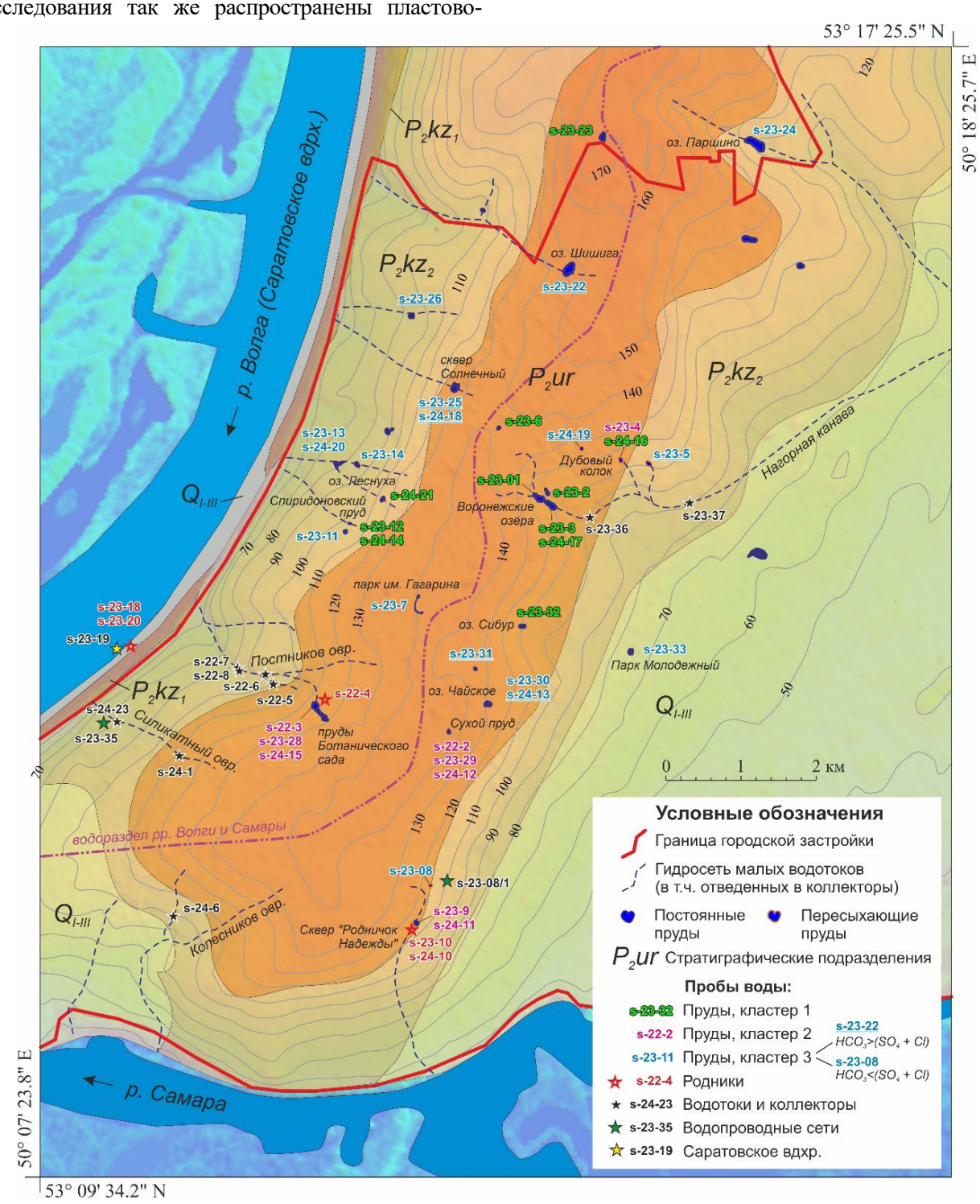


Рисунок 1. Карта-схема расположения изучаемых объектов и точек отбора проб, геологическая основа по [11, 13]

Figure 1. Schematic map showing the location of the study site and sampling points; geological framework based on [11, 13]

Гидроклиматический режим. Район г. Самары относится к лесостепной ландшафтно-климатической зоне. Климат умеренно-континентальный с жарким летом (Dfa по классификации Кеппена-Гайгера). Самым теплым месяцем является июль (21,9 °С), наиболее холодным – январь (-9,6 °С), норма осадков составляет 561 мм/год[1]. Величина потенциальной эвапотранспирации, оцененная методом Торнтвейта, составляет 507 мм/год. Для питания речных и подземных вод наиболее значимы превосходящие испаряемость осадки холодного времени года (с октября по апрель), сумма эффективных осадков которого составляет около 250 мм/год.

Пруды г. Самары: история создания и морфология. Большинство прудов созданы на базе существовавшей овражно-балочной сети малых водотоков, путем расширения русла и отсыпки перегораживающих земляных плотин. В основном, пруды создавались на территориях бывших дач и совхозов в ирригационных целях. Наиболее старые пруды созданы на рубеже 19–20-х веков (Ботанического сада, скверов Солнечный и Родник Надежды, Сибур, Чайский, Сухой и Спиридоновский). Часть прудов (Шишига, Паршино, в парке Гагарина и сквере Дубовый колок) созданы позже, между 1934 и 1970 гг. [4, 6, 7, 8, 9].

Большинство прудов имеют площадь 0,7–2,0 тыс. м^2 и глубину 0,5–2,0 м, некоторые могут пересыхать в конце лета (таблица 1, см. рисунок 1). К крупным (с площадью зеркала S = 22,2–5,4 тыс. м^2) и относительно глубоким (3,2–5,8 м) прудам относятся Паршино, Нижний пруд Ботанического сада, Воронежские озёра и пруд в сквере Солнечный. Так же выделяется ряд крупных (S = 7,6–13,5 тыс. м^2) и мелководных (<1,5 м) водоёмов (Чайский пруд, Шишига, Леснуха). Большинство прудов бессточные, разгрузка происходит путём фильтрации через плотины и испарение.

Материалы и методы

Отбор проб воды проводился в июле 2022 г., в августе 2023 и в сентябре 2024 г. Наиболее крупная серия водных проб 2023 г. анализировались по макро- и микрокомпонентному составу и стабильным изотопам. В пробах 2022 и 2024 г. (поверхностный сток, ключевые объекты для мониторинга и пересыхавшие в 2023 г. водоёмы) определялся только макрокомпонентый состав. Все пробы отобраны в прибрежной зоне прудов (с берега) из поверхностного (10–20 см) слоя воды.

Для оценки условий питания прудов наибольший интерес представляют подземные воды первого водоносного горизонта в породах P_2ur и/или в перекрывающих четвертичных отложениях (поскольку точно разделить эти типы вод невозможно, мы используем обозначение P_2ur-d,eQ). Они доступны в двух каптированных родниках на водораздельных склонах речных долин рек Волги и Самары (см. рисунок 1). Так же использованы ретроспективные данные по родникам г. Самары [17].

Для характеристики поверхностного стока г. Самары отобраны пробы воды из водотоков (в частности, отведенных в дренажно-ливневые коллекторы) оврагов Постнякова, Силикатного и Колесникова и ручья Нагорная канава (см. рисунок 1). Так же отбирались пробы воды р. Волги и из водопроводных сетей на изотопные анализы.

Параметры воды pH и T измерялись с помощью прибора «HANNA HI98195». Концентрации HCO_3^-, Ca^{2+}, общая жесткость, SO_4^{2-} и Cl^- определялись титриметрическими методами (ПНД Ф 14.1:2.245-07, РД 2.24.395–2017, ПНДФ 14.1:2.96-97, РД 52.24.406–2018), Na^++K^+ и Mg^{2+} – расчётным методом.

Для микроэлементного анализа пробы предварительно пропускались через фильтры 0,45 μm и подкислялись HNO_3, очищенной дважды перегонкой при температуре ниже температуры кипения в перегонных установках (Savillex, США; Berghof, Германия). Измерения проводились на квадрупольном ИСП-масс-спектрометре NexION 300S (PerkinElmer) в Институте геологии и геохимии УрО РАН (ЦКП Геоаналитик, г. Екатеринбург).

[1] Сайт Росгидромета https://meteoinfo.ru

Таблица 1. Марокомпонентный и изотопный составы воды прудов г. Самары
Table 1. Major ions and isotopic compositions of water from ponds in Samara

Код пробы	Объект	S м²/ $H_{макс}$ м[2]	pH	HCO_3^-, мг/л	Cl^-, мг/л	SO_4^{2-}, мг/л	Жест., ммоль/л	Ca^{2+}, мг/л	Mg^{2+}, мг/л	Na+K, мг/л	М., г/л	$\delta^{18}O$, V-SMOW	δ^2H, V-SMOW	Тип воды[3]	Кластер[4]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
s-23[1]-01	Воронежские озёра, верхнее	7514 / 2	7,08	433,1	110,4	42,2	9,6	100,2	57,0	34,2	0,78	-6,7	-65,7	$C\frac{Ca}{II}$	1
s-23-02	Воронежские озёра, среднее	2513 / 2,7	7,10	549,0	129,9	88,3	12,7	130,3	76,9	41,4	1,02	-7,3	-68,1	$C\frac{Ca}{II}$	1
s-23-03	Воронежские озёра, нижнее	7815 / 3,7	7,22	414,8	103,2	69,1	9,4	96,2	57,0	40,2	0,78	-7,4	-69,7	$C\frac{Ca}{II}$	1
s-24-17			7,03	396,5	110,4	69,1	10,0	104,2	59,5	24,1	0,76			$C\frac{Ca}{II}$	1
s-23-04	Сквер Дубовый колок	1968 / < 1,5	6,56	91,5	393,4	126,7	4,5	76,2	8,7	246,8	0,94	-6,4	-65,3	$Cl\frac{Na}{III}$	2
s-24-16			7,50	274,5	231,4	76,8	9,4	78,2	68,2	74,1	0,80			$C\frac{Mg}{III}$	1
s-23-05	ул. Стара-Загора	900 / 0,7	7,18	366,0	80,1	11,5	6,8	56,1	49,6	39,0	0,60	-6,3	-62,3	$C\frac{Ca}{II}$	3
s-23-06	Ипподром	336 / 1	6,83	366,0	240,3	115,2	8,2	112,2	32,2	160,3	1,03	-8,5	-74,2	$C\frac{Na}{II}$	1
s-23-07	Парк Гагарина	7160 / 2	6,96	103,7	44,5	57,6	3,2	46,1	11,2	21,9	0,29	-9,2	-79,4	$C\frac{Ca}{II}$	3
s-23-08	Парк Победы	808 / < 1,2	7,58	170,8	80,1	115,2	4,1	50,1	19,8	77,1	0,51	-6,0	-65,6	$S\frac{Na}{III}$	3
s-23-09	Сквер Родник надежды	1 697 / 1,5	7,88	384,3	372,0	230,4	16,1	171,1	46,1	126,1	1,33	-5,4	-60,9	$C\frac{Ca}{III}$	2
s-24-11			8,22	256,2	382,7	460,8	15,0	226,5	45,9	220,2	1,59			$S\frac{Na}{III}$	2
s-23-11	ул. Советской Армии	815 / 1	6,61	146,4	48,1	76,8	4,6	66,1	16,1	17,3	0,37	-11,1	-87,6	$C\frac{Ca}{II}$	3
s-23-12	Спиридоновский	7514 / 2	7,26	427,0	133,5	88,3	10,2	88,2	71,9	55,2	0,86	-8,8	-76,2	$C\frac{Mg}{II}$	1
s-24-14			7,71	390,4	135,3	153,6	10,3	76,2	80,6	71,5	0,91			$C\frac{Mg}{II}$	1
s-23-13	Леснуха	1770 / 1,5	7,01	152,5	76,5	76,8	4,7	62,1	19,8	35,8	0,42	-11,0	-85,7	$C\frac{Ca}{II}$	3
s-24-20			7,93	183,0	83,7	80,6	5,9	66,1	32,2	26,1	0,47			$C\frac{Ca}{II}$	3
s-23-14	Рядом с Леснухой	882 / 1	6,47	244,0	65,9	115,2	7,0	94,2	28,5	28,8	0,58	-12,0	-91,5	$C\frac{Ca}{II}$	3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
s-23-22	Шишига	13550 / 1,5	7,29	298,9	115,7	34,6	6,4	48,1	49,0	58,2	0,60	-7,2	-67,9	$C\frac{Mg}{II}$	3
s-23-23	Ракитовское шоссе	3760 / 0,5	7,08	494,1	169,1	38,4	13,2	142,3	75,6	10,7	0,93	-6,2	-58,4	$C\frac{Ca}{II}$	1
s-23-24	Паршино	22160 / 4	7,02	152,5	83,7	134,4	5,8	72,1	27,3	42,6	0,51	-7,4	-69,9	$S\frac{Ca}{III}$	3
s-23-25	Солнечная поляна	5390 / 3,2	6,23	305,0	99,7	7,7	5,7	72,1	26,0	52,2	0,56	-5,3	-59,2	$C\frac{Ca}{II}$	3
s-24-18			7,64	305,0	90,8	11,5	6,4	68,1	37,2	32,2	0,54			$C\frac{Ca}{II}$	3
s-23-26	8-я просека	2143 / 1,5	6,87	317,2	67,6	38,4	7,0	70,1	43,4	20,8	0,56	-8,3	-73,4	$C\frac{Ca}{II}$	3
s-22-03	Ботанический сад, нижний	6766 / 5,8	6,24	268,4	327,5	169,0	9,6	79,2	69,4	174,8	1,09			$Cl\frac{Na}{III}$	2
s-23-28			7,01	292,8	468,1	188,2	10,6	92,2	74,4	260,2	1,38	-5,1	-59,0	$Cl\frac{Na}{III}$	2
s-24-15			7,59	183,0	363,1	115,2	8,4	82,2	53,3	166,4	0,96			$Cl\frac{Na}{III}$	2
s-22-02	Сухой	673 / 2	6,34	420,9	81,9	457,0	14,8	161,3	83,1	91,1	1,30			$S\frac{Ca}{III}$	2
s-23-29			7,53	427,0	110,4	384,0	13,7	128,3	90,5	101,1	1,24	-4,1	-54,4	$S\frac{Ca}{III}$	2
s-24-12			7,73	451,4	80,1	303,4	12,8	116,2	86,8	72,8	1,11			$S\frac{Ca}{III}$	2
s-22-01	Чайский	7580 / 1	8,48	189,1	46,3	96,0	3,9	16,0	37,8	58,7	0,44			$S\frac{Na}{II}$	3
s-23-30			8,44	298,9	81,9	69,1	5,5	22,0	54,6	72,3	0,60	-0,7	-40,0	$C\frac{Mg}{II}$	3
s-23-31	Малый Сибур	342 / 1,5	7,20	298,9	73,0	115,2	6,0	62,1	36,0	77,1	0,66	-4,6	-58,8	$C\frac{Na}{II}$	3
s-23-32	Большой Сибур	1837 / 1,5	7,23	719,8	113,9	149,8	16,1	122,2	124,0	46,5	1,28	-8,0	-70,8	$C\frac{Na}{II}$	1
s-23-33	Парк Молодёжный	7345 / 2	6,92	115,9	53,4	115,2	4,4	64,1	14,9	32,2	0,40			$S\frac{Ca}{III}$	3
s-24-19	13 мкн	1900 / 0,5	7,22	183,0	82,8	7,7	3,0	52,1	5,0	57,3	0,39			$C\frac{Na}{II}$	3
s-24-21	Между Леснухой и ул Ново-Садовой	1500 / < 1,5	7,42	488,0	108,6	49,9	8,0	114,2	28,5	94,2	0,88			$C\frac{Ca}{II}$	1

[1] Шифр года отбора; [2] Площадь зеркала и максимальная глубина в межень, по [1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9] и данным авторов; [3] Тип воды по классификации О.А. Алекина [22]; [4] Кластеры гидрохимического состава, выделенные с помощью алгоритма K-средни

Изотопные анализы воды проводились в Инсбрукском университете (Австрия) на анализаторе L2130-i (Picarro, США). Точность измерений составляла <1 ‰ для δ^2H и 0,1 ‰ для $\delta^{18}O$ (1σ). Значения δ^2H и $\delta^{18}O$ нормированы по шкале V-SMOW. Параметры локальной линии метеорных вод (ЛЛМВ) рассчитаны по данным ближайшей станции (г. Саратов) глобальной сети МАГАТЭ изотопов в осадках (GNIP).

Статистическая обработка и построение диаграмм выполнены в программах PAST 4.0 [18], Origin 9 и GW Chart[2]. Индексы насыщения (SI) к различным минералам рассчитаны в RRHEEQC[3].

Результаты

Макрокомпонентный состав. Данные по гидрохимическим составам прудов (см. таблицу 1) были разделены на 3 кластера с помощью алгоритма K-средних (*K-means*), рекомендованного для кластеризации природных вод со смешанными составами [19]. Пространственное положение выделенных кластеров показано на рисунке 1.

Минерализация вод 1-го и 2-го кластеров составляла 0,76–1,59 г/л, а для 3-го кластера она не превышала 0,66 г/л. Воды 1-го кластера имели более высокие значения HCO_3, а 2-го кластера – pH, Ca, Na+K, Cl и SO_4. Часть проб 2-го кластера более обогащена SO_4 (303–457 мг/л, Сухой пруд), а другая часть Cl (327,5–468,1 мг/л, Нижний пруд Ботанического сада) (рисунок 2а). Родники из *P_2ur-d,eQ* имеют более высокую минерализацию (0,98–1,3 г/л), чем родники из *P_2kz* (0,45–0,79 г/л) [17], обусловленную вкладом HCO_3, Cl, Mg, Na+K и SO_4. Медианные концентрации ионов в водах поверхностного стока близки к водам 3-го кластера прудов.

Щелочноземельные металлы (Ca+Mg) преобладали над щелочными (Na+K) в большинстве изученных проб (рисунок 2б). В водах 1-го кластера и родников *P_2ur-d,eQ* преобладало соотношение $HCO_3 > (SO_4+Cl)$, а в водах 2-го кластера и поверхностного стока $HCO_3 < (SO_4 + Cl)$. В пробах 3-го кластера встречались оба соотношения с равной частотой.

Большинство (76 %) проб воды прудов, родников *P_2ur-d,eQ* и поверхностного стока (таблица 2) попали в поле смешанного катионного состава, а для вод *P_2kz* преобладал Ca-тип. В анионном составе доминировали HCO_3-тип (1-й кластер, родники *P_2ur-d,eQ*), смешанный (поверхностный сток) и Cl-тип (2-й кластер). Среди гидрохимических фаций представлены HCO_3-Ca-Mg (преобладала для 1-го кластера и родников *P_2ur-d,eQ*), смешанная Ca-Mg-Cl-SO_4 (преобладала для 2-го кластера и поверхностного стока). Несколько проб 2-го кластера относились к Cl-Na, а одна проба из родника P_2kz – к SO_4-Ca^{2+} фациям. Данные по родникам *P_2ur-d,eQ* за 2022–2024 гг. согласуются с данными за 1999–2000 гг. [17], подтверждая стабильность их состава.

Согласно классификации О. А. Алекина [20] (см. таблицу 1), воды прудов 1-го кластера относятся к гидрокарбонатному классу и подразделяются на кальциевую (50 % проб), магниевую (30 %) и натриевую (20 %) группы по преобладающему катиону. Все пробы, за исключением одной (III типа), относятся ко II типу. Воды 2-го кластера преимущественно представлены хлоридным классом с натриевой группой (44 %) и сульфатным классом с кальциевой группой (33 %), реже – гидрокарбонатным классом кальциевой группы и сульфатным классом натриевой группы; все пробы отнесены к III типу. В водах 3-го кластера преобладает гидрокарбонатный класс (77 %), представленный кальциевой, реже – магниевой и натриевой группами. Редко (11 %) встречаются воды сульфатного класса – кальциевой (11 %) и натриевой (11 %) групп. Воды относятся ко II (83 %) и III (17 %) типам.

[2] Winston R.B. GW_Chart version 1.30: U.S. Geological Survey Software Release, 26 June 2020.

[3] Parkhurst D.L., Appelo C.A.J. User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations (No. 99–4259). US Geological Survey. 1999.

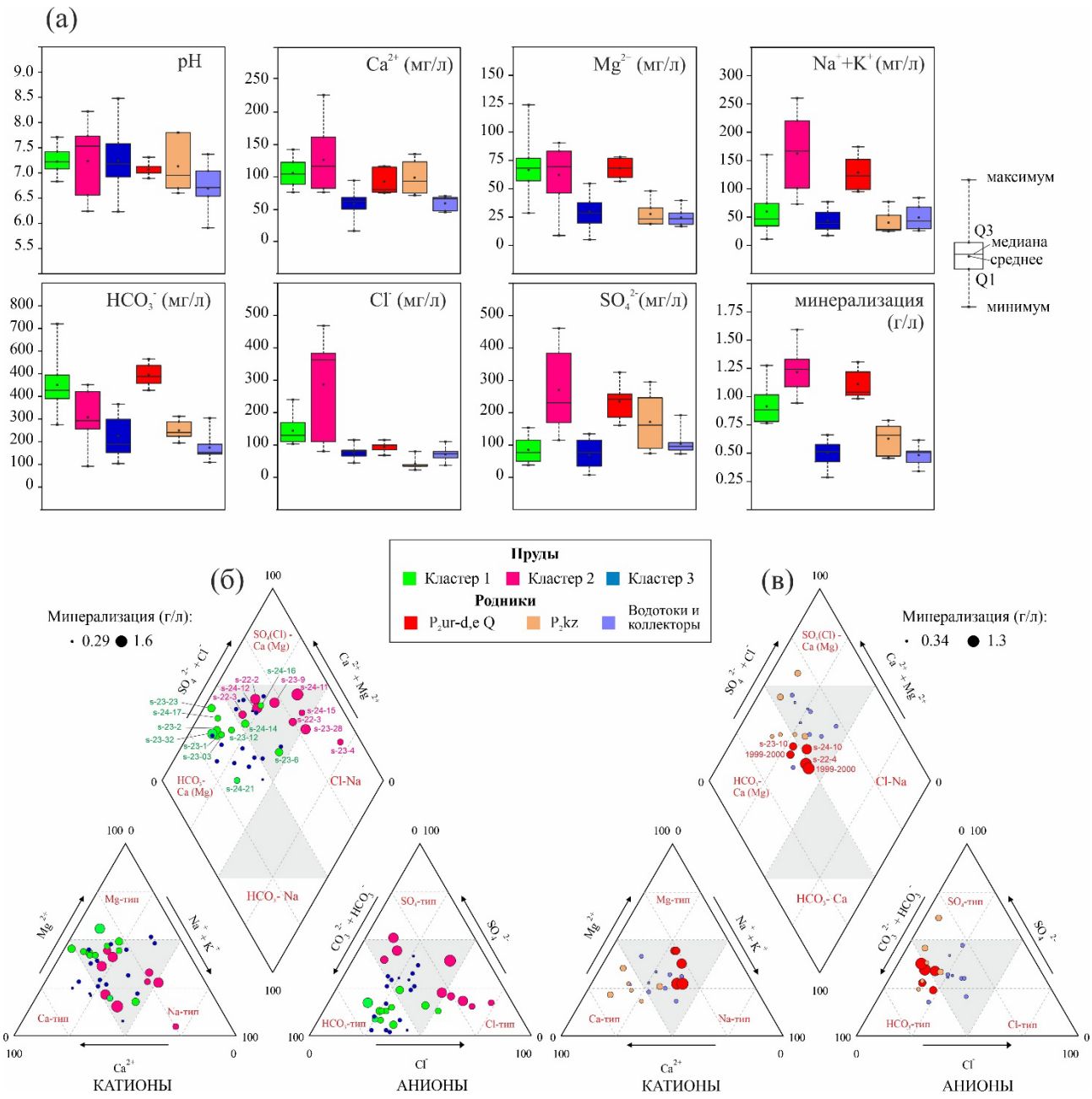


Рисунок 2. Макрокомпонентный состав: (а) – статистические данные; *диаграммы Пайпера*: (b) – пробы воды прудов, (c) – родниковые воды (данные для P_2kz и *P_2ur-d,eQ за* 1999–2000 гг. по [17]) и поверхностный сток

Figure 2. Major ions composition: (a) – statistical data; Piper diagrams: (b) – pond water samples, (c) – spring waters (data for P_2kz and P_2ur-d,eQ for 1999–2000 from [17]) and surface runoff

Воды родников относятся к гидрокарбонатному классу, магниевой и натриевой группам, II типу (таблица 2). В водотоках и коллекторах преобладает гидрокарбонатный класс воды (66 %), представленный кальциевой и реже натриевой группами; значительно реже встречаются сульфатный (кальциевая и натриевая группы) и хлоридный (кальциевая группа) классы. Воды этих объектов представлены II (56 %) и III (44 %) типами.

Таблица 2. Марокомпонентный и изотопный составы воды родников, поверхностного стока и водопроводной воды
Table 2. Major ions and isotopic compositions of water from of springs, surface watercourses, and tap water

Код пробы	Объект	pH	HCO_3^-, мг/л	Cl^-, мг/л	SO_4^{2-}, мг/л	Жест., ммоль/л	Ca^{2+}, мг/л	Mg^{2+}, мг/л	Na+K, мг/л	М., г/л	$\delta^{18}O$, V-SMOW	δ^2H, V-SMOW	Тип воды[1]
Родники													
s-22-04	Ботанический сад	6,89	536,8	99,7	257,3	10,4	116,2	56,4	152,0	1,22			$C\frac{Na}{II}$
s-23-10	Родник Надежды	7,13	457,5	115,7	161,3	10,0	76,2	76,9	94,6	0,98	-12,7	-94,5	$C\frac{Mg}{II}$
s-24-10		7,31	427,0	99,7	241,9	9,5	80,2	68,2	122,8	1,04			$C\frac{Mg}{II}$
s-23-18	Пойма р. Волга-1										-12,8	-94,8	
s-23-20	Пойма р. Волга-2										-12,8	-95,3	
s-23-27	Пойма р. Волга-3										-12,4	-92,1	
Поверхностный сток, дренажно-ливневые коллекторы, водопроводная вода													
s-22-05	Левый приток руч. Постников	5,91	109,8	37,4	99,8	3,7	46,1	16,7	29,4	0,34			$S\frac{Ca}{II}$
s-22-06	руч. Постников, перед коллектором	6,71	170,8	87,2	107,5	4,6	45,1	28,5	67,7	0,51			$C\frac{Na}{II}$
s-22-07	Колл. руч. Постников -1	6,54	152,5	53,4	84,5	4,3	47,1	23,6	34,8	0,40			$C\frac{Ca}{III}$
s-22-08	Колл. руч. Постников -1	6,05	195,2	67,6	115,2	5,0	53,1	29,1	57,6	0,52			$C\frac{Ca}{II}$
s-23-37	Нагорная канава	6,92	305,0	73,0	73,0	5,6	70,1	26,0	68,4	0,62			$C\frac{Ca}{II}$
s-23-36		7,04	189,1	110,4	76,8	6,6	68,1	39,7	27,8	0,51			$Cl\frac{Ca}{III}$
s-24-06	Колл. Колесникова оврага	7,37	152,5	60,5	92,2	5,0	68,1	19,8	25,8	0,42			$C\frac{Ca}{III}$
s-24-23	Колл. Силикатного оврага-1	7,04	146,4	80,1	96,0	4,8	66,1	18,6	42,7	0,45			$C\frac{Ca}{III}$
s-24-01	Колл. Силикатного оврага-2	6,64	146,4	73,0	192,0	4,8	66,1	18,6	84,0	0,58			$S\frac{Na}{II}$
s-23-19	р. Волга										-12,7	-94,3	
s-23-35	Водопроводная вода										-12,1	-91,6	

[1] Тип воды по классификации О. А. Алекина [20]

Таблица 3. Микроэлементные составы воды прудов г. Самара и родника Надежды (в мкг/л)
Table 3. Trace element concentrations in the water of ponds in Samara and the Nadezhda spring (in μg/l)

Проба	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Sr	Zr	Mo	Cd	Sb	Ba	Pb	Th	U
Пруды																				
s-23-01	0,7	5,0	3,4	5,0	0,30	6	1,8	0,01	0,01	4,20	1,10	700	0,24	0,50	0,0002	0,60	80	2,20	0,002	1,7
s-23-02	7,0	7,0	5,0	40,0	0,60	7	5,0	110	0,15	3,00	0,69	1000	0,24	0,13	0,0002	0,40	80	0,80	0,050	1,2
s-23-03	1,2	5,0	4,1	6,0	0,23	4	2,5	0,01	0,02	2,50	0,09	500	0,20	0,80	0,0002	0,50	70	0,09	0,008	1,1
s-23-04	8,0	9,0	4,7	40,0	0,60	6	6,0	40,0	0,13	5,10	0,30	480	0,70	5,00	0,0002	2,30	160	0,08	0,060	3,3
s-23-05	11,0	6,0	4,1	70,0	0,90	6	5,0	70,0	0,20	1,60	0,09	480	0,50	0,70	0,0002	0,90	70	1,20	0,050	1,8
s-23-06	15,0	9,0	6,0	60,0	1,00	9	11,0	10,0	0,22	4,00	0,13	500	0,60	0,25	0,1600	0,70	90	2,70	0,070	0,4
s-23-07	5,0	4,0	2,9	15,0	0,40	6	3,5	70,0	0,10	1,08	0,09	320	0,19	0,26	0,0002	0,40	41	0,01	0,024	0,1
s-23-08	12,0	5,0	3,7	60,0	0,70	5	3,7	90,0	0,19	1,60	0,09	410	0,12	0,19	0,0002	0,30	52	8,00	0,060	0,2
s-23-09	0,3	9,0	3,5	12,0	0,15	3	4,1	0,01	0,03	5,30	0,11	460	0,09	1,70	0,0002	0,70	32	0,01	0,004	5,8
s-23-11	2,4	2,6	2,2	8,0	0,19	3	3,7	30,0	0,06	0,88	0,09	430	0,13	0,16	0,0002	0,29	40	0,01	0,011	0,2
s-23-12	7,0	5,0	3,6	14,0	0,40	7	3,1	30,0	0,07	2,70	0,09	600	0,50	0,80	0,0002	0,50	80	0,01	0,050	1,7
s-23-13	0,1	2,8	2,1	1,9	0,17	4	3,7	0,01	0,02	1,60	0,09	390	0,11	0,60	0,0002	0,60	43	0,01	0,004	0,4
s-23-14	21,0	8,0	6,0	50,0	1,40	21	6,0	19,0	0,40	1,70	0,09	600	0,40	0,29	0,0002	0,50	70	2,40	0,040	0,3
s-23-22	0,1	2,8	4,3	3,0	0,16	4	1,2	0,01	0,02	1,50	0,09	460	0,10	0,40	0,0002	0,20	51	0,01	0,003	0,8
s-23-23	14,0	8,0	4,6	60,0	1,10	8	5,0	300,0	0,25	2,70	0,09	700	0,40	0,34	0,0002	0,30	110	2,20	0,050	1,0
s-23-24	1,4	3,6	4,1	22,0	0,31	4	3,0	0,01	0,03	1,70	0,09	600	0,30	1,00	0,0002	0,50	36	0,01	0,013	1,4
s-23-25	14,0	8,0	3,7	300,0	0,90	6	2,4	9,00	0,27	2,00	0,09	460	0,18	0,21	0,0002	0,50	90	1,50	0,100	0,3
s-23-26	0,9	2,2	2,7	2,1	0,19	4	1,1	0,01	0,01	1,40	0,09	400	0,70	0,08	0,0002	0,24	55	0,01	0,007	0,2
s-23-28	16,0	17,0	5,1	40,0	1,00	8	5,0	1,50	0,29	6,20	0,97	900	0,50	0,15	0,0002	0,40	60	1,20	0,060	0,3
s-23-29	25,0	11,0	9,0	150,0	1,90	12	6,0	40,0	0,50	2,90	2,00	900	0,90	0,70	0,0002	0,29	90	3,00	0,080	1,9
s-23-30	3,0	5,0	5,0	8,0	0,50	8	4,0	3,00	0,08	2,60	1,05	460	0,23	1,60	0,0002	0,90	60	0,01	0,040	3,0
s-23-31	5,0	3,4	2,9	6,0	0,40	9	1,1	0,01	0,02	1,90	0,61	1400	0,20	0,27	0,1400	0,31	90	1,80	0,017	2,7
Родник																				
s-23-10	10,0	6,0	6,0	30,0	0,60	5	4,0	40	0,14	2,40	1,80	1000	0,18	0,90	0,0002	0,30	70	5,00	0,040	11,0

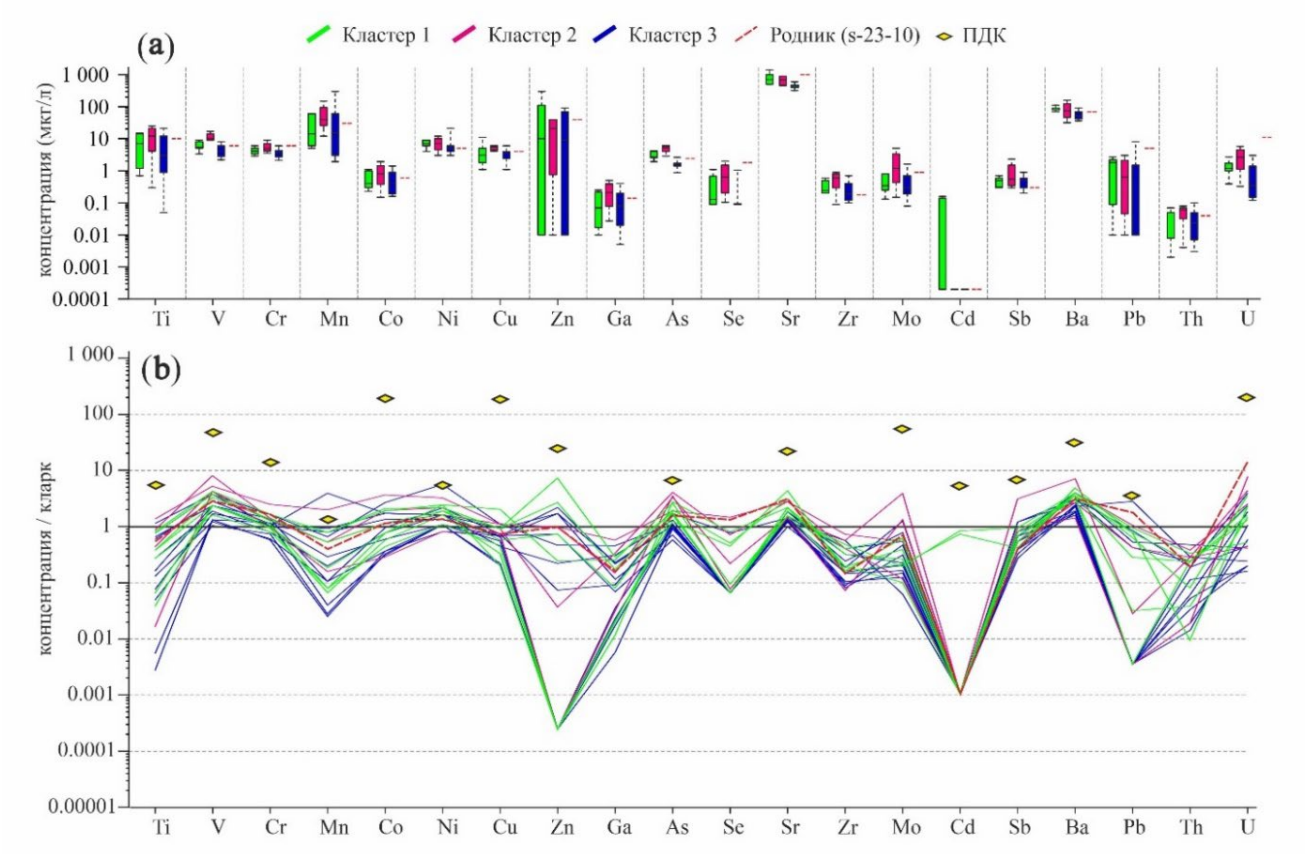


Рисунок 3. Содержание металлов и металлоидов: (а) – статистические данные; (б) – сравнение с кларковыми значениями и ПДК

Figure 3. Metal and metalloid content: (a) – statistical data; (b) – comparison with Clarke's values and MPCs

Изотопный состав. Воды р. Волги и родников (рисунок 4) имеют практически идентичные изотопные составы ($\delta^{18}O$ = -12,4…-12,8 ‰ и $\delta^{2}H$ = -92,1...-95,3 ‰), что изотопно-легче средневзвешенного состава региональных осадков (ок. $\delta^{18}O$ = -10,5 ‰ и $\delta^{2}H$ = -75,7 ‰). Это отражает питание речных и подземных вод изотопно-легкими осадками холодного времени года, когда испарение минимально. Для вод прудов наблюдается обогащение тяжелыми изотопами и смещение вправо-вверх от ЛЛМВ, характерное для кинетического фракционирования при испарении, при котором ^{16}O активнее переходит в пар, чем ^{1}H [22].

Состав исходных вод (до испарения), рассчитанный путём экстраполяции линии испарения (R^2 = 0,99; тангенс 4,5) на ЛЛМВ [23], составляет $\delta^{18}O$ = -12,8 ‰ и $\delta^{2}H$ = -95,3 ‰. Это значение соответствует речным и подземным водам, подтверждая, что питание прудов подчиняется там же региональным закономерностям (без существенного влияния летних осадков). Воды 1-го кластера в целом менее изотопно-обогащены ($\delta^{18}O$ = -6,2…-8,8 ‰), чем 2-го кластера ($\delta^{18}O$ = -4,1…-6,4 ‰), а воды 3-го кластера имеют наиболее лабильные составы ($\delta^{18}O$ = -0,7…-12,0 ‰).

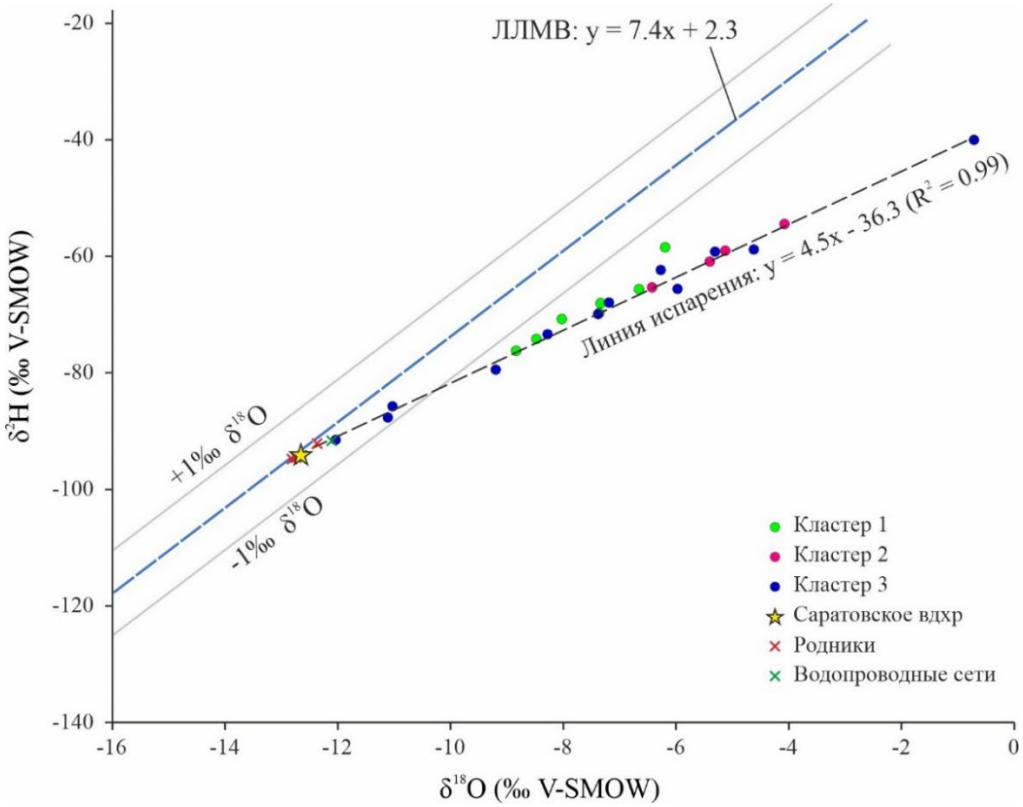


Рисунок 4. Фигуративные точки изученных вод по диаграмме δ^2H-$\delta^{18}O$ в сравнении с локальной линией метеорных вод (ЛЛМВ)

Figure 4. Plotted data points for the studied waters on the δ^2H–$\delta^{18}O$ diagram, compared with the local meteoric water line (LMWL)

Обсуждение

Макрокомпонентный состав.[4] Для выявления взаимосвязей между компонентами ионного состава и различными объектами, наборы данных проанализированы методом главных компонент (PCA). Первые два компонента (PC-1 и PC-2) объясняют 71,4 % дисперсии (рисунок 5а). На PC-1 наибольшую факторную нагрузку оказывают Ca, Mg, HCO_3, SO_4 и минерализация (TDS), тогда как для PC-2 наиболее значимые элементы HCO_3, Na+K и Cl (рисунок 5б). Большинство проб 1-го кластера находятся под сильным влиянием HCO_3–Mg (что может маркировать влияние карбонатов), а пробы 2-го кластера в основном контролировались SO_4–Ca–минерализация (влияние эвапоритов) и Cl–Na+K (засоление). Воды 3-го кластера и поверхностного стока совместно группируются в области PC-1<0, показывая высокое сходство друг с другом.

Большинство проб воды прудов 1-го и 3-го кластеров имеют соотношение $SO_4/Ca < 1$, указывающее происхождение Ca преимущественно из карбонатных и/или силикатных пород (рисунок 6а). Большинство водных проб родников и прудов 2-го кластера близки к соотношению $SO_4/Ca = 1$, указывающему на растворение эвапоритов [24]. Ряд водных проб имеют избыток SO_4, связанный с его дополнительными источниками (окисление сульфидов, атмосферное загрязнение) или выведением Ca из раствора.

Максимальные концентрации Cl в водах прудов (468,1 мг/л) значительно выше, чем в подземных водах *P_2ur-d,eQ* и *P_2ur* за пределами городской застройки (10–80 мг/л) [17]. По всей видимости, засоление вод связано с типичным для многих крупных городов [25, 26] влиянием

[4] Здесь и ниже мы используем только собственные данные 2022–2024 гг.

антигололёдных реагентов. Соотношения Na/Cl в снеге, загрязнённом дорожной солью, находится в диапазоне 1–0,7 [25]. Воды родников, поверхностного стока и части прудов (2-го и 3-го кластеров) имеют Na/Cl > 1[5] (рисунок 6б). Избыток Na объясняется гидролизом силикатов или катионным обменом по схеме $Ca+Mg_{вода} \rightarrow Na_{порода}$ [30]. Примерно в половине проб (и в большинстве вод 1-го кластера) соотношение Na/Cl <0,7, что указывает на расходование Na в реакциях обратного катионного обмена $Na_{вода} \rightarrow Ca+Mg_{порода}$ [28, 29, 30].

Состав воды, контролирующийся только растворением карбонатов или гипса/ангидрита, имеет соотношение $(Ca+Mg)/(SO_4+HCO_3) = 1$ [27]. Соотношения < 1 (воды родников, рисунок 6в) указывает на катионный обмен, гидролиз силикатов или источники SO_4 и HCO_3, не связанные с горными породами. Соотношение > 1 (большинство проб воды 1-го и часть 2-го кластеров) характерны для обратного катионного обмена [27].

Влияние ионно-обменных процессов так же может быть оценено с помощью индексов CAI-1 и CAI-2 [30], которые рассчитываются по формулам 1 и 2:

$$CAI\text{-}1=(Cl^- - (Na^+ + K^+))/Cl^- \quad (1)$$

$$CAI\text{-}2=(Cl^- - (Na^+ + K^+))/(SO_4^{2-} + HCO_3^- + CO_3^{2-} + NO_3^{2-}) \quad (2)$$

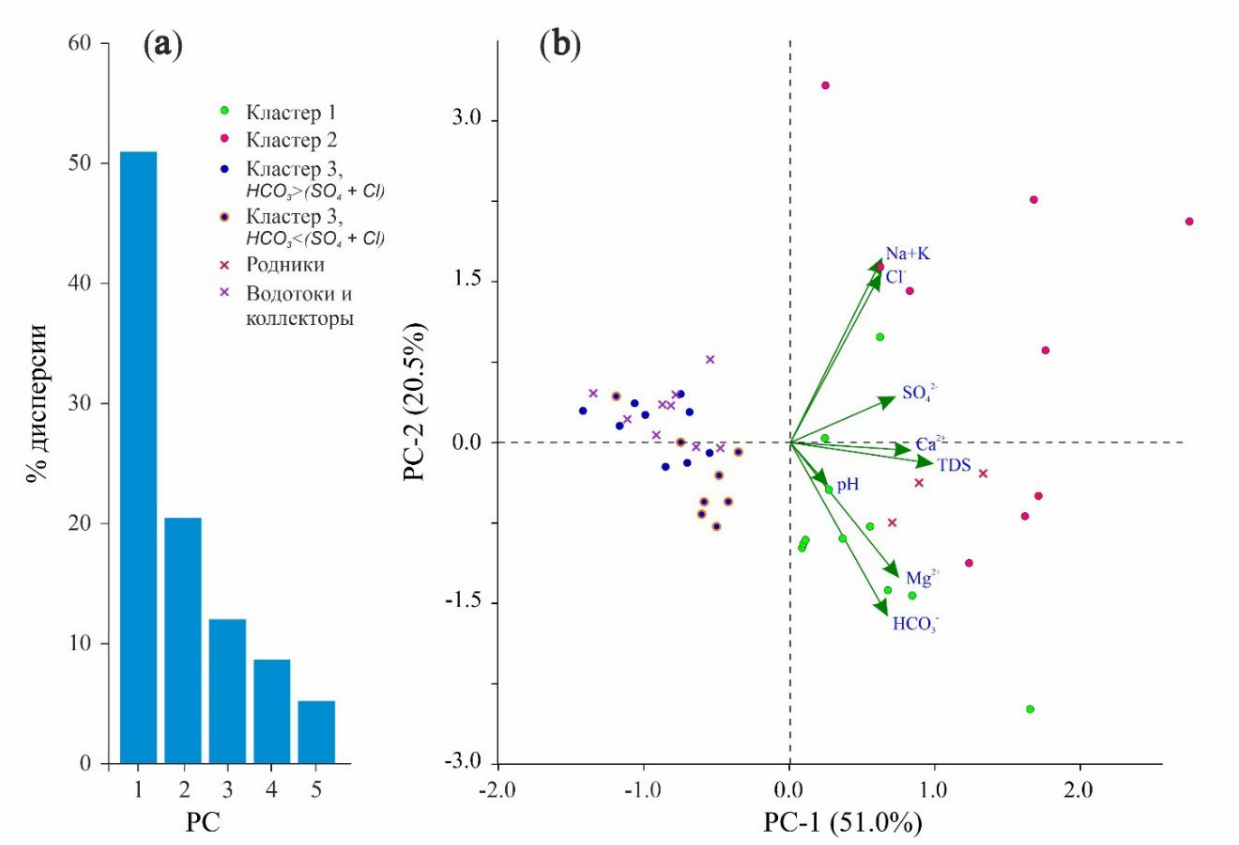


Рисунок 5. Анализ данных методом главных компонент (PCA): (a) – проценты дисперсии, объясняемой каждым главным компонентом (PC); (b) – диаграмма первых двух главных компонент (PC-1 и PC-2). Длины векторов соответствуют силе влияния переменной, а направления между ними показывают корреляционные соотношения

Figure 5. Principal Component Analysis (PCA): (a) The percentage of variance explained by each principal component (PC); (b) A plot of the first two principal components (PC-1 and PC-2). The vector lengths correspond to the strength of a variable's influence, while the vector directions indicate the correlation relationships

[5] Здесь и далее, с допущением, что $Na^+ = Na^+ + K^+$

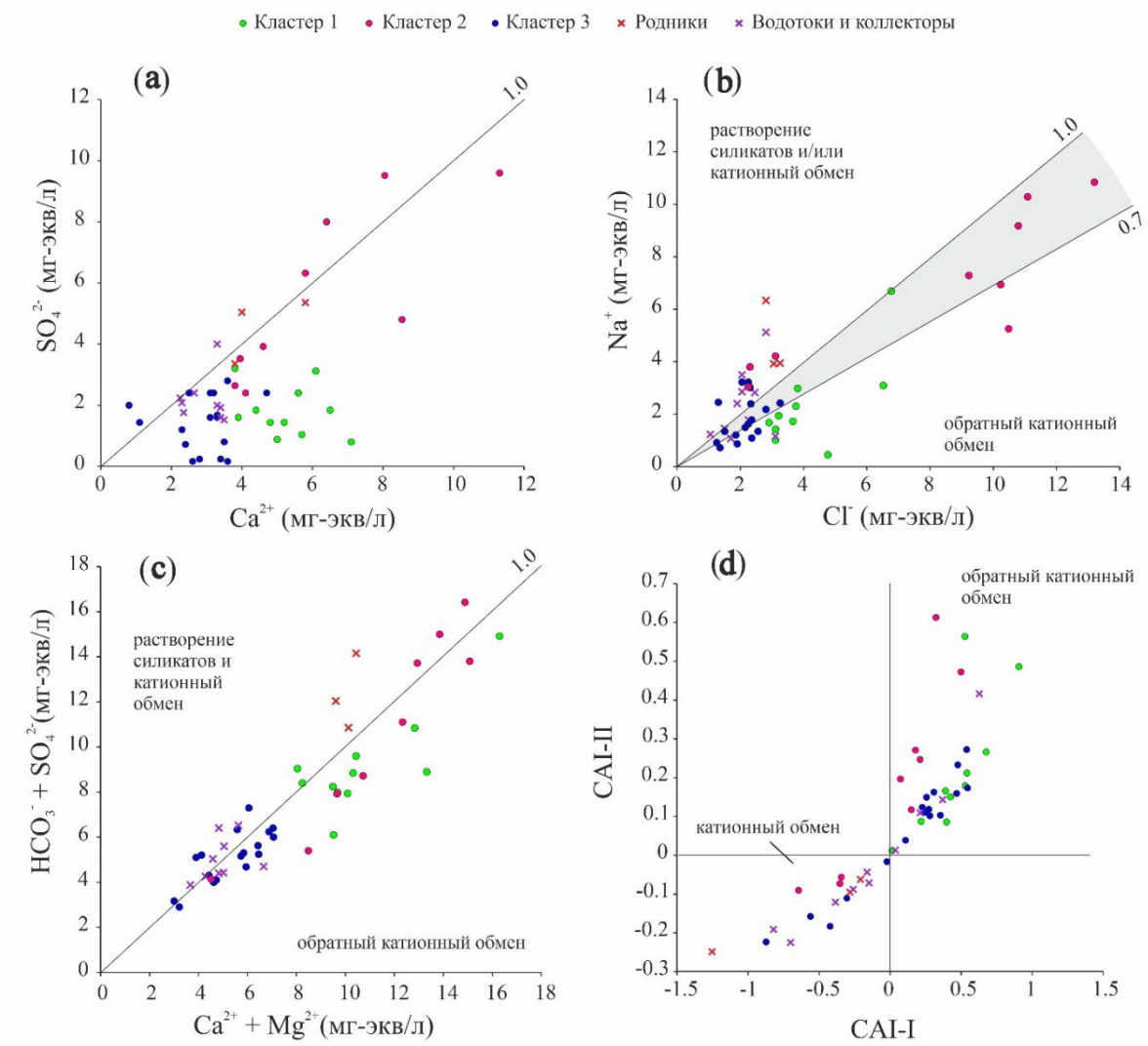


Рисунок 6. Соотношения различных ионов и гидрохимических индексов: (a) – SO_4^{2-} и Ca^{+2}; (b) – Na и Cl, серой заливкой показан диапазон значений для снега, загрязненного дорожной солью [26]; (c) – $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ и $SO_4^{2-} + HCO_3$; (d) – индексы CAI-1 и CAI-2 [30]

Figure 6. Ratios of various ions and hydrochemical indices: (a) SO_4^{2-} and Ca^{2+}; (b) Na^+ and Cl^-; The grey shading indicates the range of values for snow contaminated with road salt [26]. (c) $Ca^{2+} + Mg^2$ and $SO_4^{2-} + HCO_3$; (d) CAI-1 and CAI-2 indices [30]

Значения индексов CAI-1 и CAI-2 ≠ 0 указывают на развитие процессов катионного обмена между водой и силикатными породами (рисунок 6г). Индексы > 0, предполагающие схему $Na_{вода} \rightarrow Ca+Mg_{порода}$ (обратный обмен), имели все водные пробы 1-го, и большинство проб 2-го и 3-го кластеров (см. рисунок 5г). Индексы < 0, предполагающие схему $Ca+Mg_{вода} \rightarrow Na_{порода}$, имели воды родников, поверхностного стока и некоторые пробы 2-го и 3-го кластеров. Тем самым, расчёт индексов CAI-1 и CAI-2 подтверждает участие обеих форм ионного обмена.

Соотношения pH и индексов насыщения (SI) к кальциту и доломиту показаны на рисунке 7. Большинство водных проб 1–2-го кластеров и родников имели pH 7…8 и SI > 0 (пересыщение). В область SI < 0 (агрессивность) попали воды поверхностного стока и некоторые пробы 1–2-го кластеров. Пробы воды 3-го кластера с равной частотой попадают в агрессивную и пересыщенную области.

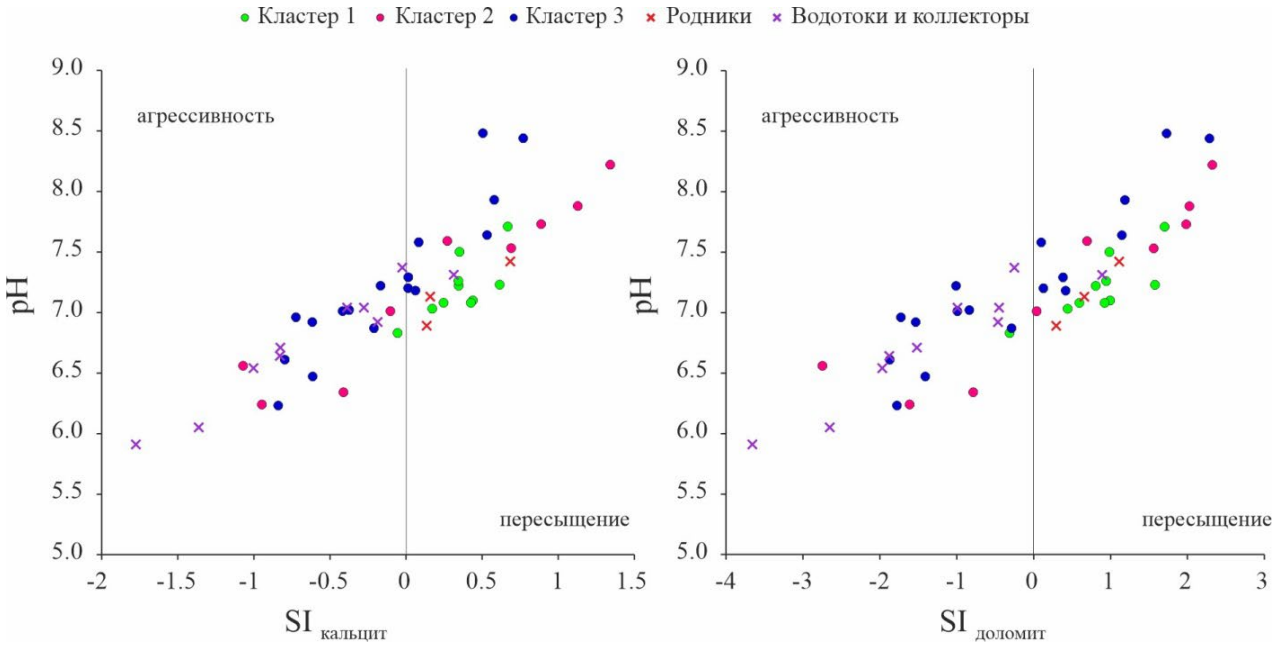


Рисунок 7. Соотношения pH и индексов насыщения (SI) к кальциту и доломиту
Figure 7. Relationship between pH and saturation indices (SI) for calcite and dolomite

Для вод, сформированных под влиянием карбонатных пород, pH контролируются балансом $CO_2+H_2O\leftrightarrow H_2CO_3\leftrightarrow H+HCO_3$ при взаимодействии воды с почвенным/атмосферным воздухом и породами. Для них более низкие pH и SI < 0 характерны в зоне питания, при продвижении по водоносному горизонту вода уравновешивается с карбонатами (SI = 0), а при выходе в зону аэрации происходит дегазация CO_2 и повышение pH и SI > 0 [31].

Воды некоторых прудов, несмотря на высокие содержания HCO_3, Ca и Mg (1–2-ой кластеры) и длительное испарение, имели pH < 7 и SI < 0 к карбонатам. Это означает, что pH контролировали не только реакции карбонатной системы. Вероятнее всего, подкисление связано с выделением CO_2 при деструкции органического вещества [32]. В условиях техногенного засоления оно так же может быть следствием ионно-обменных реакций $Na_{вода}\rightarrow H_{порода}$ при дефиците обменных оснований в породах и почвах [28]. Подкисление воды будет способствовать дальнейшему растворению карбонатов и гидролизу силикатов, трансформируя состав воды. Важным фактором в экосистемах прудов, повышающим pH (и вызывающим пресыщение к карбонатам) является потребление H_2CO_3 и HCO_3 при цветении фитопланктона [9, 32].

Микрокомпонентный состав. Корреляционные связи между основными ионами, металлами и металлоидами, визуализированы с помощью сетевой диаграммы (рисунок 8а).

Выявлено 4 ассоциации (жирным шрифтом выделены основные элементы с наиболее тесными связями).

Ассоциация ***Th-Ti-Ga-Co****-V-Ni-Cr-Zr-Mn-Cu* включает малоподвижные элементы-гидролизаты (Th, Ti, Ga, Zr), мигрирующие в природных водах с органическими и минерально-органическими коллоидами [33]. Редокс-чувствительный Mn коррелирован с Th (см. рисунок 7б), что так же свидетельствует о его коллоидной миграции. Известно, что присутствие коллоидов, адсорбирующих на себе (окси)гидроксиды, ускоряет окисление Mn в озёрных водах [34]. Присутствие Co, V, Ni, Cr и Cu может быть связано с их совместным осаждением с (окси)гидроксидами Mn и Fe [35]. По всей видимости, эта ассоциация связана с силикатными породами и почвами.

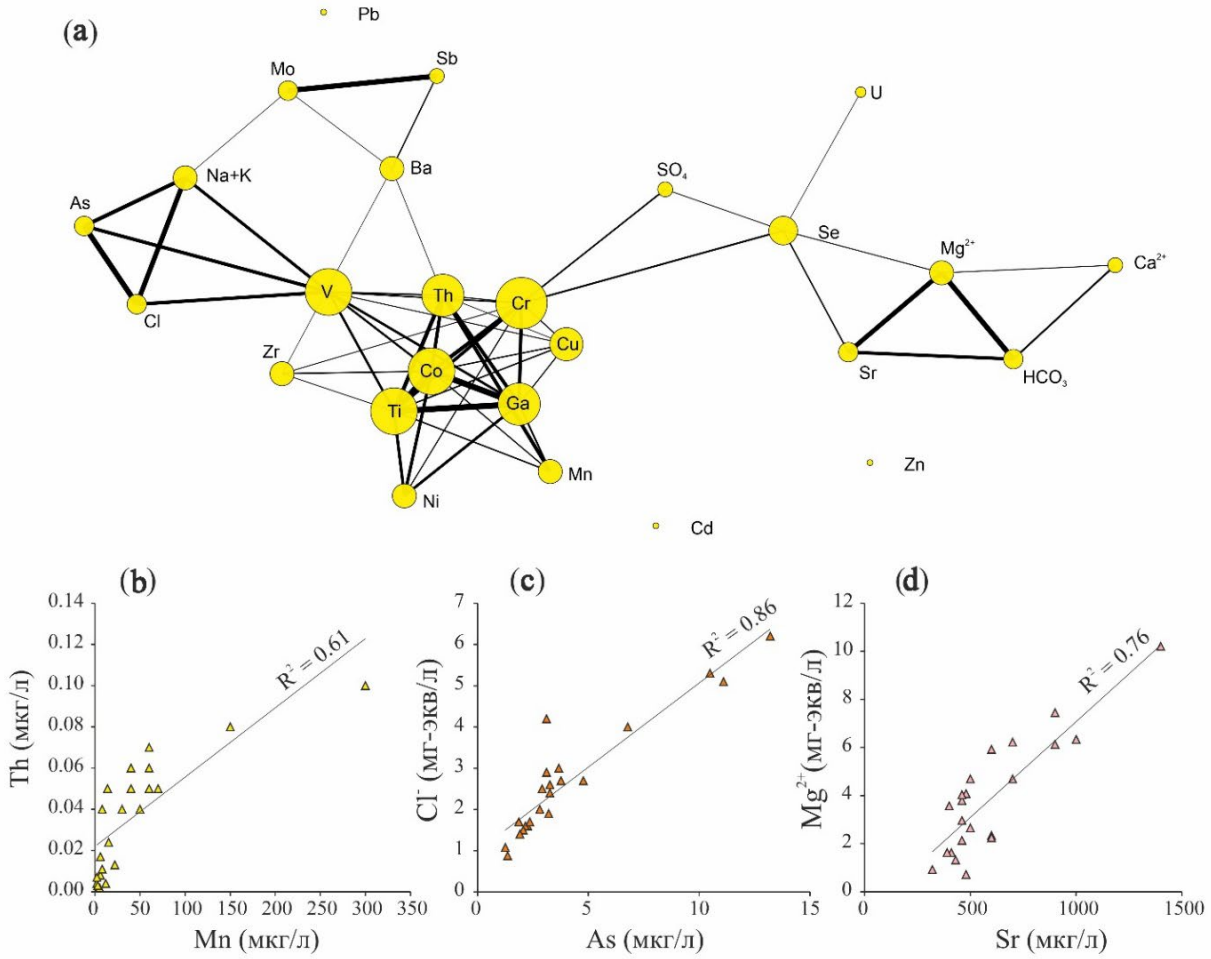


Рисунок 8. Корреляции между металлами, металлоидами и основными ионами: (a) – сетевая диаграмма, показывающая корреляции Пирсона> 0,5 (p <0,05). Толщина линий означает силу корреляционных связей, а диаметр маркера – количество связей у элемента; (b, c, d) – зависимости Th-Mn, Cl-As и Mg-Sr

Figure 8. Correlations between metals, metalloids and base ions: (a) A scatter plot showing Pearson correlations higher than 0,5 (p less than 0,05). The thickness of the lines indicates the strength of the correlations and the size of the markers indicates the number of correlations for each element; (b, c, d) Th-Mn, Cl-As and Mg-Sr relationships

Ассоциация ***Cl-Na-As*** маркирует влияние антигололёдных реагентов. Тесная корреляция между Cl и As (см. рисунок 7в), по всей видимости, отражает геохимические особенности дорожной соли, поскольку галит может содержать до As до 30 мг/кг [36]. Если допустить, что Cl и As получены только из галита, стехиометрический расчёт показывает содержание в нем As ~12 мг/кг, что укладывается в этот диапазон.

Ассоциация ***Mo-Sb****-Ba.* Совместное накопление Mo и Sb отмечается для озёрных вод, богатых органикой [37], которая так же способны накапливать Ba [38]. Слабая корреляция Ba и Th может указывать на участие силикатных пород, где Mo и Ba могут входить в состав слюд и полевых шпатов [39].

Ассоциация ***HCO_3-Mg-Sr****-Ca-Se-SO_4-U* контролируется HCO_3, Mg, Ca и SO_4, отражая взаимодействие с карбонатными и сульфатными породами. Корреляция между Mg и Sr (см. рисунок 7г) указывает на общий источник (карбонатные породы) или совместные механизмы концентрирования. Se и U, входящие в эту ассоциацию, так же хорошо подвижны в подземных водах с окислительными условиями [40].

Не входящие в какие-либо ассоциации *Pb, Cd и Zn* являются типичными техногенными поллютантами городской среды [26] и скорее всего, поступают из антропогенных источников (автотранспорт и промышленные предприятия).

Оценка влияния испарительного концентрирования. Высокоминерализованные воды в изолированных водоёмах могут образовываться путем длительного испарения, без участия подземного питания [41]. Поэтому, необходимо оценить возможность формирования вод 1–2-го кластеров за счет концентрирования поверхностного стока.

Оценка с помощью диаграмм Гиббса [42] позволяет предполагать, что испарительное насыщение не являлось основным механизмом (рисунок 9а,б). Более точная оценка может быть получена путём комбинации с изотопными данными. Поскольку изотопное фракционирование в системе $\delta^2H/\delta^{18}O$ реагирует на количество испаренной воды, а не на скорость испарения, обогащение ^{18}O является мерой относительного количества испарительных потерь [23]. Чтобы оценить влияние испарения на концентрацию растворенных веществ, мы построили графики сравнения $\delta^{18}O$ и некоторых ионов (рисунок 9в,г,д).

Достоверные тренды метаморфизации удалось выявить только для проб 3-го кластера. Наиболее сильный тренд (R^2=0,74) получен для консервативного Cl (рисунок 9в). Так же получены тренды, отражающие выведение Ca и увеличение соотношения Mg/Ca по мере обогащения ^{18}O. Для вод со слабым обогащением ($\delta^{18}O$ -12…-8) наблюдалось типичное для карбонатных пород соотношение Mg/Ca = 0,5…1, тогда как в водах Чайского пруда ($\delta^{18}O$ = -0,7) оно достигало 4,1. Расчёт SI к доломиту и кальциту показывает, что многие пробы пересыщены к обоим минералам. Но в связи с вялой кинетикой кристаллизации доломита [43] его осаждение в озёрах происходит редко и в условиях Mg/Ca > 9,5 [44]. В остальных случаях осаждение более термодинамически выгодного кальцита выводит из воды Ca и увеличивает соотношение Mg/Ca.

Тем самым, корреляции между $\delta^{18}O$ и ионными составами вод 3-го кластера подтверждают влияние испарительного насыщения на химизм. Но имеется ряд прудов на склоне долины р. Волги (например, Леснуха), воды которых почти не обогащены ^{18}O несмотря на конец лета, когда испарительные потери должны быть максимальными. Такая особенность предполагает постоянный приток изотопно-необогащенных вод, многократно превышающий испарение [23]). Скорее всего, такие водоёмы искусственно наполняются водопроводными водами (состав которых в Самаре [46] близок к водам нашей серии поверхностного стока, а изотопный состав соответствует речным водам, см. таблица 1). Отсутствие корреляций между $\delta^{18}O$ и ионным составом в водах 1–2-го кластеров может быть связано с индивидуальными для каждого водоёма соотношениями подземных притоков и испарительных потерь [24].

Изотопные составы вод 2-го кластера сильнее обогащены ^{18}O, чем воды 1-го кластера, поэтому необходимо проверить гипотезу, что различия из химического состава связаны с концентрированием. Мы нанесли данные на диаграмму Спенсера [46], описывающую тренды испарительной метаморфизации озёрной воды (рисунок 9е). Большинство фигуративных точек 1-го кластера тяготеет к карбонатно-натриевому тренду №1, а 2-го кластера – к сульфатно-кальциевому тренду №3. Это позволяет сделать вывод, что в большинстве случаев воды 2-го кластера не могли быть получены при испарении вод 1-го кластера, однако, для некоторых точек вблизи тренда №3 сохраняется неопределенность.

Эволюцию гидрохимического состава некоторых вод некоторых прудов можно проследить по ранее опубликованным ретроспективным данным (рисунок 10).

Анионный состав воды *Воронежских озёр* в 2023–2024 гг. близок к пробам 2005 г. [4], а в пропорциях катионов наблюдалось небольшое обогащение Ca и Mg (рисунок 10а). В целом, гидрохимический режим этих прудов можно считать относительно стабильным, что свидетельствует о преимущественном подземном питании.

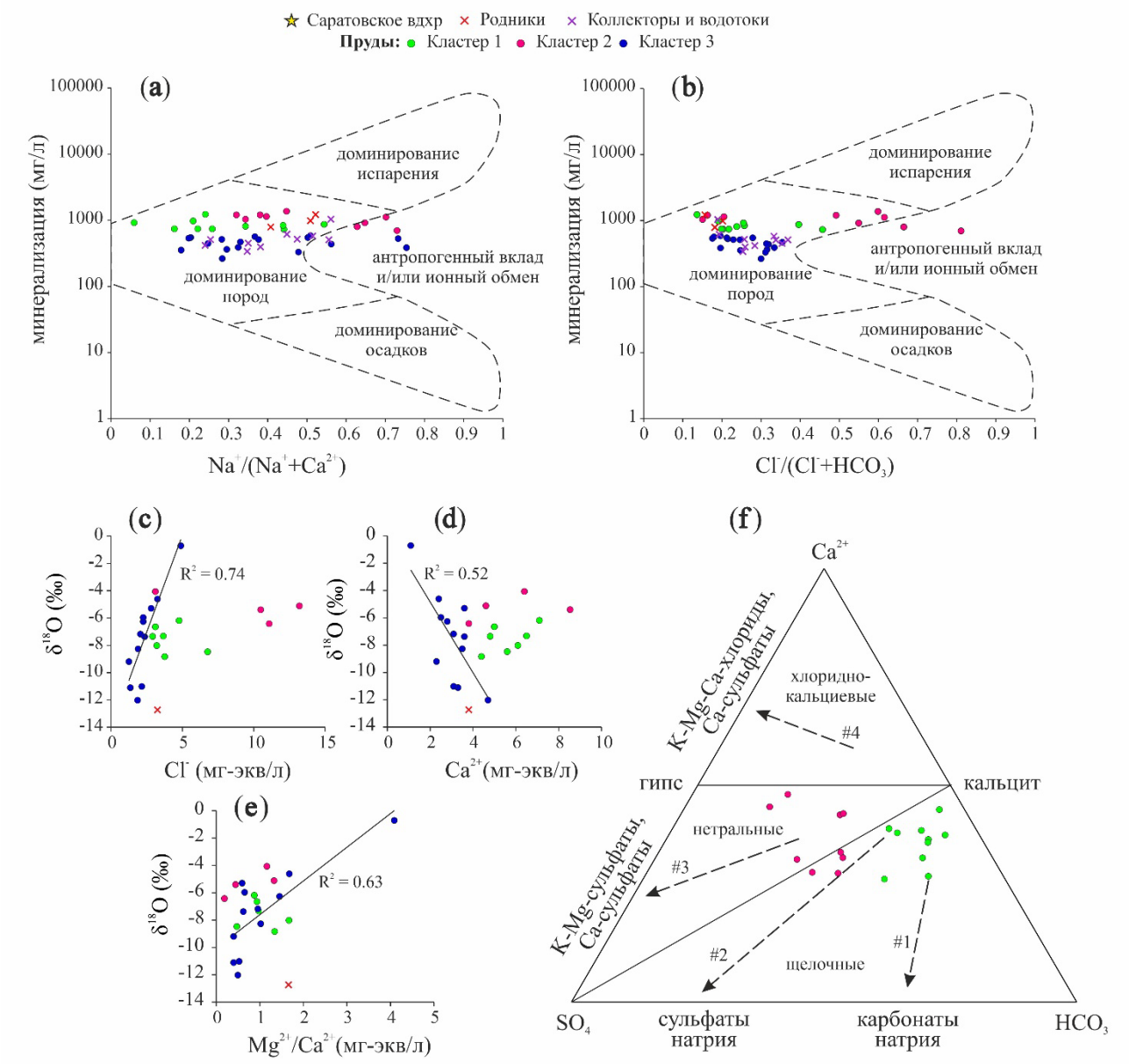


Рисунок 9. Оценка влияния испарительного насыщения на гидрохимический режим прудов: (a, b) – составы вод на диаграммах Гиббса [42]; c, d, e) – связь Cl^-, Ca^{2+} и Mg^{2+}/Ca^{2+} с $\delta^{18}O$; f) – составы вод 1 и 2-го кластеров на диаграмме Спенсера [46], стрелками показаны тренды испарительной трансформации

Figure 9. Assessment of the influence of evaporative saturation on the hydrochemical regime of the ponds: (a, b) – water compositions on Gibbs diagrams [42]; (c, d, e) – relationship between Cl^-, Ca^{2+} and Mg^{2+}/Ca^{2+} and $\delta^{18}O$; (f) – water compositions of the 1st and 2nd clusters on the Spencer diagram [46], with arrows indicating trends in evaporative transformation

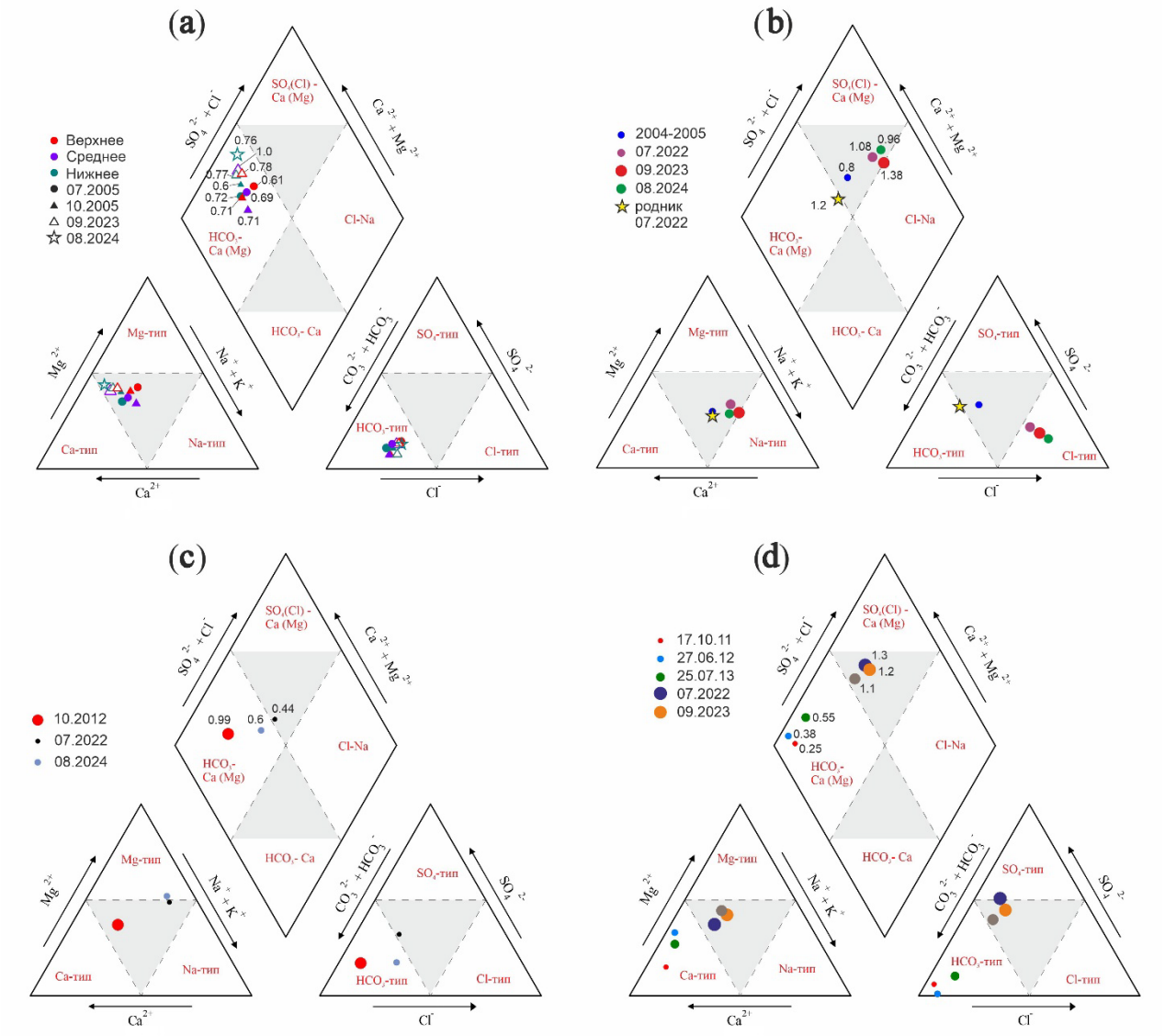


Рисунок 10. Эволюция гидрохимических параметров некоторых прудов: a) – Воронежские озёра, данные 2005 г. [4]; b) – Нижний пруд Ботанического сада, средний состав в 2004–2005 гг. [9] и состав вод родника в 1999–2000 гг. [17]; c) – Чайский пруд, данные за 2012 г. [9]; d) – Сухой пруд, данные за 2011–2013 гг. [7]. Цифры рядом с фигуративными точками обозначают минерализацию (г/л)

Figure 10. Evolution of hydrochemical parameters in selected ponds: a) Voronezhskie Lakes: data from 2005 [4] b) Lower Pond of the Botanical Garden: average composition from 2004–2005 [9], and composition of spring water from 1999–2000 [17]; c) Chaysky Pond: data from 2012 [9]; d) Sukhoi Pond: data from 2011–2013 [7]. The figures next to the dots indicate salinity (g/l).

В 2004–2005 гг. пропорции ионов вод *Нижнего пруда Ботанического сада* [6] близки к водам местного водоносного горизонта (состав вод родника между 1999–2000 гг. [9] и 2022 г. не изменился). В серии наблюдений 2022–2024 гг. (см. рисунок 10б) выявлено прогрессирующие обогащение Cl и Na, отражающее загрязнение дорожной солью (на водосборе находится крупная автострада).

В 2012 г. *Чайский пруд* имел подземное питание: вода относилась к HCO_3-Ca-Mg фации с минерализацией 0,99 г/л [8], а в 2022–2023 гг. (см. рисунок 10в) наблюдались низкоминерализованные воды (0,44–0,6 г/л), подвергнутые сильной испарительной трансформации. Смена режима свидетельствует либо об изоляции котловины водоёма от водоносного горизонта донными осадками, либо об изменении путей движения подземных вод.

В 2012–2013 гг. воды *Сухого пруда* были низко-минерализованными (0,22–0,55 г/л) и относились к HCO_3-Ca-Mg фации [7], а в 2022–2024 гг. минерализация увеличилась до 1,2–1,3 г/л с обогащением Mg^{2+} и SO_4^{2-} и приобретением смешанной Ca-Mg-Cl-SO_4 фации (см. рисунок 10г). В 2017–2018 гг. проводилась рекультивация этого пруда, в процессе которой, видимо, была восстановлена связь с водоносным горизонтом.

Заключение

В распределении гидрохимических параметров вод прудов г. Самары выявлены закономерности, обусловленные геологическими и геоморфологическими факторами. Пруды с наиболее минерализованными водами (1–2-й кластеры) расположены на водораздельной части массива, сложенной слабопроницаемыми породами уржумского яруса (*P_2ur).* Для этих водоёмов надежно диагностируется подземное питание, в котором могут участвовать как пластово-поровые воды *P_2ur*, так и локальные водоносные горизонты в перекрывающих рыхлых четвертичных отложениях (разделение этих типов вод в рамках нашего исследования не представляется возможным). По данным бурения в районе Воронежских озёр [3], кровля *P_2ur,* служащая водоупором четвертичного водоносного горизонта залегает на глубине 30–40 м от поверхности. Скорее всего, пруды изначально создавали в местах разгрузки родников; а при сокращении поверхностного стока после урбанизации подземное питание стало основным.

Формирование химического состава подземных вод, питающих пруды, связано с растворением карбонатных и сульфатных пород, катионным обменом и, возможно, гидролизом силикатов. При этом, в северной части города состав вод отражает участие доломитов (кластер 1), а в южной части города – сульфатных пород (кластер 2). Скорее всего, такие различия связаны с литологической неоднородностью уржумских отложений, в которых могут присутствовать как прослои доломитов и мергелей [12], так и сульфатных пород [14].

Питание прудов 3-го кластера в основном связано с поверхностным стоком. Чаще всего, пруды 3-го кластера расположены на хорошо дренируемых склонах речных долин рек Волги и Самары и обладают значительной площадью водосбора. Так же в эту группу попадают некоторые водоемы в парках и скверах, искусственно наполняемые водопроводной водой и деградирующие пруды на водораздельном плато, утратившие связь с водоносным горизонтом (на примере Чайского пруда).

Основные механизмы метаморфизации вод прудов связаны с засолением под влиянием антигололёдных реагентов, подкислением при деструкции органического вещества (или под влиянием других механизмов), ионным обменом, биологическим потреблением неорганического углерода при фотосинтезе и испарительном концентрированием.

Благодарности

Авторы благодарны д.г.-м.н. Ю. В. Дублянскому (Инсбрукский университет) за выполнение изотопных анализов, А.В. Седых за помощь в полевых работах и директору Ботанического сада к.б.н. С. А. Розно за доступ к объектам. Определение микроэлементного состава методом ИСП-МС проведено в ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН в рамках государственного задания ИГГ УрО РАН № 123011800012-9.

Acknowledgements

The authors thank Dr. Y. V. Dublyansky (University of Innsbruck) for conducting the isotopic analyses and A. V. Sedykh for assisting with the fieldwork. They also thank the Director of the Botanical Garden, Dr. S. A. Rozno, for granting access to the sites. Trace element composition was determined by ISP-MS at the “Geoanalitic” Central Computing Centre of the Institute of Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, as part of the Institute’s state-funded project No. 123011800012-9.

Литература / References

1. Герасимов Ю.Л. Коловратки прудов урбанизированных территорий (г. Самара) // Изв. Сам. науч. центра РАН. 2009. Т.11. № 1. С. 171–176.
2. Захаров Е.В. Особенности структуры зообентоса малых городских водоемов (на примере города Самары). Автореф. дис… к.б.н. Самара, 2004. 22 с.
3. Матвеев В.И., Гейхман Т.В., Соловьева В.В. Самарские пруды как объект ботанических экскурсий. Самара, 1995. 44 с.
4. Соловьева В.В., Саксонов С.В., Матвеев В.И. Озера Самары: история, биоразнообразие, проблемы охраны: монография. Тольятти: Кассандра, 2014. 129 с.
5. Тарасова Н.Г., Буркова Т.Н. Таксономическая и эколого-географическая характеристика альгофлоры планктона прудов г. Самары // Изв. Сам. науч. центра РАН, 2008. Т. 10, № 2. С. 499–504.
6. Шабанова А.В. От сельского хозяйства к рекреации: социально-значимые функции городских водоемов на примере Самары, XIX–XXI в.в. // Регион. развитие: эл. науч.-практ. жур. 2015. № 7(11).
7. Шабанова А.В. Современное состояние прудов Самары. Пруд Сухой // Регион. развитие: эл. науч.-практ. жур. 2016. № 1(13).
8. Шабанова А.В. Современное состояние прудов Самары. Пруд Планового Института // Проблемы трансформации естественных ландшафтов в результате антропогенной деятельности и пути их решения. Краснодар: КГАУ. 2021. С. 365–367.
9. Горбунов М.Ю., Уманская М. В., Краснова Е. С. Характеристика абиотических условий в экосистеме Нижнего пруда Ботанического сада Самарского университета // Бюлл. Самарская Лука. 2007. Т. 16, № 1–2(19–20). С. 131–143.
10. Гусев В.В., Бортников М.П., Таланов А.Г. Геоморфология территории города Самара // Изв. Сам. науч. центра РАН. 2016. Т. 18, № 5–3. С. 425–429.
11. Застрожнова О.И., Орлова Т.Б., Застрожнов А.С. и др. Гос. геол. карта РФ масштаба 1:1 000 000. Третье поколение. Серия Центрально-Европейская. Лист N-39. Казань–Самара. Комплект карт и объясн. зап. СПб.: ВСЕГЕИ, 2021. 467 с.
12. Давлетшин К.А., Косов С.А. Гос. геол. карта РФ масштаба 1:200 000. Серия Средневолжская, лист N-39-XXVI (Новокуйбышевск). Комплект карт и объясн. зап. СПб.: ВСЕГЕИ, 2000.
13. Кириков В.П. (ред.) Гос. геол. карта РФ. Масштаб 1:1000000 (новая серия). Лист N-(38), (39). Самара. Комплект карт и объясн. зап. СПб.: ВСЕГЕИ, 2000. 325 с.
14. Бортников М.П. Геология Самарской области. Самара: СГТУ, 2010. 112 с.
15. Бухман Л.М. Инженерно-геологические и гидрологические характеристики территории при реабилитации малых водных объектов (на примере парковых прудов города Самары) // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Самара: СГТУ. 2019. С. 404–410.
16. Чабаева М.А., Гусев В.В., Баева Е.Э., Таланов А.Г., Щербаков А.Ю., Хохлова Н.Ю. Подземные воды г. Самара // Сергеевские чтения. Материалы годичной сессии. науч. совета РАН по пробл. геоэкологии, инж. геол. и гидрогеол. Москва: ГЕОС. 2008. № 10. С. 369–372.
17. Довбыш В.Н. (ред.) Родники Самарской области. Самара, 2002. 531 с.
18. Hammer Ø., Harper D.A., Ryan P.D. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. Palaeontologia electronica, 4(1): 9, 2001.
19. Irigoyen-Campuzano J.R., Barraza-Barraza D., Gutiérrez M., Torres-Castañón L.A., Reynoso-Cuevas L., Alarcón-Herrera M.T. Hydrogeochemical Characterization of an Intermontane Aquifer Contaminated with

Arsenic and Fluoride via Clustering Analysis. Hydrology, 2024, Vol. 11(6). DOI: 10.3390/hydrology11060076.

20. Алекин О. А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеорологическое издательство (Гидрометеоиздат), 1970. 444 с.
21. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М., 1998. 288 с.
22. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопы гидросферы земли. М.: Науч. мир, 2009. 632 с.
23. Gat J.R. Stable Isotopes of Fresh and Saline Lakes / Physics and Chemistry of Lakes. Ed by: Lerman A., Imboden D.M., Gat J. R. Springer, Berlin, Heidelberg, 1995, pp.139–165. DOI: 10.1007/978-3-642-85132-2_5.
24. Datta P.S., Tyagi S.K. Major ion chemistry of groundwater in Delhi area: Chemical weathering processes and groundwater flow regime. J. Geol. Soc. India, 1996, vol. 47, pp. 179–188. DOI: 10.17491/jgsi/1996/470205.
25. Nyambar I.N.A., Viswanathan M.P. Assessment on urban lakes along the coastal region of Miri, NW Borneo: implication for hydrochemistry, water quality, and pollution risk. Envir. Sc. and Poll. Res., 2024, vol. 31(29), pp. 41306–41328. DOI: 10.1007/s11356-023-25172-9.
26. Vlasov D., Vasil'chuk J., Kosheleva N., Kasimov N. Dissolved and suspended forms of metals and metalloids in snow cover of megacity: partitioning and deposition rates in Western Moscow. Atmosphere, 2020. № 11(9), 907. DOI: 10.3390/atmos11090907.
27. Rajmohan N., Elango L. Identification and evolution of hydrogeochemical processes in the groundwater environment in an area of the Palar and Cheyyar River Basins, southern India. Environ. Geol., 2004, vol. 46, pp. 47–61.
28. Moiseenko T.I. Gashkina N.A. Zonal features of lake acidification. Water Resources, 2011, vol. 38, pp.47–62. DOI: 10.1134/S0097807811010076.
29. Vinograd N, Porowski A. Application of isotopic and geochemical studies to explain the origin and formation of mineral waters of Staraya Russa Spa, NW Russia. Envir. Earth Sciences, 2020, vol. 79(8), pp. 3–17. DOI: 10.1007/s12665-020-08923-6.
30. Schoeller H. Geochemistry of groundwater Groundwater Studies / An International Guide for Research and Practice. UNESCO: Paris, 1977, №15, pp. 1–18.
31. Johnston V.E., Šarc F., Wątor K., Otoničar B. Hydrogeochemical data from carbonate springs as an aid for delimiting catchment areas in the Rovte region, Central Slovenia. J. of Hydrol.: Reg. Studies., 2024, Dec 1;56:102087. DOI: 10.1016/j.ejrh.2024.102087.
32. Tucker C.S., D'Abramo L.R. Managing high pH in freshwater ponds. Stoneville: Southern Regional Aquaculture Center. 2008.
33. Pokrovsky O.S., Manasypov R.M., Loiko S.V., Krickov I.A., Kopysov S.G., Kolesnichenko L.G., Kirpotin S.N. Trace element transport in western Siberian rivers across a permafrost gradient. Biogeosciences. 2016. V. 13(6). P. 1877–1900. DOI: 10.5194/bg-13-1877-2016.
34. Pontér C., Ingri J., Boström K. Geochemistry of manganese in the Kalix River, northern Sweden. Geoch. et Cosm. Acta. 1992, vol. 56(4), pp. 1485–1494. DOI: 10.1016/0016-7037(92)90218-8.
35. Frost P.C., Song K., Buttle J.M., Marsalek J., McDonald A., Xenopoulos M.A. Urban biogeochemistry of trace elements: what can the sediments of stormwater ponds tell us? Urban ecosystems, 2015, vol. 18, pp. 763–75. DOI: 10.1007/s11252-014-0428-2.
36. Smedley P.L., Kinniburgh D.G. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. Appl. geoch., 2002, vol. 17(5), pp. 517–568. DOI: 10.1016/S0883-2927(02)00018-5.

37. Elbaz-Poulicheet F., Nagy A., Cserny T. The distribution of redox sensitive elements (U, As, Sb, V and Mo) along a river-wetland-lake system (Balaton Region, Hungary). Aquatic Geochem., 1997, vol. 3, pp. 267–82. DOI: 10.1023/A:1009616214030.

38. Dehairs F., Jacquet S., Savoye N., Van Mooy B.A., Buesseler K.O., Bishop J.K., Lamborg C.H., Elskens M., Baeyens W., Boyd P.W., Casciotti K.L. Barium in twilight zone suspended matter as a potential proxy for particulate organic carbon remineralization: Results for the North Pacific. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2008, vol. 55(14–15), pp. 1673–1683. DOI: 10.1016/j.dsr2.2008.04.020.

39. Jones K.C., Lepp N.W. Obbard J.P. Other metals and metalloids. Heavy metals in soils. Glasgow: Blackie & Son Ltd, 1990. P. 291–298.

40. Krickov I., Vorobyev S., Kolesnichenko L., Kolesnichenko Y., Zinchenko D., Shirokova L., Pokrovsky O. Export fluxes of dissolved, colloidal and particulate organic carbon, major and trace elements from the Ob River and its tributaries across seasons. Water Research, 2025, vol.275, 123221. DOI: 10.1016/j.watres.2025.123221.

41. Fernández-Aláez C., Fernández-Aláez M., Trigal Domínguez C., Luis Santos B. Hydrochemistry of northwest Spain ponds and its relationships to groundwaters. Limnetica, 2006, vol. 25(1–2), pp. 433–452. DOI: 10.23818/limn.25.31.

42. Gibbs R.J. Mechanisms controlling world water chemistry. Science, 1970, vol. 170, pp. 1088–1090.

43. Morse J.W., Arvidson R.S. The dissolution kinetics of major sedimentary carbonate minerals. Earth-Science Reviews, 2002, vol. 58(1–2), pp. 51–84. DOI: 10.1016/S0012-8252(01)00083-6.

44. Novoselov A., Konstantinov A., Konstantinova E., Simakova Y., Lim A., Kurasova A., Loiko S., Pokrovsky O.S. Semiarid lakes of southwestern Siberia as sentinels of on-going climate change: hydrochemistry, the carbon cycle, and modern carbonate mineral formation. Atmosphere, 2023, vol. 14(11), 1624. DOI: 10.3390/atmos14111624.

45. Березин И.И., Мустафина Г.И. Региональные особенности химического состава питьевой воды хозяйственно-питьевого водоснабжения города Самары // Изв. Сам. науч. центра РАН. 2011. Т. 13. № 1–8. С. 1837–1840.

46. Jones B.F., Naftz D.L., Spencer R.J., Oviatt C.G. Geochemical evolution of great Salt Lake, Utah, USA. Aq. Geoch., 2009, vol.15, pp. 95–121. DOI: 10.1007/s10498-008-9047-y.

Поступила в редакцию / Received 01.05.2026
Принята к публикации / Accepted 17.06.2026

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Червяцова Ольга Яковлевна, научный сотрудник, государственный природный биосферный заповедник «Шульган-Таш», Республика Башкортостан, Россия; SPIN-код: 8161-8031, ORCID: 0000-0001-5240-9818, ResearcherID AAR-3404-2021, AuthorID Scopus: 57131106900; e-mail: kittary@yandex.ru.

Казадаев Дмитрий Сергеевич, аспирант, Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия; e-mail: chinon@yandex.ru.

Киселева Дарья Владимировна, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия; SPIN-код: 9965-3014, ORCID: 0000-0002-8682-1541; e-mail: kiseleva@igg.uran.ru.

Окунева Татьяна Геннадьевна, младший научный сотрудник, Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия; SPIN-код: 9804-0385; e-mail: okunevatatjana@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Olga Y. Chervyatsova, researcher, "Shulgan-Tash" State Natural Biosphere Reserve, Russia; SPIN-code: 8161-8031, ORCID: 0000-0001-5240-9818, ResearcherID AAR-3404-2021, AuthorIDScopus: 57131106900; e-mail: kittary@yandex.ru.

Dmitry S. Kazadaev, postgraduate student, Togliatti State University, Togliatti, Russia; e-mail: chinon@yandex.ru.

Daria V. Kiseleva, Ph.D. (Geology and Mineralogy), head of the laboratory, Academician A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia; SPIN-code: 9965-3014, ORCID: 0000-0002-8682-1541; e-mail: kiseleva@igg.uran.ru.

Tatyana G. Okuneva, junior researcher, Academician A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia; SPIN-code: 9804-0385; e-mail: okunevatatjana@mail.ru.