

УДК 57.014 : 502.4

ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЗНОТИПНЫХ ОЗЕР ВОЛЖСКО-КАМСКОГО ЗАПОВЕДНИКА

Е. Н. Унковская^{1*}, М. В. Косова^{2,3}, Н. В. Шурмина²,
Ф. М. Мухаметзянова², Ю. А. Игнатъев²

¹ Волжско-Камский государственный природный биосферный заповедник (ул. Вехова, 1, пос. Садовый, Зеленодольский район, Республика Татарстан, Россия, 422537), *I-unka@mail.ru

² Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан (ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан, Россия, 420087)

³ Казанский (Приволжский) федеральный университет (ул. Кремлевская, 18, Казань, Республика Татарстан, Россия, 420008)

В статье обсуждаются результаты гидрохимического исследования разнотипных озер Раифского участка Волжско-Камского заповедника и его охранной зоны (Республика Татарстан), выполненного в 2021–2023 гг. Представлена пространственная изменчивость величины общей минерализации водоемов в бассейнах рек Сумка и Сер-Булак. Дана сравнительная характеристика газового режима, содержания органических (по величине БПК₅ и ХПК) и биогенных веществ в проточных и бессточных озерах, рассчитаны коэффициенты превышения предельно допустимых концентраций по всем показателям. На основе удельного комбинаторного индекса загрязненности воды оценена степень загрязнения озер.

Ключевые слова: Волжско-Камский заповедник; общая минерализация; превышение предельных концентраций; газовый режим; биогенные вещества

Для цитирования: Унковская Е. Н., Косова М. В., Шурмина Н. В., Мухаметзянова Ф. М., Игнатъев Ю. А. Гидрохимическая характеристика разнотипных озер Волжско-Камского заповедника // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 2. С. 39–50. doi: 10.17076/lim1869

**E. N. Unkovskaya^{1*}, M. V. Kosova^{2,3}, N. V. Shurmina², F. M. Mukhametzyanova²,
Yu. A. Ignatiev². HYDROCHEMICAL CHARACTERISTICS OF DIFFERENT TYPES OF LAKES
IN THE VOLZHSKO-KAMSKY RESERVE**

¹ Volzhsko-Kamsky State Nature Biosphere Reserve (1 Vekhova St., 422537 Sadovy vil., Zelenodolsky District, Republic of Tatarstan, Russia), *I-unka@mail.ru

² Institute of Ecology and Subsoil Use, Tatarstan Academy of Sciences (28 Daur'skaya St., 420087 Kazan, Republic of Tatarstan, Russia)

³ Kazan (Volga region) Federal University (18 Kremlyovskaya St., Kazan, Republic of Tatarstan, Russia)

The article discusses the results of hydrochemical study of different types of lakes in the Raifa cluster of the Volzhsko-Kamsky Nature Reserve and its buffer zone (Republic of Tatarstan), carried out in 2021–2023. The spatial variability of the total mineralization

of the water bodies in the basins of the Sumka and Ser-Bulak Rivers is presented. The article gives a comparative description of the gas regime, the content of organic substances (in terms of BOD₅ and COD) and nutrients in open and closed lakes, as well as the calculated coefficients of exceeding the maximum permissible concentrations for all indicators. The degree of the lakes pollution was assessed on the basis of the specific combinatorial index of water pollution.

Keywords: Volzhsko-Kamsky Reserve; general mineralization; exceeding maximum concentrations; gas regime; nutrients

For citation: *Unkovskaya E. N., Kosova M. V., Shurmina N. V., Mukhametzyanova F. M., Ignatiev Yu. A. Hydrochemical characteristics of different types of lakes in the Volzhsko-Kamsky Reserve. Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2024. No. 2. P. 39–50. doi: 10.17076/lim1869*

Введение

Основной задачей особо охраняемых природных территорий (ООПТ) является сохранение и изучение естественного хода природных процессов. В современном мире наиболее сложно избежать загрязнения поверхностных и подземных вод в связи с многофункциональным воздействием на водные объекты. Проблема нарушения естественного режима водоемов и водотоков часто является актуальной и для ООПТ, в частности для Волжско-Камского заповедника. На территории Раифского участка заповедника (Зеленодольский район Республики Татарстан) и его охранной зоны, граничащей с землями сельскохозяйственного назначения и населенных пунктов, озера также испытывают различную антропогенную нагрузку, связанную прежде всего с поступлением загрязненного поверхностного стока в проточные водоемы из-за интенсивного развития эрозионных процессов на водосборе. Со стоком рек дополнительно привносятся и биогенные вещества, ускоряющие эвтрофирование.

Мониторинг химического состава поверхностных вод Раифского участка осуществляется с 1983 г. в рамках основной научной темы «Наблюдения явлений и процессов в природном комплексе заповедника и их изучение по программе «Летопись природы». Основные физико-химические показатели водоемов и водотоков опубликованы, рассмотрены и частные вопросы по гидрологическим и гидрохимическим особенностям рек, сезонным и межгодовым изменениям в ионном и биогенном составе разнотипных озер, гидрохимическом режиме за летний период в 2001–2015 гг. [Унковская и др., 2009, 2016]. В настоящей статье представлена сравнительная характеристика химического состава проточных и бессточных озер за 2021–2023 гг.

Целью данного исследования являлось уточнение химического состава основных разнотипных озер путем корректировки частоты отбора проб и оценка степени их загрязнения. Анализ полученных результатов выполнен в сравнении с ранее полученными данными за период 2008–2023 гг., рассмотрена многолетняя динамика содержания биогенных веществ, вносящих наибольший вклад в загрязнение озер.

Материалы и методы

Особенностью Раифского участка заповедника является своеобразная гидрологическая система разнотипных озер, объединенных малыми реками Сумка и Сер-Булак. Водосборный бассейн р. Сумка и ее притока р. Сер-Булак является бассейном данного участка: р. Сумка протекает по открытым участкам (залесено только 46 % водосборного бассейна), бассейн р. Сер-Булак полностью покрыт лесом и частично болотами. Поэтому озера, расположенные в их долинах, по происхождению, физико-географическим и морфометрическим показателям значительно отличаются друг от друга. Первым по течению р. Сумка расположено оз. Бело-Безводное (местное название Белое), которое находится в охранной зоне заповедника около пос. Бело-Безводное; через 2,5 км, в месте слияния Сумки и Сер-Булака, расположено заповедное оз. Раифское; через 3 км, около с. Ильинка, Сумка протекает через оз. Ильинское. С долиной Сумки также связаны заповедное оз. Илантово и оз. Гнилое, связанное с предыдущим озером древней ложбиной стока, а также расположенные в охранной зоне озера Крутое и Шатуниха. Река Сер-Булак протекает через заповедное оз. Линево и оз. Карасиха, расположенное в пос. Садовый; в долине Сер-Булака также находятся заповедные озера Казанское и Круглое. С древней долиной Сер-Булака связано озеро-болото Долгое.

Для сравнительной характеристики мы условно разделили водоемы на группы: проточные озера карстово-суффозионного происхождения с максимальной глубиной (h_{\max}) 4,0–20,3 м в долинах р. Сумка (озера Бело-Безводное (Белое), Раифское, Ильинское) и р. Сер-Булак – с h_{\max} 5,4–10,0 м (озера Линево, Карасиха); бессточные озера суффозионного происхождения, расположенные около долин рек, с h_{\max} 2,0–6,0 м (озера Илантово, Круглое, Моховое, Крутое, Шатуниха), и озера, расположенные в «окнах» торфяных болот, с h_{\max} 5,4–12,5 м (озера Гнилое, Долгое). Отдельно исследовался бобровый пруд, образованный в 1996 г. после интродукции бобра европейского (*Castor fiber*), с h_{\max} 1,5 м (оз. Торфяное).

Пробы воды отбирались на сети контрольных станций (рис. 1) в период открытой воды в 2021–2023 гг. с разной периодичностью. В проточных озерах и близ расположенных бессточных озер – с мая по сентябрь ежемесячно, в удаленных озерах («окнах» болот) – один раз в летний период. Отбор проводился в поверхностном и придонном горизонтах, в мелководных озерах (Шатуниха, Крутое и Торфяное) – в прибрежной зоне. Всего обработано 162 пробы на 24 показателя, при отборе гидрохимических проб фиксировались физические показатели воды: прозрачность (по диску Секки), цвет (по шкале цвета ГОСТ 4266-79),

температура через каждые 2 м (термометром на батометре Молчанова). Аналитическое определение содержания тяжелых металлов (меди, никеля, свинца, цинка, марганца) выполнялось методом атомно-абсорбционной спектроскопии; определение концентрации аммоний-иона, нитрит-иона, нитрат-иона, фосфат-иона, сульфат-иона, железа общего, сероводорода и сульфидов, АСПАВ проводилось методом спектрофотометрии. Методом газожидкостной хроматографии определялись фенолы; титриметрическим методом – содержание растворенного кислорода, биохимического и химического потребления кислорода, гидрокарбонатов, общей жесткости и кальция; расчетным способом – магния и суммы натрия и калия. Анализ выполнялся по аттестованным методикам. Сравнение химических показателей проводилось в соответствии с предельно допустимыми концентрациями для рыбохозяйственных водоемов [Приказ..., 2016]. Тип воды определялся по шкале О. А. Алекина [1970]. Оценка качества воды осуществлялась согласно методу комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям [РД 52.24.643-2002] с расчетом удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ). Расчет проводился по обязательному перечню 15 загрязняющих веществ с включением трех специфических показателей,

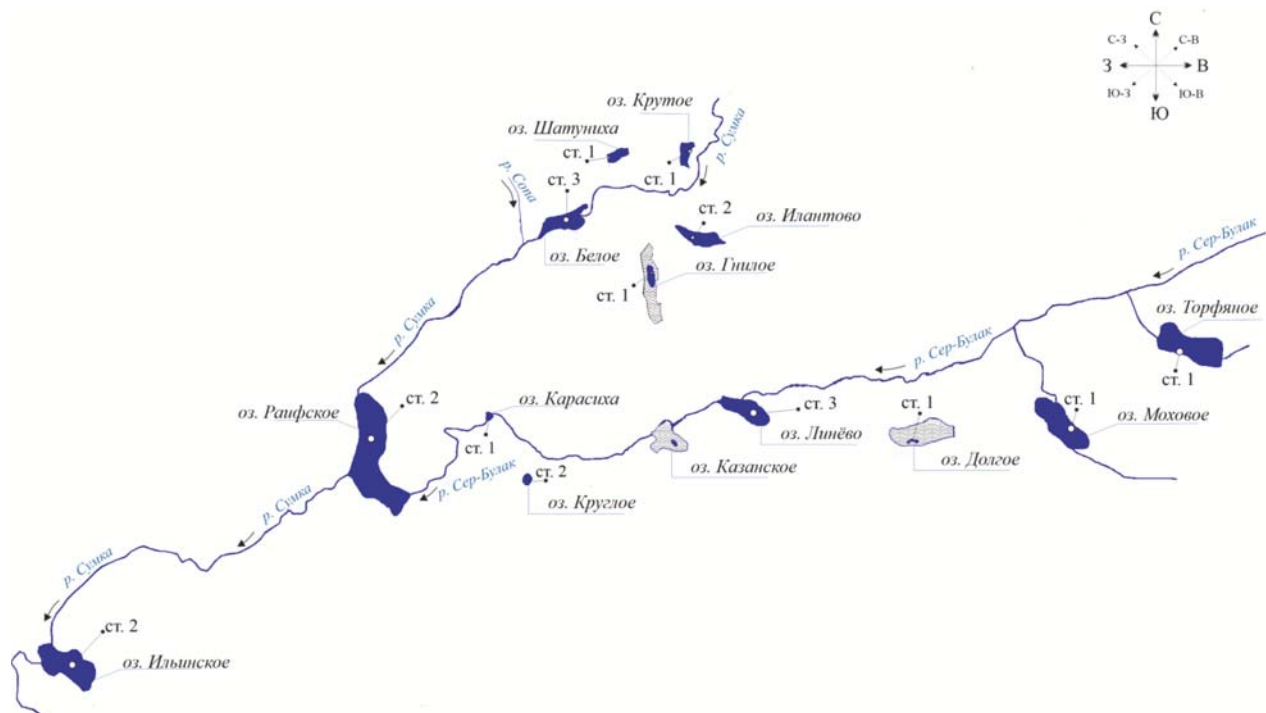


Рис. 1. Схема расположения станций отбора гидрохимических проб

Fig. 1. Layout of the hydrochemical sampling stations

имеющих локальное значение в исследуемых водоемах вследствие часто фиксируемых превышений ПДК р. х. (рН, фосфат-ион, сероводород и сульфиды).

Результаты и обсуждение

Физические показатели – прозрачность, цвет и температура воды изучаемых водоемов изменялись за период исследований в широком диапазоне. В проточных озерах р. Сумка прозрачность воды изменялась от 0,6 м в оз. Белое до 1,7–2,0 м в оз. Раифское, цвет воды соответствовал зеленовато-желтому, температурный режим был характерен для глубоководных стратифицированных озер. Проточные озера р. Сер-Булак и «окна» в сплаvine торфяных болот отличались низкой прозрачностью воды – 0,3–0,6 м при коричневом цвете воды и выраженным термоклинном на глубине 0,5–1,5 м. Бессточные озера и бобровый пруд характеризовались прозрачностью 0,5–0,9 м при зеленовато-желтом или желтом, редко коричневом цвете воды (озера Моховое, Илантово), с равномерным понижением температуры по всей толще воды.

Тип воды исследованных водоемов, по классификации О. А. Алекина [1970], относился к гидрокарбонатному классу, кальциевой группе. Сумма главных ионов ($\Sigma_{\text{ц}}$, общая минерализация) изменялась в период исследований от 82,2–87,3 мг/дм³ в «окнах» болот и заболочивающихся озерах до 222,5–329,9 мг/дм³ в проточных водоемах р. Сумка. Это связано с тем, что в верховье, расположенном на склоне коренного берега волжской долины, р. Сумка имеет грунтовое питание и, как следствие, высокие значения минерализации – до 775,6 мг/дм³ [Унковская и др., 2016]. Формирование ионного состава здесь осуществляется за счет поступления карбонатных соединений из родников, наполняющих речной сток, и дополнительно сточных вод с высоким содержанием сульфатов, поступающих из подземных источников [Тайсин, 2006; Унковская и др., 2016]. Поэтому первое по течению реки оз. Бело-Безводное (Белое) характеризовалось самой высокой минерализацией – 327,4 мг/дм³, со среднегодовым содержанием гидрокарбонатов 216,4 мг/дм³, сульфатов – 9,9 мг/дм³, хлоридов – 20,3 мг/дм³, кальция – 53,2 мг/дм³. Для рек Сумка и Сер-Булак в среднем и нижнем течении характерно атмосферное питание, что определяет невысокие величины минерализации озер в их долинах. Расположенные ниже по течению р. Сумка озера испытывают разбавление: среднегодовые значения минерализации здесь снижаются до 228,5 мг/дм³ (оз. Раифское)

и 145,1 мг/дм³ (оз. Ильинское). В проточных озерах р. Сер-Булак сумма главных ионов не превышала 78,9–84,3 мг/дм³, в бессточных – изменялась в широком диапазоне от 51,4 до 196,9 мг/дм³. Бобровый пруд характеризовался минерализацией, равной 76,9 мг/дм³. Соотношение главных ионов также изменялось по группам озер, максимальные значения концентрации отдельных ионов отмечались в придонных слоях. Средние концентрации гидрокарбонатов составляли для проточных озер в долине р. Сумка 77,7–218,1 мг/дм³, в долине р. Сер-Булак – 45,5–50,6 мг/дм³, для бессточных озер – 24,1–126,0 мг/дм³. Концентрации сульфатов имели меньший размах – 6,3–11,2 мг/дм³, хлориды – 5,3–30,7 мг/дм³ для всех водоемов. Такое же распределение было характерно и для катионов: средние концентрации кальция уменьшались от 10,4–50,9 мг/дм³ в проточных озерах до 4,9–33,7 мг/дм³ в бессточных, концентрация магния колебалась неравномерно в пределах 1,7–14,8 мг/дм³. Такие же пропорции сохранялись и в эквивалентном соотношении (рис. 2). Ионный состав исследуемых озер в 2021–2023 гг. и формула Курлова, выражающая эквивалентное соотношение анионов и катионов, представлены в табл. 1.

Водородный показатель изменялся в широком диапазоне в зависимости от типа озера, сезона года, горизонта и составлял 5,9–9,8 ед. рН. Для проточных озер в долине р. Сумка была характерна нейтральная или слабощелочная реакция среды (7,4–8,7 ед. рН), за исключением оз. Ильинское, в воде которого в июле–августе часто отмечались значения до 9,8 ед. рН (до 1,2 ПДК р. х.) в связи с развитием синезеленых водорослей. В озерах, расположенных в долине р. Сер-Булак, и большинстве бессточных озер водородный показатель изменялся в пределах 6,2–8,2 ед. рН с постепенным снижением в придонных слоях до 6,0, в «окнах» болот – до 5,4–5,8 ед. рН. Данные величины незначительно (до 1,1–1,2 ПДК р. х.) ниже предельно допустимой величины рН (6,5–8,5).

По величине общей жесткости вода большинства озер характеризовалась как «мягкая» (менее 4,0 ммоль/дм³), составляя максимальные значения для проточных озер в долине р. Сумка (4,4–4,9 ммоль/дм³). В остальных исследуемых озерах среднегодовые значения данного показателя составляли 0,42–0,94 ммоль/дм³, за исключением оз. Моховое – 2,2 ммоль/дм³.

Газовый режим характеризовался нормальным насыщением (88–105 %) или перенасыщением (до 206,9 %) кислородом поверхностных слоев воды всех озер: содержание растворенного кислорода изменялось в пределах 7,3–17,3 мг/дм³.

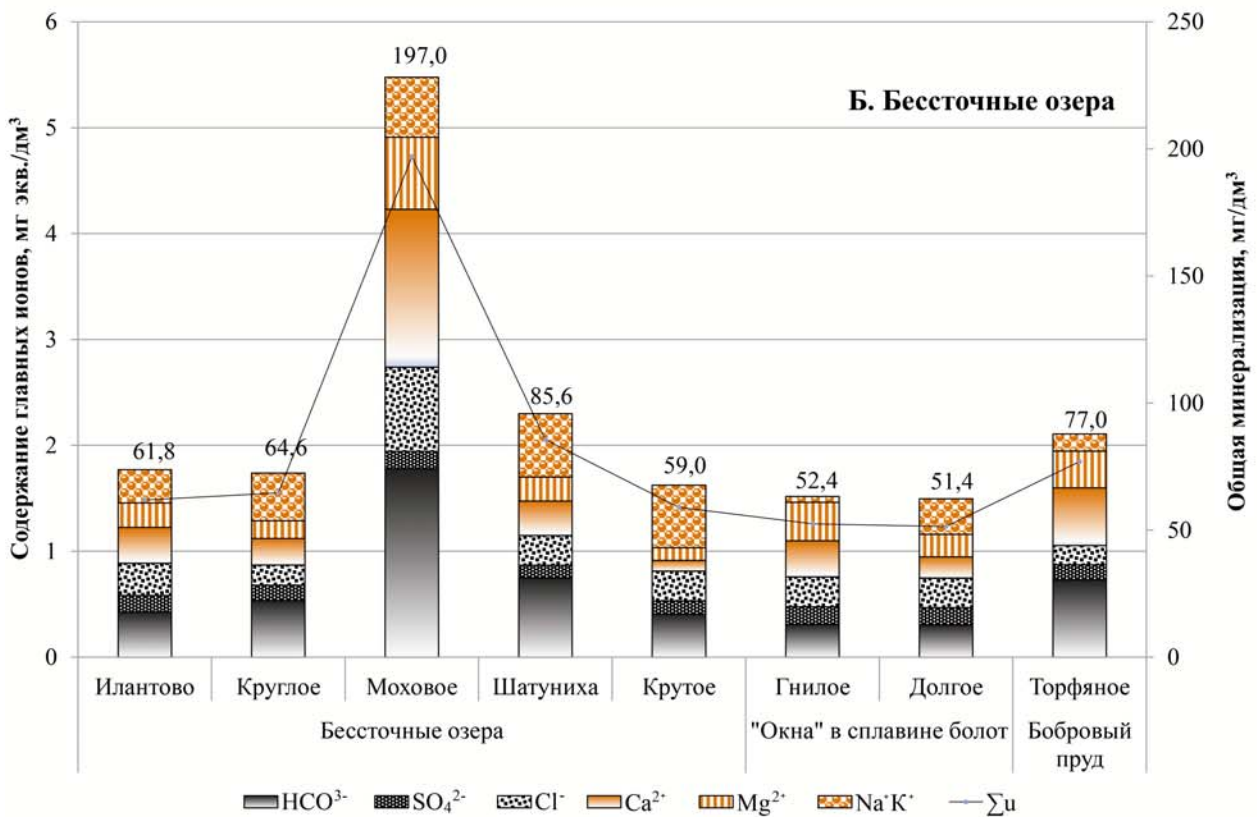
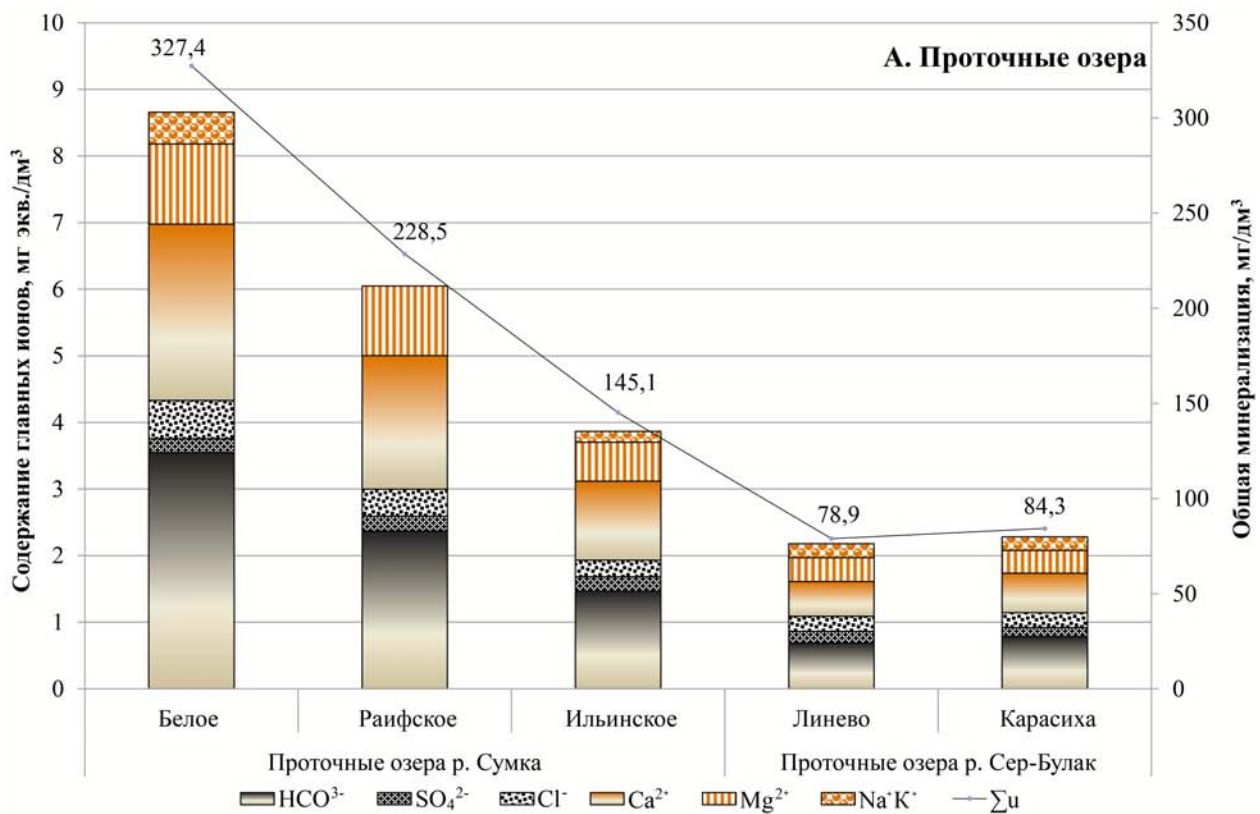


Рис. 2. Содержание главных ионов и изменчивость величины общей минерализации в проточных (А) и бессточных (Б) озерах

Fig.2. Content of the main ions and the variability of the total mineralization in open (A) and closed (Б) lakes

Таблица 1. Ионный состав и формула Курлова разнотипных озер заповедника

Table 1. Ionic composition and Kurlov formula of different types of lakes in the reserve

Группа озер Types of lakes	Название озера Name of lakes	Горизонт Horizon	Ионный состав, мг/дм ³ Ionic composition, mg/dm ³						Формула Курлова* Kurlov formula *
			HCO ₃ ⁻ , мг/дм ³ HCO ₃ ⁻ , mg/dm ³	SO ₄ ²⁻ , мг/дм ³ SO ₄ ²⁻ , mg/dm ³	Cl ⁻ , мг/дм ³ Cl ⁻ , mg/dm ³	Ca ²⁺ , мг/дм ³ Ca ²⁺ , mg/dm ³	Mg ²⁺ , мг/дм ³ Mg ²⁺ , mg/dm ³	Na ⁺ +K ⁺ , мг/дм ³ Na ⁺ +K ⁺ , mg/dm ³	
Проточные озера в долине р. Сумка Open lakes in the Sumka River valley	Белое Beloe	Поверхность Surface	197,0–254,0** 218,1±7,3 (n=8)	7,8–14,4 10,6±1,0	18,4–23,4 20,7±0,6	45,6–58,2 50,9±1,7	12,4–15,3 14,4±0,6	1,1–30,8 17,4±3,8	$M_{0,3} \frac{HCO_3 82 Cl 13 SO_4 5}{Ca 61 Mg 27 Na K 12} pH 7,7$
		Дно Bottom	205,0–222,0 214,7±5,0 (n=3)	7,9–10,0 9,3±0,7	19,1–21,3 20,1±0,6	50,3–62,3 55,2±3,6	12,4–16,9 14,8±1,3	0–25,0 12,3±7,2	
	Раифское Raifskoe	Поверхность Surface	103,0–186,0 140,0±8,8 (n=11)	10,0–12,9 11,2±0,4	12,8–17,0 14,9±0,5	34,2–43,6 39,7±0,8	9,0–32,7 12,9±2,0	0–20,4 6,0±2,4	$M_{0,2} \frac{HCO_3 79 Cl 14 SO_4 7}{Ca 62 Mg 31 Na K 12} pH 7,6$
		Дно Bottom	97,6–197,0 148,2±9,6 (n=11)	9,4–11,9 10,6±0,3	10,0–16,1 13,7±0,7	31,8–52,6 40,7±1,7	9,4–28,1 12,5±1,6	0–19,5 5,6±2,0	
	Ильинское Iilinskoe	Поверхность Surface	43,4–111,0 77,7±7,5 (n=10)	10,0–12,5 10,7±0,3	4,9–14,5 8,9±0,9	13,7–27,8 20,4±1,5	4,7–9,2 6,7±0,5	0–17,7 6,3±1,8	$M_{0,2} \frac{HCO_3 75 Cl 13 SO_4 12}{Ca 59 Mg 30 Na K 11} pH 7,9$
		Дно Bottom	67,8–128,0 101,2±5,4 (n=10)	9,3–11,3 10,2±0,2	4,3–10,0 8,8±0,6	24,8–29,6 27,1±0,5	6,6–8,4 7,6±0,2	0–13,7 4,8±1,4	
Проточные озера в долине р. Сер-Булак Open lakes in the Ser-Bulak River valley	Линево Linevo	Поверхность Surface	12,2–59,2 33,4±4,4 (n=12)	6,0–10,0 8,7±0,5	2,8–10,0 7,6±0,9	7,8–14,1 10,1±0,6	1,9–7,2 3,7±0,4	0–15,0 3,9±1,3	$M_{0,08} \frac{HCO_3 61 Cl 22 SO_4 17}{Ca 49 Mg 33 Na K 18} pH 6,7$
		Дно Bottom	12,2–75,7 50,6±5,3 (n=12)	4,4–10,0 7,9±0,7	4,9–14,7 8,5±0,9	7,8–13,0 10,8±0,6	2,9–7,4 5,0±0,5	0–16,2 7,5±1,6	
	Карасиха Karasikha	Поверхность Surface	19,0–67,7 45,5±5,8 (n=8)	3,3–10,0 6,3±1,1	5,7–10,0 8,1±0,6	10,2–14,2 12,5±0,5	2,9–5,3 4,3±0,3	0–9,2 4,4±1,2	$M_{0,08} \frac{HCO_3 67 Cl 20 SO_4 13}{Ca 51 Mg 30 Na K 19} pH 6,6$
		Дно Bottom	19,0–78,6 50,0±6,0 (n=8)	4,3–10,0 6,7±1,0	5,7–10,0 7,7±0,7	9,4–14,9 11,4±0,7	1,4–5,7 3,9±0,5	0–17,2 7,7±2,2	
Бессточные озера Closed lakes	Илантово Ilantovo	Поверхность Surface	12,2–36,6 24,1±2,6 (n=12)	2,9–10,0 7,2±1,0	10,0–10,0 10,0±0	4,0–7,8 6,2±0,3	1,4–4,6 2,6±0,2	0–12,0 7,6±1,1	$M_{0,06} \frac{HCO_3 47 Cl 35 SO_4 18}{Ca 35 Mg 27 Na K 35} pH 6,6$
		Дно Bottom	12,2–47,6 27,8±4,0 (n=12)	3,0–10,0 7,8±1,1	10,0–24,1 11,6±1,6	5,5–12,5 7,4±0,7	1,7–4,7 3,0±0,4	0–17,8 8,4±1,9	
	Круглое Krugloe	Поверхность Surface	14,6–54,2 26,7±5,0 (n=7)	3,4–10,0 5,9±1,1	2,8–10,0 5,3±1,3	3,9–5,9 4,9±0,3	1,4–2,6 1,8±0,2	2,3–30,7 7,9±3,2	$M_{0,07} \frac{HCO_3 60 Cl 22 SO_4 17}{Ca 34 Mg 23 Na K 43} pH 6,7$
		Дно Bottom	16,5–66,4 38,4±14,7 (n=3)	3,8–10,0 7,9±2,1	4,9–10,0 8,3±1,7	4,3–6,3 5,1±3,0	1,4–3,3 2,3±0,6	4,1–30,7 14,6±8,2	
	Моховое Mokhovoe	Поверхность Surface	66,4–116,0 91,1±14,3 (n=3)	4,3–10,0 8,1±1,9	21,6–31,2 25,6±2,9	21,8–29,8 26,1±2,3	6,6–9,5 7,6±0,9	6,9–18,9 11,5±3,7	$M_{0,2} \frac{HCO_3 64 Cl 29 SO_4 7}{Ca 54 Mg 25 Na K 21} pH 6,8$
		Дно Bottom	112,0–151,0 126,0±12,5 (n=3)	3,1–10,0 7,7±2,3	29,8–31,9 30,7±0,6	31,1–36,2 33,7±1,5	7,6–10,4 8,9±0,8	12,3–25,2 16,9±4,2	
	Шатуника Shatunikha	Поверхность Surface	25,6–115,0 45,7±11,8 (n=7)	3,0–10,0 5,7±1,1	10,0–10,0 10,0±0	5,6–7,1 7,0±0,2	1,9–3,7 2,8±0,3	7,5–43,9 14,9±4,9	$M_{0,08} \frac{HCO_3 62 Cl 27 SO_4 11}{Ca 31 Mg 22 Na K 47} pH 8,0$
	Крутое Krutoe	Поверхность Surface	10,0–66,4 24,8±7,1 (n=7)	3,3–10,0 6,0±1,2	10,0–10,0 10,0±0	2,0–3,1 2,4±0,2	1,0–2,8 1,7±0,3	8,3–29,8 14,7±2,7	$M_{0,06} \frac{HCO_3 46 Cl 38 SO_4 16}{Ca 13 Mg 15 Na K 72} pH 6,8$

Окончание табл. 1
Table 1 (continued)

Группа озер Types of lakes	Название озера Name of lakes	Горизонт Horizon	Ионный состав, мг/дм ³ Ionic composition, mg/dm ³						Формула Курлова* Kurlov formula *
			HCO ₃ ⁻ , мг/дм ³ HCO ₃ ⁻ , mg/dm ³	SO ₄ ²⁻ , мг/дм ³ SO ₄ ²⁻ , mg/dm ³	Cl ⁻ , мг/дм ³ Cl ⁻ , mg/dm ³	Ca ²⁺ , мг/дм ³ Ca ²⁺ , mg/ dm ³	Mg ²⁺ , мг/дм ³ Mg ²⁺ , mg/dm ³	Na ⁺ +K ⁺ , мг/дм ³ Na ⁺ +K ⁺ , mg/dm ³	
«Окна» в спла- вине болот "Win- dows" in bogs	Гнилое Gniloe	Поверх- ность Surface	12,2–20,1 16,6 ± 2,3 (n=3)	4,1–10,0 8,0 ± 2,0	10,0–10,0 10,0 ± 0	3,1–9,3 5,6 ± 1,9	1,9–7,6 3,8 ± 1,9	0,0–9,7 5,8 ± 2,9	M0,05 $\frac{HCO_3 41Cl 37SO_4 22}{Ca 37Mg 38NaK 25}$ pH 6,2
		Дно Bottom	17,6–25,6 21,1 ± 2,4 (n=3)	4,0–10,0 8,0 ± 2,0	10,0–10,0 10,0 ± 0	3,9–10,8 8,0 ± 2,1	1,9–6,6 5,0 ± 1,6	0,0–8,6 2,9 ± 2,9	
	Долгое Dolgoe	Поверх- ность Surface	14,0–21,7 17,8 ± 2,2 (n=3)	3,1–10,0 7,7 ± 2,3	10,0–10,0 10,0 ± 0	2,4–5,1 3,5 ± 0,8	1,2–2,3 1,8 ± 0,3	8,9–11,7 10,2 ± 0,8	M0,05 $\frac{HCO_3 41Cl 38SO_4 21}{Ca 26Mg 29NaK 45}$ pH 5,9
		Дно Bottom	17,6–20,6 19,4 ± 0,9 (n=3)	3,3–10,0 7,8 ± 2,3	10,0–10,0 10,0 ± 0	3,1–5,5 4,4 ± 0,7	1,9–5,7 3,4 ± 0,7	0,0–11,7 6,8 ± 3,5	
Бобро- вый пруд Bobrovui (Beaver) Pond	Торфяное Torfyanoe	Поверх- ность Surface	44,5–44,5 44,5 ± 0(n=2)	3,8–10,0 6,9 ± 3,1	2,8–10,0 6,4 ± 3,4	9,4–12,4 10,9 ± 1,5	2,9–5,6 4,3 ± 1,4	3,5–4,9 4,2 ± 0,7	M0,08 $\frac{HCO_3 71Cl 16SO_4 13}{Ca 51Mg 32NaK 17}$ pH 6,3

Примечание. *Формула Курлова рассчитана по усредненным значениям (2021–2023 гг.). **Числитель – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее ± ошибка среднего.

Note. * Kurlov formula is calculated using the average values (2021–2023); ** numerator – minimum and maximum values, denominator – mean ± mean error.

Однако в придонных слоях проточных озер, расположенных в долине р. Сер-Булак, и в «окнах» болот всегда отмечался дефицит O₂ (0,8–2,7 мг/дм³), что в 2,2–7,5 раза ниже утвержденных норм растворенного кислорода для летнего периода (ПДК р. х. – не менее 6,0 мг/дм³). На дне этих озер отмечалось накопление сероводорода и сульфидов, концентрации которых составляли 0,03–0,14 мг/дм³ (до 28,8 ПДК р. х.).

Уровень биогенной нагрузки и количество органических веществ (по величине БПК₅ и ХПК) различались в каждом водоеме. Величина БПК₅ составляла (мгО₂/дм³): 1,5–4,9 – в проточных озерах, 2,4–9,9 – в бессточных озерах и 3,4–5,5 – в «окнах» сплавин, превышая ПДК р. х. в 2,3–4,7 раза для максимальных значений. Величина ХПК составляла соответственно по типам озер – 12–56, 30–74 и 39–88 мгО/дм³, что также составляет 1,9–2,9 ПДК р. х. в максимуме. Среди биогенных элементов выделялось содержание аммоний-иона с максимальными значениями в придонных слоях озер – 1,1–3,9 мг/дм³ (до 7,8 ПДК р. х.). Концентрации нитритов и нитратов часто соответствовали аналитическому нулю или не превышали по всей толще воды 0,06 мгNO₂/дм³ и 4,48 мгNO₃/дм³ (в пределах ПДК р. х.). Содержание фосфат-иона в поверхностных слоях всех озер составляло не более 0,05 мг/дм³, тогда как в придонных изменялось от 0,3 до

1,43 мг/дм³, составляя максимальные значения до 2,92 мг/дм³ в придонных слоях озер, расположенных в долине р. Сер-Булак. Превышение ПДК р. х. по P-PO₄³⁻ (для эвтрофных водоемов) составляло в этой группе водоемов 2,5–4,2 раза (табл. 2).

В сравнительной характеристике содержания минеральных форм азота и фосфора в разных группах озер выделялась группа проточных озер в долине р. Сер-Булак. Здесь в придонных слоях водоемов постоянно отмечалось повышенное содержание фосфора – до 0,47 мгP-PO₄³⁻/дм³. Это связано с поступлением болотных вод с водосбора, накоплением на дне значительного слоя донных отложений (по данным Тайсина [2006], до 6 м), сильным антропогенным загрязнением в прошлом и практически полным отсутствием проточности в летний период. В заболачивающихся озерах и «окнах» в сплаvine болот содержание фосфора снижается до 0,21–0,24 мгP-PO₄³⁻/дм³. Содержание азота минерального также различается по группам озер (мгN/дм³): в проточных озерах р. Сумка накопление в придонных слоях составляет 0,8–1,7; в проточных озерах р. Сер-Булак – 1,9–2,1, в бессточных озерах – 0,4–1,6, в «окнах» болот – 1,03–2,8. Максимальные значения отмечаются для водоемов, расположенных в долине или около р. Сер-Булак (рис. 3).

Таблица 2. Содержание органических и биогенных веществ в разнотипных озерах

Table 2. Content of organic substances and nutrients indifferent types of lakes

Группа озер Types of lakes	Название озера Name of lakes	Горизонт Horizon	БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³ BOD ₅ , mgO ₂ /dm ³	ХПК, мгО/дм ³ COD, mgO ₂ /dm ³	NH ₄ ⁺ , мг/дм ³ NH ₄ ⁺ , mg/dm ³	NO ₂ ⁻ , мг/дм ³ NO ₂ ⁻ , mg/dm ³	NO ₃ ⁻ , мг/дм ³ NO ₃ ⁻ , mg/dm ³	PO ₄ ³⁻ , мг/дм ³ PO ₄ ³⁻ , mg/dm ³	
	ПДК _{р.к.}		2,0		0,5	0,08	40,0	0,2 (P)	
Проточные озера в долине р. Сумка Open lakes in the Sumka River valley	Белое Beloe	Поверх- ность Surface	4,16–9,47* 6,18 ± 0,83 (n=8)	26,7–43,3 32,5 ± 2,4	0,11–0,34 0,19 ± 0,03	0,02–0,05 0,03 ± 0,0	0,28–1,07 0,46 ± 0,10	0,06–0,11 0,07 ± 0,01	
		Дно Bottom	4,80–6,40 5,74 ± 0,48 (n=3)	2,3–35,8 27,9 ± 4,0	0,26–1,07 0,69 ± 0,24	0,02–0,04 0,03 ± 0,0	0,36–0,67 0,50 ± 0,09	0,09–0,14 0,11 ± 0,01	
	Раифское Raifskoe	Поверх- ность Surface	1,18–4,30 2,11 ± 0,27 (n=11)	12,0–47,0 20,1 ± 2,9	0,05–0,43 0,13 ± 0,03	0,01–2,0 0,20 ± 0,18	0,10–0,72 0,30 ± 0,05	0,01–0,05 0,03 ± 0,01	
		Дно Bottom	1,78–2,76 2,18 ± 0,10 (n=11)	13,4–35,5 20,9 ± 2,0	0,34–2,20 1,37 ± 0,19	0,02–0,55 0,10 ± 0,05	0,10–3,27 1,41 ± 0,29	0,02–0,81 0,25 ± 0,07	
	Ильинское Ilinskoe	Поверх- ность Surface	2,72–9,01 6,16 ± 0,63 (n=10)	23,0–39,4 28,5 ± 1,7	0,08–0,26 0,13 ± 0,02	0,01–0,02 0,02 ± 0,0	0,21–1,21 0,37 ± 0,09	0,02–0,06 0,04 ± 0,0	
		Дно Bottom	0,82–4,60 2,95 ± 0,32 (n=10)	17,5–23,5 20,8 ± 0,6	0,37–2,80 1,05 ± 0,22	0,02–0,10 0,06 ± 0,01	0,22–4,48 1,84 ± 0,4	0,06–0,96 0,32 ± 0,08	
Проточные озера в долине р. Сер- Булак Open lakes in the Ser-Bulak River valley	Линево Linevo	Поверх- ность Surface	2,10–5,91 3,79 ± 0,31 (n=12)	45,7–59,8 54,3 ± 1,0	0,05–0,71 0,36 ± 0,06	0,02–0,04 0,02 ± 0	0,51–1,17 0,79 ± 0,06	0,02–0,21 0,11 ± 0,02	
		Дно Bottom	2,10–5,69 3,59 ± 0,35 (n=12)	52,0–70,0 60,1 ± 1,7	0,52–3,90 1,86 ± 0,32	0,02–0,03 0,02 ± 0,0	0,49–1,79 1,09 ± 0,09	0,07–2,92 1,43 ± 0,24	
	Карасиха Karasikha	Поверх- ность Surface	1,50–7,80 3,16 ± 0,74 (n=8)	36,0–60,0 53,4 ± 2,9	0,14–0,59 0,28 ± 0,05	0,02–0,05 0,03 ± 0,01	0,64–1,25 1,02 ± 0,07	0,03–0,38 0,16 ± 0,05	
		Дно Bottom	2,43–7,40 4,57 ± 0,64 (n=8)	37,0–65,0 56,7 ± 3,1	0,79–3,84 1,64 ± 0,33	0,02–0,06 0,03 ± 0,01	0,60–1,57 1,19 ± 0,1	0,62–2,61 1,31 ± 0,20	
Бессточные озера Closed lakes	Илантово Ilantovo	Поверх- ность Surface	2,40–7,90 4,80 ± 0,54 (n=12)	35,0–67,0 47,9 ± 3,0	0,05–0,73 0,25 ± 0,06	0,02–0,03 0,02 ± 0,0	0,32–0,83 0,59 ± 0,05	0,01–0,05 0,04 ± 0,0	
		Дно Bottom	2,777–8,91 6,07 ± 0,64 (n=12)	39,5–80,0 54,2 ± 4,6	0,05–0,78 0,26 ± 0,08	0,02–0,02 0,02 ± 0,0	0,42–0,93 0,67 ± 0,06	0,02–0,06 0,04 ± 0,01	
	Круглое Krugloe	Поверх- ность Surface	3,53–7,49 5,13 ± 0,62 (n=7)	28,5–52,0 37,3 ± 3,3	0,05–0,48 0,22 ± 0,05	0,02–0,03 0,02 ± 0,0	0,28–0,82 0,47 ± 0,06	0,02–0,05 0,03 ± 0,0	
		Дно Bottom	6,01–7,80 6,81 ± 0,53 (n=3)	36,5–57,0 45,7 ± 6,0	0,16–0,57 0,42 ± 0,13	0,02–0,04 0,03 ± 0,01	0,38–0,74 0,56 ± 0,011	0,03–0,05 0,04 ± 0,01	
	Моховое Mokhovoie	Поверх- ность Surface	2,26–4,05 3,11 ± 0,52 (n=3)	30,0–41,1 36,9 ± 3,5	0,05–0,12 0,09 ± 0,02	0,02–0,03 0,02 ± 0	0,39–0,68 0,54 ± 0,08	0,02–0,05 0,04 ± 0,01	
		Дно Bottom	2,16–5,46 3,91 ± 0,96 (n=3)	40,0–46,0 43,4 ± 1,8	1,14–1,57 1,37 ± 0,13	0,02–0,04 0,03 ± 0,01	0,81–1,21 0,96 ± 0,13	0,59–0,66 0,62 ± 0,02	
	Шатуниха Shatunikha	Поверх- ность Surface	2,51–8,96 6,67 ± 0,90 (n=7)	39,6–74,0 62,0 ± 4,6	0,07–0,51 0,22 ± 0,06	0,02–0,03 0,02 ± 0	0,36–0,56 0,47 ± 0,03	0,03–0,15 0,06 ± 0,02	
	Крутое Krutoe	Поверх- ность Surface	4,48–9,90 6,86 ± 0,73 (n=7)	29,8–55,7 44,4 ± 4,5	0,06–0,50 0,25 ± 0,07	0,02–0,23 0,05 ± 0,03	0,40–0,99 0,52 ± 0,08	0,02–0,11 0,05 ± 0,01	
	«Окна» в сплаvine болот “Windows” in bogs	Гнилое Gniloe	Поверх- ность Surface	2,08–5,49 3,49 ± 1,03 (n=3)	56,0–66,0 62,7 ± 3,3	0,05–0,72 0,30 ± 0,21	0,02–0,05 0,03 ± 0,01	0,83–1,60 1,25 ± 0,23	0,05–0,05 0,05 ± 0
			Дно Bottom	2,28–6,91 4,95 ± 1,38 (n=3)	70,2–88,0 80,4 ± 5,3	1,50–3,50 2,37 ± 0,59	0,02–0,04 0,03 ± 0,01	1,15–1,96 1,67 ± 0,26	0,54–1,00 0,71 ± 0,14
Долгое Dolgoie		Поверх- ность Surface	3,11–7,66 4,71 ± 1,48 (n=3)	39,0–51,5 43,2 ± 4,2	0,05–1,41 0,63 ± 0,41	0,02–0,04 0,03 ± 0,01	0,75–1,21 0,95 ± 0,14	0,03–0,05 0,04 ± 0,01	
		Дно Bottom	3,25–6,60 4,98 ± 0,97 (n=3)	43,7–48,0 45,2 ± 1,4	0,60–1,08 0,78 ± 0,15	0,02–0,04 0,03 ± 0,01	0,95–1,22 1,04 ± 0,09	0,18–0,41 0,30 ± 0,06	
Бобровый пруд Bobrovui (Beaver) Pond	Торфяное Torfinoie	Поверх- ность Surface	2,80–3,70 3,25 ± 0,45(n=3)	35,0–74,5 54,8 ± 19,8	0,33–0,68 0,50 ± 0,18	0,02–0,03 0,03 ± 0,01	0,40–1,25 0,83 ± 0,42	0,11–0,47 0,29 ± 0,18	

Примечание. *Числитель – минимальное и максимальные значения, знаменатель – среднее ± ошибка среднего.

Note. *Numerator – minimum and maximum values, denominator – mean ± mean error.

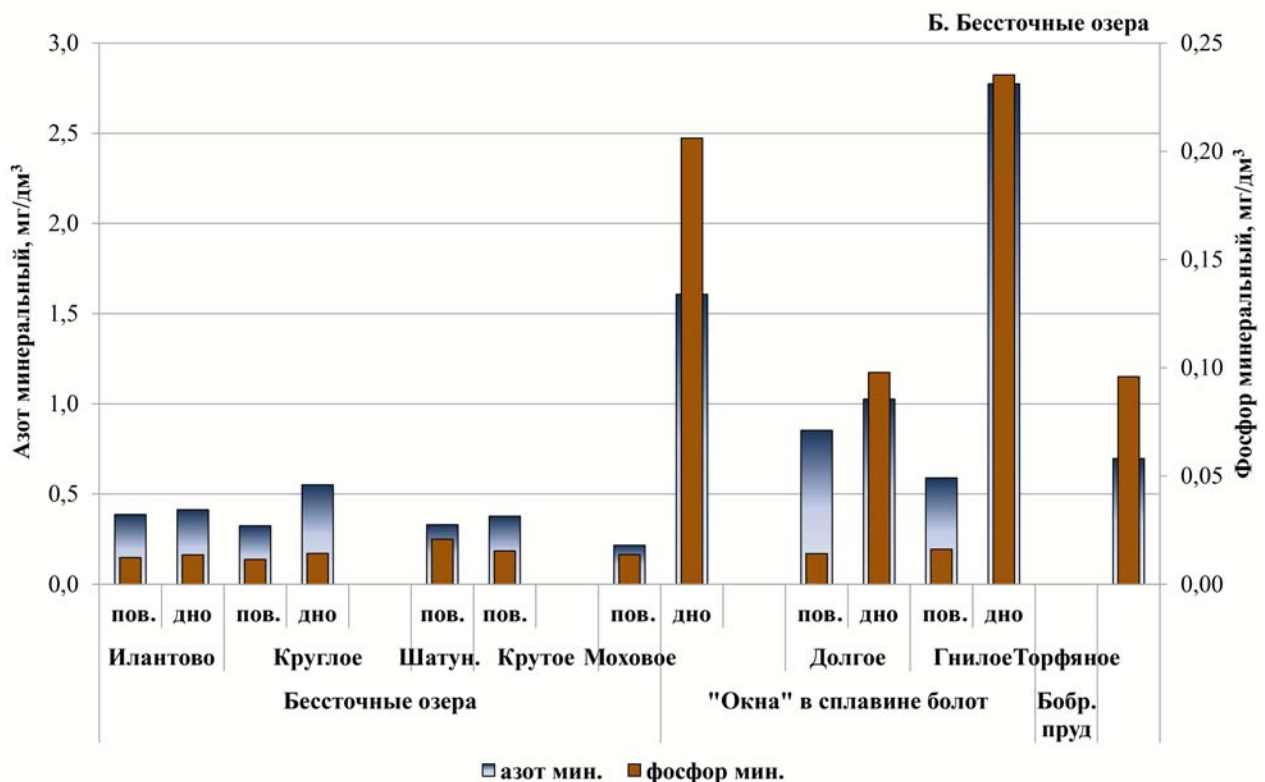
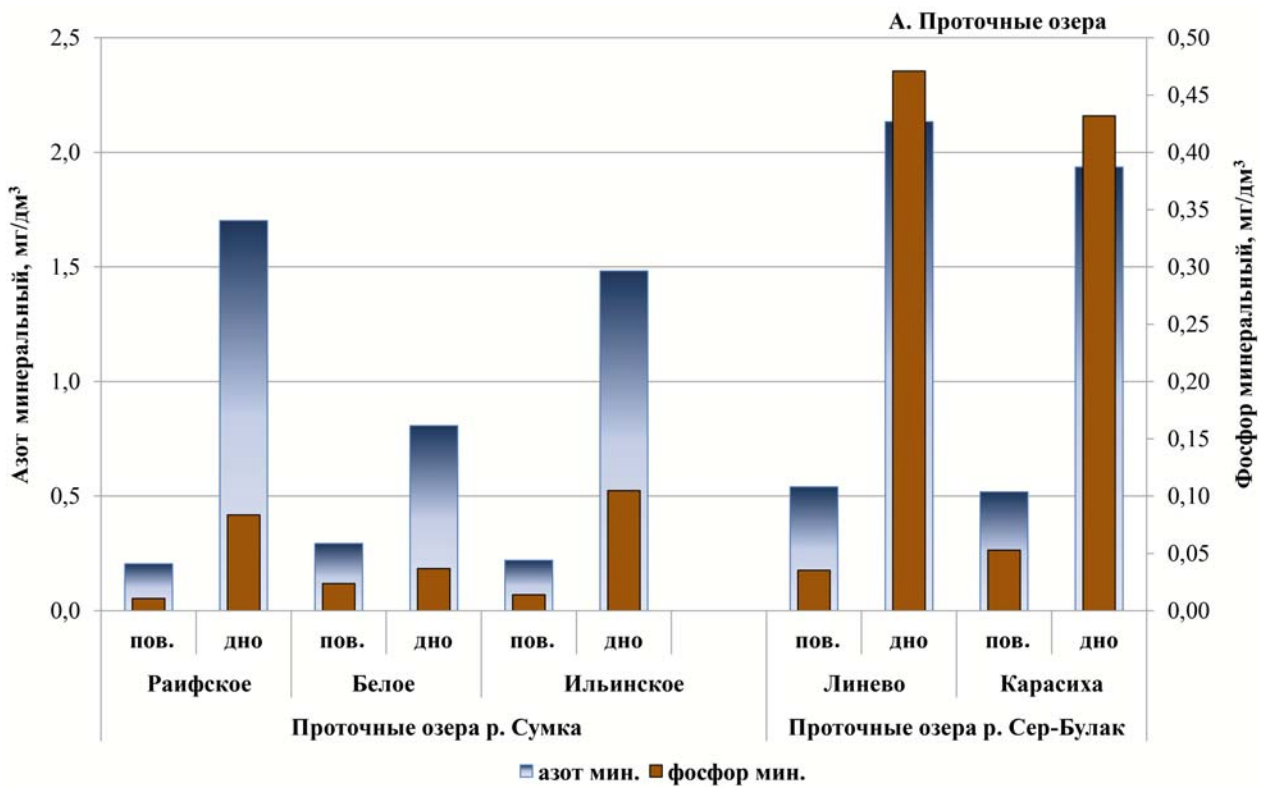


Рис. 3. Содержание минеральных форм азота и фосфора в проточных (А) и бессточных озерах (Б) заповедника по усредненным данным за 2021–2023 гг.

Fig. 3. Content of mineral forms of nitrogen and phosphorus in open (A) and closed lakes (Б) of the reserve according to the average data for 2021–2023

В многолетней динамике (за последние 15 лет) отмечается тенденция на незначительное снижение содержания минеральных форм азота и фосфора как в поверхностных, так и в придонных слоях воды разнотипных озер (рис. 4). Для анализа мы выбрали основные – «модельные» – озера, характеризующие каждую группу. В глубоководном проточном оз. Раифское накопление азота на дне значительное, и поэтому снижение содержания азота минерального происходит в меньшей степени. Для проточного оз. Линево, расположенного в заболоченном водосборе, характерна выраженная тенденция снижения содержания $N_{\text{мин}}$ и $P-PO_4^{3-}$ в результате процессов самоочищения. Аналогичные тенденции можно отмечать и в бессточных озерах Илантово и Долгое, несмотря на их зарастание и заболачивание. Следует считать, что в настоящее время данный уровень содержания биогенных веществ близок к естественному.

За период наблюдений в воде озер фиксировалось превышение рыбохозяйственных нормативов по марганцу – 1,7–54,1 ПДК, железу общему – 2,7–70 ПДК, меди – 2,3–5,4 ПДК; концентрация цинка, никеля, свинца не превышала допустимых норм. Значительные превышения тяжелых металлов обусловлены геохимическими характеристиками региона и заболачиванием водоемов. В заболачивающихся озерах эти показатели всегда выше, что связано с закислением и накоплением легкорастворимых органических форм, способствующих образованию растворимых соединений металлов. Именно металлы определяли оценку качества воды.

Результаты расчета удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ) показали, что качество воды озер изменялось от «слабозагрязненной» (2 класс качества) до «экстремально грязной» (5 класса качества). В химическом составе воды разнотипных водоемов отмечены существенные изменения в течение исследуемого периода: коэффициент комплексности загрязненности изменялся от 10 до 80 %, составляя максимальные значения в придонных слоях воды озер. Из определяемых показателей загрязняющими являлись легкоокисляемые органические вещества (по БПК₅), фенолы и ряд металлов (соединения железа, меди, марганца). К критическим показателям загрязненности ($S_{ij} > 9$) относилось биохимическое потребление кислорода (БПК₅), который был выявлен в проточных озерах Ильинское и Линево и практически во всех бессточных озерах. В проточных озерах р. Сер-Булак отмечены значительные величины индекса загрязнения для таких биогенных веществ,

как ион аммония и фосфат-ион: именно в этих водоемах значение УКИЗВ выше, чем в остальных озерах Раифского участка. Для всех озер отмечен экстремально высокий уровень загрязненности по таким показателям, как БПК₅, ХПК, железо общее, фенолы, медь и марганец, средний уровень загрязненности – по аммоний-иону и растворенному кислороду. По повторяемости случаев загрязненности каждым из рассматриваемых ингредиентов загрязненность воды определялась как «характерная».

Заключение

Гидрохимический режим водоемов Раифского участка Волжско-Камского заповедника и его охранный зоны формируется за счет особенностей водосбора, где существенную роль играет антропогенный фактор. Газовый режим озер имеет признаки эвтрофии: перенасыщение растворенным кислородом поверхностных слоев воды и резкий дефицит O_2 у дна; накопление сероводорода в придонных слоях воды, особенно в глубоководных и заболачивающихся озерах. Превышения ПДК р. х. по иону аммония и фосфору фосфатов часто отмечаются в придонных слоях проточных озер р. Сер-Булак, имеющих заболоченный водосбор, и в «окнах» в сплавинах торфяных болот. В воде озер регулярно отмечается высокая концентрация тяжелых металлов – железа общего, меди, марганца, их максимальные значения фиксируются в проточных озерах. Это связано с геохимическими особенностями территории и существенно влияет на оценку степени загрязнения озер. Однако, анализируя оригинальные многолетние данные, можно отметить стабилизацию химического состава заповедных, особенно проточных озер за счет снижения интенсивности сельского хозяйства на территории водосбора и уменьшения объема речного стока. Содержание минеральных форм азота и фосфора за последние 15 лет уменьшается не только в поверхностных, но и в придонных слоях воды, что указывает на процессы самоочищения даже в зарастающих и заболачивающихся озерах. Выполненные исследования химического состава водоемов с корректировкой частоты отбора проб демонстрируют более точные результаты, которые позволяют разработать оптимальную программу мониторинга для отдельно взятого ООПТ. В данном случае рекомендуется организация мониторинга на основных водоемах для каждой выделенной группы с частотой отбора каждый месяц в период открытой воды, с проведением контрольных отборов проб на удаленных заповедных участках.

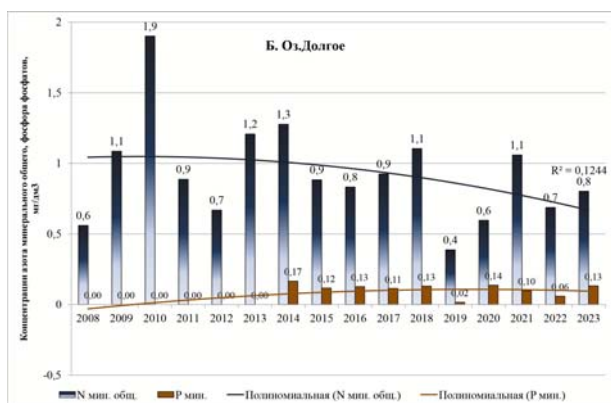
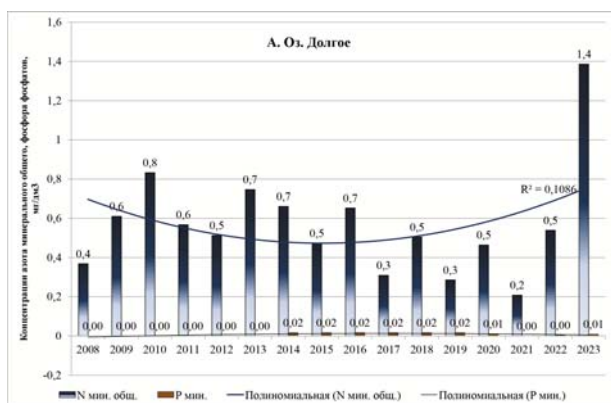
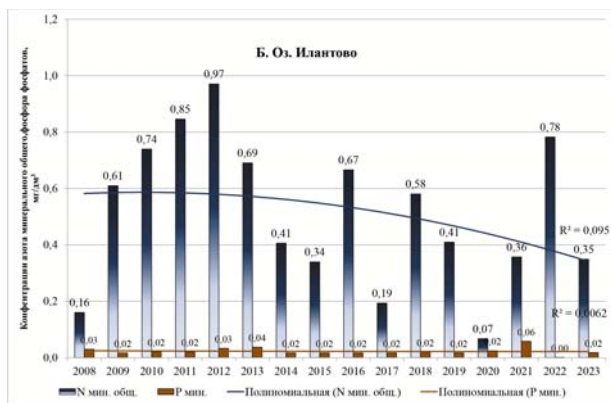
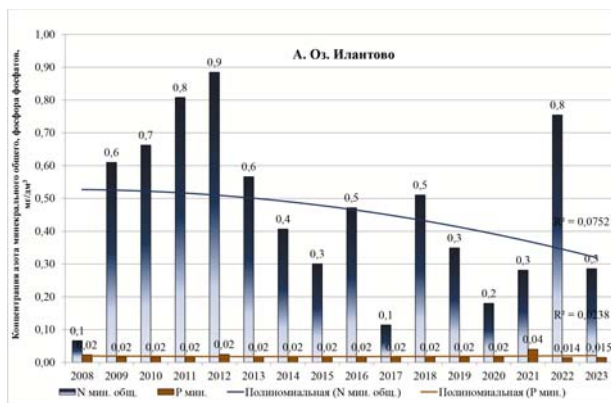
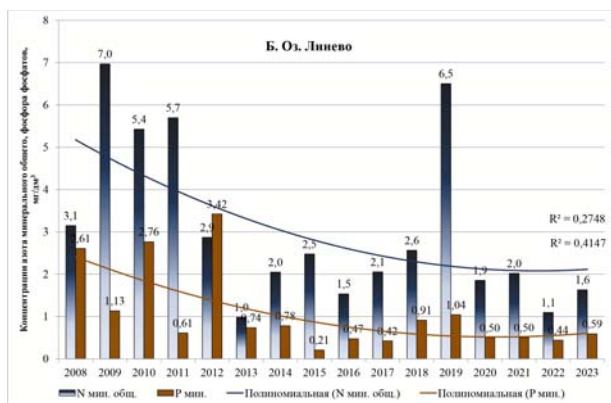
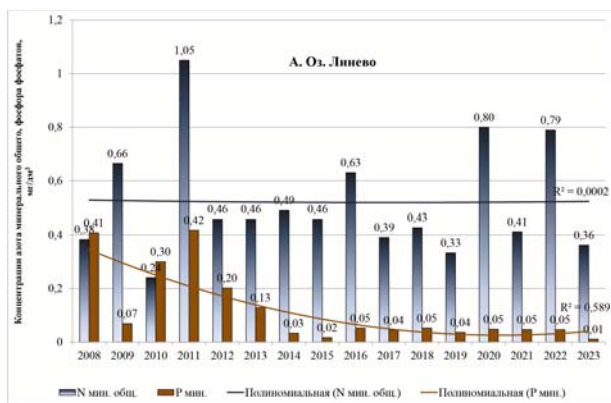
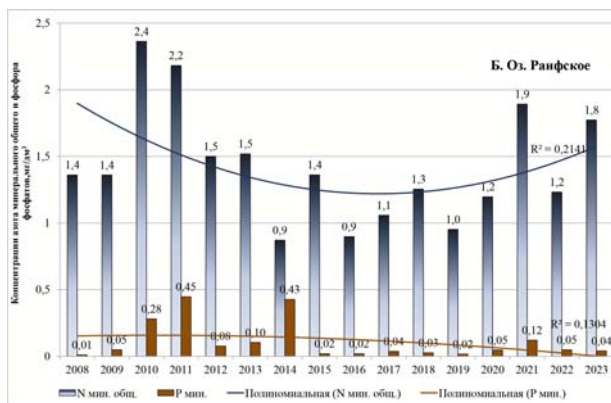
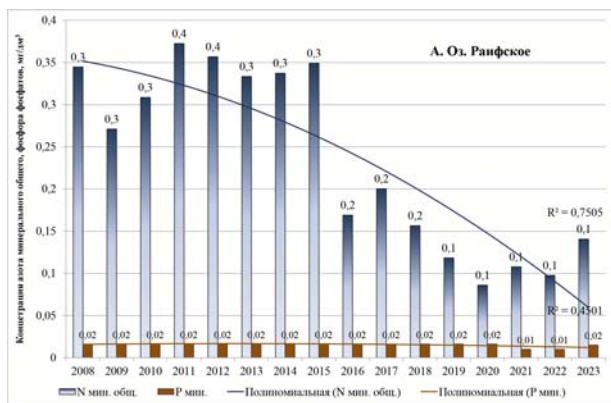


Рис. 4. Динамика концентрации азота минерального и фосфора фосфатов в поверхностных (А) и придонных (Б) слоях воды в основных исследуемых озерах за 2008–2023 гг.

Fig. 4. Dynamics of concentrations of mineral total nitrogen and phosphorus phosphates in the surface (A) and bottom (Б) layers of water in the main studied lakes for 2008–2023

Это позволит осуществлять контроль за состоянием и изменениями химического состава охраняемых водоемов на всей территории водосборного бассейна.

Литература

Алекин О. А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 442 с.

Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 13 декабря 2016 г. № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» (с изменениями и дополнениями 12 октября 2018 г., 10 марта 2020 г.).

РД 52.24.643-2002. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям.

Тайсин А. С. Озера Приказанского района, их природные и антропогенные изменения. Казань: Изд-во ТГГПУ, 2006. 167 с.

Унковская Е. Н., Шагидуллин Р. Р., Тарасов О. Ю., Юронец-Лужаева Р. Ч. Динамика химического состава озер Волжско-Камского заповедника // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2009. Т. 18, № 4. 114–120.

Унковская Е. Н., Тарасов О. Ю. Гидрохимический режим водоемов и водотоков Раифского участка Волжско-Камского заповедника и его охранной зоны // Труды Волжско-Камского государ-

ственного природного заповедника. Вып. 7. Казань, 2016. С. 9–40.

References

Alekin O. A. Fundamentals of hydrochemistry. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1970. 442 p. (In Russ.)

Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation dated December 13, 2016 N 552 'On approval of water quality standards for water bodies of fishery importance, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery importance' (as amended and supplemented on October 12, 2018; March 10, 2020). (In Russ.)

RD 52.24.643-2002. Method of complex assessment of surface water pollution degree by hydrochemical indicators. (In Russ.)

Taisin A. S. Lakes of the Prikazansky District, their natural and anthropogenic changes. Kazan': TGGPU; 2006. 167 p. (In Russ.)

Unkovskaya E. N., Shagidullin R. R., Tarasov O. Yu., Yuranets-Luzhaeva R. Ch. Dynamics of chemical composition of lakes of the Volga-Kama Reserve. *Samar-skaya Luka: problemy regional'noi i global'noi ekologii = Samara Luka: Problems of Regional and Global Ecology*. 2009;18(4):114–120. (In Russ.)

Unkovskaya E. N., Tarasov O. Yu. Hydrochemical regime of reservoirs and watercourses of the Raif section of the Volzhsko-Kamsky Nature Reserve and its protection zone. *Trudy Volzhsko-Kamskogo gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika = Proceedings of the Volzhsko-Kamsky State Nature Reserve*. Iss. 7. Kazan; 2016. P. 9–40. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 27.12.2023; принята к публикации / accepted: 29.02.2024.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Унковская Елена Николаевна

старший научный сотрудник, заместитель директора по управлению, экологическому образованию и экотуризму

e-mail: l-unka@mail.ru

Косова Мария Владимировна

аспирант КФУ, младший научный сотрудник ИПЭН АН РТ

e-mail: mary.burunina96.5@yandex.ru

Шурмина Надежда Васильевна

научный сотрудник

e-mail: schurmina2015@yandex.ru

Мухаметзянова Фания Максимовна

младший научный сотрудник

e-mail: fania2691@gmail.com

Игнатьев Юрий Алексеевич

старший научный сотрудник

e-mail: chromjura@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Unkovskaya, Elena

Senior Researcher, Deputy Director for Management, Environmental Education and Tourism

Kosova, Mariya

Postgraduate Student, KFU; Junior Researcher, Institute of Ecology and Subsoil Use

Shurmina, Nadezhda

Researcher

Mukhametzyanova, Faniya

Junior Researcher

Ignatiev, Yuri

Senior Researcher