

УДК 556.314

ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЗНОТИПНЫХ ОЗЕР БОЛЬШОГО СОЛОВЕЦКОГО ОСТРОВА¹

© 2024 г. К. В. Титова^{а, *}, Н. М. Кокрятская^а, С. С. Попов^а, О. Ю. Морева^а, А. А. Слобода^а,
С. И. Климов^а, В. М. Быков^а, Н. С. Прилуцкая^а

^аФедеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. Н.П. Лавёрова УрО РАН,
Архангельск, 163020 Россия

*e-mail: ksyu-sev@mail.ru

Поступила в редакцию 06.04.2023 г.

После доработки 27.09.2023 г.

Принята к публикации 27.09.2023 г.

Проведены комплексные гидрохимические исследования девяти разнотипных озер Большого Соловецкого острова (Архангельская область) (июль 2022 г.). Выбор объектов обусловлен морфометрическими особенностями водоемов, удаленностью от моря и возможным наличием антропогенной нагрузки. Определены основные гидрохимические показатели (температура, электропроводность/минерализация, pH, цветность, щелочность, ионный состав, жесткость, содержание кислорода, сероводорода, органического углерода, биогенных элементов, тяжелых металлов, метана). Выявлена низкая жесткость вод, а также минерализация с доминированием хлорид-ионов и натрия. Показано, что гидрохимические условия, в целом, благоприятны для протекания биогеохимических процессов. При низком и среднем содержании органического вещества (от 8 до 30 мг/л) в его составе доминировали гумусовые кислоты, обуславливающие повышенную цветность вод (за исключением оз. Нижний Перт). По уровню трофии исследованные озера отнесены к категории олиготрофных (одно из них дистрофное), мезотрофных и эвтрофных. Антропогенная нагрузка обусловила статус мезотрофного водоема, а высокая трофность определялась природными факторами (заболоченностью водосборов и относительно недавним отделением их от моря).

Ключевые слова: Соловецкие острова, водные объекты, гидрохимические показатели, трофический статус.

DOI: 10.31857/S0321059624020078 **EDN:** CHPMXT

ВВЕДЕНИЕ

Глобальная система мониторинга окружающей среды по пресной воде GEMS/Water создана в 1978 г. для сбора данных о качестве воды по всему миру, для оценки состояния и тенденций изменения качества воды во внутренних водоемах, для поддержки устойчивого развития водных ресурсов. С ее помощью странам предлагается защищать и восстанавливать пресноводные и морские экосистемы, чтобы сохранить их для будущих поколений [27, 32]. По количеству озер большой интерес для Северо-Запада России имеет Большой Соловецкий остров. Всего на Соловецком архипелаге их насчитывается 376,

причем 337 из них расположено именно на этом острове [16], где часть озер соединена каналами. Уникальная озерно-канальная система имеет важное природоохранное значение. Органично вписываясь в природный ландшафт архипелага, эта система совершенствует природную среду острова, препятствуя заболачиванию приозерных лугов и лесов, улучшая гидрологические и гидрохимические показатели озер путем увеличения их проточности [13]. Гидрохимические исследования озер Соловецкого архипелага немногочисленны. В 1980–1990-е гг. сотрудники МГУ им. М.В. Ломоносова проводили подобные работы. Современный этап исследований связан с работами сотрудников Института экологических проблем Севера УрО РАН (с 2001 по 2007 г.). В этот период были проведены промеры глубин 16 озер Большого Соловецкого острова (Красное, Валдай, Щучье, Большое Карзино, Плотничье, Круглое Орлово, Средний Перт, Питьевое, Святое и др.). Для определения гидро-

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 22-27-20144 “Сукцессионные процессы при переходе лимнической экосистемы от морской к континентальной с учетом воздействия природных и антропогенных факторов (на примере водоемов Большого Соловецкого острова”).

химических особенностей внутренних водоемов на семи озерах (Щучье, Большое Карзино, Плотище, Круглое Орлово, Средний Перт, нижний Перт, Святое) были отобраны смешанные пробы воды из верхнего слоя. Изученные озера имели слабокислую реакцию среды, содержание в них соединений фосфора, железа, тяжелых металлов было $\leq$ ПДК [16]. В настоящее время с появлением новых приборных методов отбора и определения гидрохимических показателей достоверность полученных результатов повышается. В июле 2020 г. были проведены рекогносцировочные исследования трех озер Большого Соловецкого острова (Святого, Питьевого и Среднего Порта). Отбор проб осуществлялся на 18 выбранных участках этих трех озер только из поверхностного и придонного слоев. Воды исследованных озер отнесены к категории ультрапресных с очень низкой минерализацией и жесткостью. На ионном составе сказывалось островное положение водоемов. В воде всех исследованных озер были превышены ПДК по железу (в 1.5–2.0 раза) и также норматив по цветности (в 2–5 раз), что связано с естественными причинами – заболоченностью водосборных площадей [20].

Целью данного исследования было проведение комплексных гидрохимических исследований нескольких озер Большого Соловецкого острова и оценка их экологического состояния.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования были выбраны девять озер, расположенных на территории Большого Соловецкого острова: Лесное (Исаковское), Большое Куможье, Варваринское, Святое, Средний Перт, Питьево, Биосадское (Игуменское), Банное (рис. 1). Водоемы отличались удаленностью от моря и наличием возможной антропогенной нагрузки (озера Банное и Святое находятся на территории пос. Соловецкого). У каждого из них есть сток воды либо в соседнее озеро, либо непосредственно в море. Часть озер относится к озерно-канальной системе: Святое, Банное, Питьево, Средний Перт; другие – Лесное, Большое Куможье, Варваринское, Биосадское – образуют малые озерные системы; только оз. Нижний Перт в настоящее время является обособленным водоемом.

Визуальный осмотр возможных источников антропогенного воздействия на исследуемые озера дал следующие результаты. Для озер Питьевого и Средний Перт таковыми могли быть прогулки на гребных лодках (рекреационная нагрузка); для оз. Нижний Перт – расположение на его берегу Ботанического сада и купание местных жителей и туристов; для оз. Большое Куможье – рыбная ловля на удочку (нагрузка минимальна); для оз. Лесного (Игуменского) – расположение на берегу Исаковского скита; для оз. Банного – вторичное загрязнение от донных отложений (наличие на его берегах водорослевого комбината (в настоящее время не действует) и муниципальной бани) и поступление вод со взлетно-посадочной полосы; для оз. Биосадского – сток вод со взлетно-посадочной полосы; для Святого – поступление вод с этого же объекта посредством Питьевого канала, а также нагрузка со стороны жителей пос. Соловецкого и гостиничного комплекса. В оз. Святом отмечено купание жителей и туристов, а также крупного рогатого скота и собак. На южном берегу водоема расположена дизельная электростанция, обеспечивающая электроэнергией все объекты поселка, и резервуары с топливом для ее функционирования. На оз. Варваринском ан-

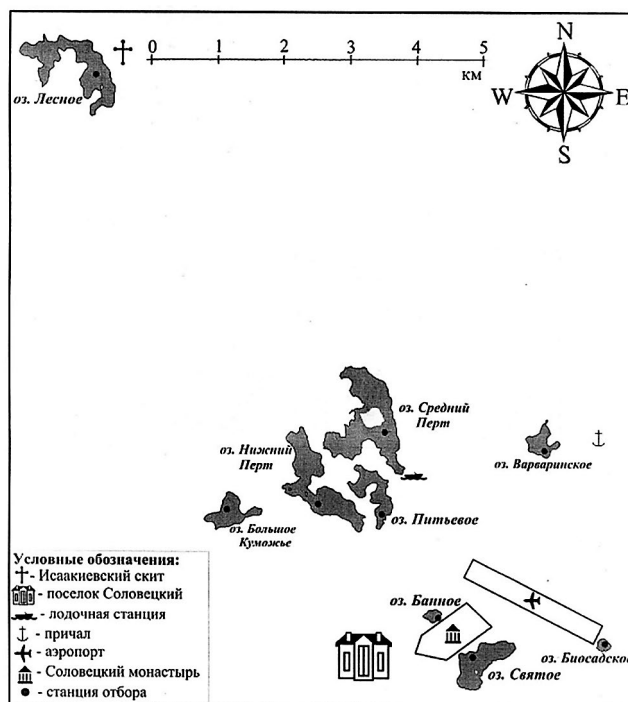


Рис. 1. Картограмма территории расположения объектов исследования и станций отбора проб.

Таблица 1. Некоторые морфометрические характеристики исследуемых озер

Озеро	Координаты станций, град.		Длина, м	Ширина, м	Площадь, км ²	Глубина макс, м	Высота над уровнем моря, м
	с.ш.	в.д.					
Банное	65.03007	35.70633	239	164	0.026	2.2	4
Биосадское	65.02717	35.75161	189	140	0.021	9.0	18
Большое Куможье	65.04244	35.64893	749	430	0.141	8.8	11
Варваринское	65.04920	35.73495	500	280	0.094	9.0	9
Лесное	65.09282	35.61352	1661	585	0.439	23.0	4
Нижний Перт	65.04308	35.67365	1727	378	0.423	14.0	14
Питьевое	65.04195	35.69098	980	400	0.174	10.0	17
Святое	65.02560	35.71560	880	380	0.230	10.1	7
Средний Перт	65.05122	35.69176	1510	930	0.586	14.3/7.5*	17

*Числитель — максимальная глубина, знаменатель — глубина станции отбора.

тропогенное воздействие минимально — рыбная ловля на удочку, жилых строений на берегах не обнаружено.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования озер в июле 2022 г. начались с промерных работ. Их проводили на надувной гребной лодке с использованием комплекса эхолот “Garmin Fishfinder 140” и GPS-навигатора “Garmin Etrex 10” с параллельной фиксацией координат и глубины водоема в конкретной точке. Для всех озер были определены глубоководные участки (в случае обнаружения нескольких ям в озере выбирался участок на наибольшем расстоянии от втекающих или вытекающих ручьев и каналов), на которых в дальнейшем проводились исследования. На основе этих измерений и анализа топографических карт, спутниковых снимков Яндекс-Карт, расчета площадей озер с помощью программы Surfer получены характеристики, представленные в табл. 1.

Более детальная батиметрическая съемка сделана для двух озер — Святого и Нижний Перт (рис. 2, 3). Промеры глубин выполнялись с помощью эхолота “Humminbird GPS-Fishfinder 363”. Точность определения местоположения в зависимости от открытости местности менялась от 5–6 до 7–8 м. Ошибки измерения оценивались по пересекающимся галсам и учитывались при камеральной обработке. Измеренные данные подвергались критическому анализу, контролю

на выбросы и при необходимости — фильтрационному сглаживанию.

Измерены содержание кислорода и температура с помощью портативного оксиметра “HQ30D.99 Hach Lange” с люминесцентным датчиком и кабелем до 30 м. На основе этих данных определены горизонты отбора проб воды с помощью горизонтальных поликарбонатных батометров на 2 и 5 л в соответствии с ГОСТ [3]. В случае необходимости применялась консервация образцов. Они доставлялись в полевую лабораторию в пос. Соловецкий и стационарную в г. Архангельск с соблюдением сроков и способов хранения. Измерены *in situ* значения pH (pH-метр “HI 83141 Hanna”) и электропроводность (кондуктометр “HI 8733 Hanna”).

В условиях экспедиционной и стационарных лабораторий с применением стандартных и апробированных методик фотометрически определены следующие характеристики: цветность по хром-кобальтовой шкале на спектрофотометре “Unico 1201” [1]; содержания биогенных элементов (аммония, нитритов, нитратов, фосфатов, кремния) согласно [18], железа и марганца (фотометрически и методом атомно-абсорбционной спектроскопии (спектрометр “NovAA-315 SA”)), сероводорода [17]; ионный состав (хлорид, сульфат, натрий, калий, кальций, магний) на жидкостном хроматографе “LC-20 Prominence”; щелочность; содержание гидрокарбонатов [2], органического углерода (анализатор “TOC-Lcsp”), тяжелых металлов (спектрометр “NovAA-315 SA”).

Минерализация (мг/л) воды рассчитана сложением концентраций ионов [5, 6, 28]. Для определения класса воды проведен перерасчет концентраций в единицы мг-экв/л для каждого иона, рассчитано их процентное соотношение [22, 29]. Жесткость определялась сложением эквивалентных концентраций ионов кальция и магния.

В виду неоднородности выборки полученных результатов по измеренным параметрам, содержанию компонентов в воде в качестве

усредненного значения приводились медианные значения величин, рассчитанные с помощью программы Excel. Коэффициент корреляции r^2 оценивали по методу Спирмена (статистически значимо при $p < 0.05$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изученные авторами настоящей статьи озера можно отнести по классификации П.В. Иванова [7] к следующим категориям по их площади (км²): озерки (0.01–0.1) — Биосадское (0.02) < Банное (0.03); очень малые озера (0.1–1) — Варваринское (0.09) < Большое Куможье (0.14) < Питьевое (0.17) < Святое (0.23) < Нижний Перт (0.42) < Лесное (0.44) < Средний Перт (0.59). По максимальной глубине (м) озера классифицируют так: с очень малой глубиной (<3.12) — Банное (2.2); средней (6.25–12.5) — Большое Куможье (8.8) < Варваринское (9.0) < Биосадское (9.0) < Питьевое (10) < Святое (10.1); повышенной (12.5–25) — Нижний Перт (14.0) < Средний Перт (14.3) < Лесное (23.0). Сопоставляя максимальную глубину с площадью озера, можно отметить увеличение глубины с возрастанием площади [7]. Глубина и площадь водоема связаны с происхождением котловины — ледникового или ледниково-тектонического. Ярусность расположения водоемов (табл. 1) обусловлена постледниковым поднятием острова на несколько миллиметров в год [13].

По классификации в [7, 23, 26] воды исследованных озер по усредненным величинам минерализации в период летней стратификации отнесены к категориям: ультрапресные (<100 мг/л) — Биосадское (19) < Средний Перт (28) = Питьевое (28) < Святое (33) < Большое Куможье (36) < Нижний Перт (38) < Банное (39), пресные (100–500 мг/л) — Лесное (102) < Варваринское (115). При этом изменения электропроводности и минерализации вод для озер были невелики, за исключением озер Варваринского и Лесного. Для одних озер (Святое, Банное, Варваринское, Лесное) электропроводность вод увеличивается от поверхности к придонным слоям, а для других (Питьевое, Средний и Нижний Перт) отмечена противоположная тенденция. В водной толще озер Большое Куможье и Биосадское средние слои воды

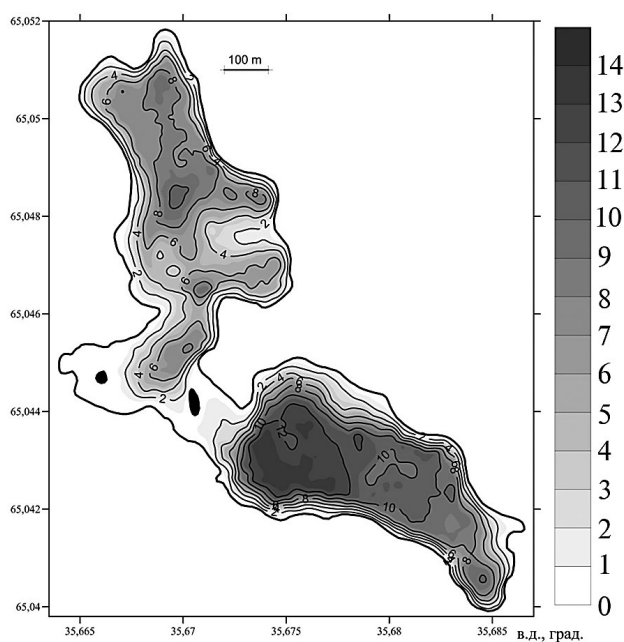


Рис. 2. Батиметрическая карта оз. Нижний Перт.

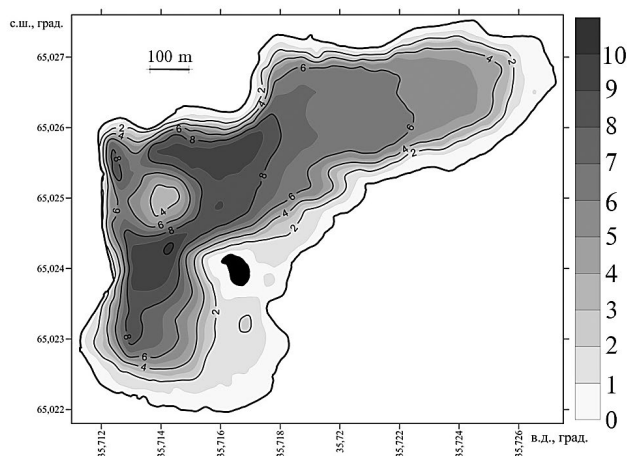


Рис. 3. Батиметрическая карта оз. Святого.

Таблица 2. Концентрация основных ионов в воде исследуемых озер, Белого моря и дождевых осадков (числитель – среднее значение (медиана), знаменатель – минимальное-максимальное значения; %-экв рассчитан от суммы анионов и катионов раздельно)

Озеро	Единицы измерения	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+
Банное	мг/л	<u>12.20</u> 11.59–12.81	<u>8.64</u> 8.57–8.72	<u>4.80</u> 4.70–4.89	<u>6.57</u> 6.51–6.63	<u>3.98</u> 3.90–4.05	<u>1.88</u> 1.86–1.91	<u>0.74</u> 0.72–0.77
	%-экв	<u>36.78</u> 35.63–12.81	<u>44.82</u> 44.37–45.27	<u>18.40</u> 17.69–19.10	<u>43.21</u> 43.05–43.44	<u>30.08</u> 29.93–33.28	<u>23.78</u> 23.78–23.79	<u>2.90</u> 2.83–2.95
Биосадское	мг/л	<u>0.61</u> 0.61–1.22	<u>7.72</u> 5.72–8.17	<u>2.92</u> 1.93–3.61	<u>5.20</u> 5.14–5.49	<u>1.88</u> 1.00–1.80	<u>1.12</u> 1.02–1.33	<u>0.29</u> 0.25–0.30
	%-экв	<u>4.00</u> 3.34–6.44	<u>75.40</u> 69.33–76.84	<u>20.60</u> 19.03–24.23	<u>59.30</u> 51.92–61.68	<u>15.20</u> 12.92–20.75	<u>23.70</u> 23.36–25.55	<u>1.80</u> 1.76–1.92
Большое Куможье	мг/л	<u>10.98</u> 9.76–10.98	<u>9.34</u> 9.28–9.70	<u>2.19</u> 2.17–2.21	<u>8.14</u> 7.86–8.20	<u>3.34</u> 3.15–3.40	<u>1.88</u> 1.82–1.93	<u>0.54</u> 0.49–0.56
	%-экв	<u>36.45</u> 34.10–36.99	<u>54.25</u> 53.72–56.08	<u>9.30</u> 9.18–9.81	<u>51.14</u> 50.18–52.16	<u>24.07</u> 23.33–24.96	<u>22.78</u> 22.46–23.05	<u>2.00</u> 1.85–2.07
Варваринское	мг/л	<u>35.68</u> 32.33–60.39	<u>38.25</u> 36.80–45.00	<u>1.94</u> 0.86–2.20	<u>29.93</u> 28.96–33.30	<u>4.85</u> 4.14–10.64	<u>3.34</u> 3.29–4.16	<u>1.68</u> 1.61–1.86
	%-экв	<u>34.72</u> 32.02–43.51	<u>62.87</u> 55.71–65.21	<u>2.41</u> 0.79–2.77	<u>69.40</u> 60.98–71.44	<u>13.25</u> 11.18–22.41	<u>15.05</u> 14.60–15.18	<u>2.30</u> 2.01–2.38
Лесное	мг/л	<u>20.74</u> 18.91–26.84	<u>40.21</u> 32.25–56.20	<u>3.96</u> 3.68–4.21	<u>25.35</u> 21.32–37.04	<u>6.08</u> 5.59–6.67	<u>4.20</u> 3.71–4.99	<u>1.34</u> 1.12–1.75
	%-экв	<u>21.88</u> 20.85–24.39	<u>72.82</u> 69.76–75.00	<u>5.30</u> 4.16–5.97	<u>61.56</u> 59.86–66.97	<u>16.99</u> 13.87–18.16	<u>19.56</u> 17.29–20.02	<u>1.89</u> 1.81–2.03
Нижний Перт	мг/л	<u>10.98</u> 10.98–10.98	<u>10.27</u> 10.11–10.37	<u>2.94</u> 2.82–3.11	<u>7.96</u> 7.79–8.00	<u>3.36</u> 3.29–3.39	<u>1.86</u> 1.86–1.91	<u>0.67</u> 0.66–0.77
	%-экв	<u>33.92</u> 33.54–34.38	<u>54.49</u> 54.31–54.79	<u>11.52</u> 11.22–12.07	<u>50.32</u> 49.48–50.81	<u>24.45</u> 24.03–24.76	<u>22.68</u> 22.53–23.25	<u>2.55</u> 2.47–2.85
Питьевое	мг/л	<u>6.10</u> 6.10–6.10	<u>8.02</u> 3.72–8.16	<u>3.66</u> 1.83–3.91	<u>5.97</u> 3.04–6.30	<u>2.46</u> 1.39–2.52	<u>1.55</u> 0.81–1.60	<u>0.54</u> 0.44–0.63
	%-экв	<u>24.99</u> 24.51–41.17	<u>56.23</u> 43.14–56.60	<u>18.78</u> 15.69–19.97	<u>49.38</u> 47.13–49.86	<u>23.40</u> 22.93–24.78	<u>24.39</u> 24.07–24.64	<u>2.83</u> 2.38–4.02
Святое	мг/л	<u>6.71</u> 6.71–7.32	<u>8.16</u> 7.93–8.32	<u>5.52</u> 5.17–5.98	<u>6.00</u> 5.96–6.10	<u>4.00</u> 3.78–4.38	<u>1.79</u> 1.71–1.86	<u>0.83</u> 0.78–0.87
	%-экв	<u>24.90</u> 24.16–25.22	<u>50.40</u> 48.60–51.84	<u>24.96</u> 23.83–26.77	<u>41.38</u> 39.85–42.69	<u>31.76</u> 30.50–33.28	<u>23.53</u> 23.30–23.68	<u>3.33</u> 3.27–3.46
Средний Перт	мг/л	<u>6.71</u> 6.71–6.71	<u>7.81</u> 3.95–8.86	<u>3.68</u> 2.03–4.26	<u>5.88</u> 3.14–6.86	<u>2.45</u> 1.58–2.65	<u>0.85</u> 0.82–1.66	<u>0.59</u> 0.39–0.66
	%-экв	<u>27.05</u> 24.54–41.74	<u>54.10</u> 42.22–55.67	<u>18.85</u> 16.05–19.80	<u>50.90</u> 46.07–55.38	<u>26.54</u> 22.61–26.66	<u>23.60</u> 14.80–23.90	<u>3.28</u> 2.89–3.37
Белое море	мг/л	<u>101</u>	<u>13890</u>	<u>1900</u>	<u>7455</u>	<u>501</u>	<u>1115</u>	<u>240</u>
	%-экв	<u>0.38</u>	<u>90.47</u>	<u>9.15</u>	<u>72.29</u>	<u>5.59</u>	<u>20.74</u>	<u>1.38</u>
Дождевая вода (Соловки)	мг/л	<u>0.35</u>	<u>9.61</u>	<u>1.71</u>	<u>4.60</u>	<u>1.92</u>	<u>1.02</u>	<u>0.36</u>
	%-экв	<u>1.84</u>	<u>86.75</u>	<u>11.42</u>	<u>51.03</u>	<u>24.71</u>	<u>21.88</u>	<u>2.38</u>
Дождевая вода (суша)	мг/л	<u>0.75</u>	<u>0.30</u>	<u>0.55</u>	<u>0.30</u>	<u>0.49</u>	<u>0.17</u>	<u>0.06</u>
	%-экв	<u>38.18</u>	<u>26.24</u>	<u>35.58</u>	<u>24.20</u>	<u>46.01</u>	<u>26.20</u>	<u>2.89</u>

отличаются наименьшими по всей толще величинами электропроводности.

Для всех исследованных озер доминирующим анионом был хлорид-ион, доминирующим катионом — натрий (табл. 2). При этом для озер подзон северной тайги и лесотундры характерны слабоминерализованные карбонатно-кальциевые воды [7]. Таковыми были они и для исследованных водоемов северотаежной зоны на территории Архангельской области [9]. Основные источники поступления ионов — атмосферные осадки и поверхностно-грунтовые воды [4]. В дождевой, болотной и подземной водах, отобранных в районе проводимых исследований, доминирующие ионы — хлорид и натрий, что характерно для вод Белого моря, омывающего Соловецкие острова (табл. 2). Минерализация отобранной болотной воды составляла 12, подземной воды — 30, дождевой воды — 19.5 мг/л. Для сравнения была отобрана дождевая вода в окрестностях г. Архангельска, минерализация которой составила 2 мг/л, а доминирующими ионами в ней были гидрокарбонат/сульфат и кальций. При этом абсолютные концентрации хлорид-ионов в пробах этих вод отличались в 30 раз, сульфатов — незначительно — в 3 раза.

Воды всех исследованных озер относились к категории очень мягких — жесткость ≤ 1.5 ммоль/л [7] (табл. 2): Биосадское (0.15) < Средний Перт (0.17) < Питьевое (0.25) < Нижний Перт = Большое Куможье (0.32) < Святое = Банное (0.35) < Варваринское (0.52) < Лесное (0.65). Можно отметить, что на величину жесткости вод сказывалась их удаленность от моря.

Для большинства микроорганизмов оптимальные для жизнедеятельности — близкие к нейтральным среды. pH воды Соловецких озер в среднем менялось от 4.00 до 7.53. По этому показателю воды исследованных водоемов можно отнести [14] к следующим категориям: кислые (pH 3–5) — Биосадское (4.00); слабокислые (5–6.5) — Святое (5.52), Питьевое (5.79), Банное (6.00), Нижний Перт (6.10), Лесное (6.12), Большое Куможье (6.31); нейтральные (6.5–7.5) — Средний Перт; слабощелочные (7.5–8.5) — Варваринское. Во всех случаях снижение pH отмечено от поверхностных к придонным слоям воды.

Значительную часть органического вещества поверхностных вод в северных районах России составляют гуминовые и фульвовые кислоты. Гумусовые (гуминовые и фульвовые) кислоты, присутствующие в болотных водах, — источники обогащения вод ионами водорода, что приводит к снижению pH [11]. Количества же гумусовых кислот и железа определяют цветность вод. Этот показатель, в свою очередь, оказывает влияние на прозрачность вод и протекание микробиологических процессов. Исследованные озера по степени окрашенности (цветности) (град) их вод [21] относились к следующим группам: слабоокрашенные (20–39) — Нижний Перт; среднеокрашенные (40–59) — Питьевое, Средний Перт, Банное, Варваринское; темноокрашенные (100–199) — Святое, Биосадское; исключительно темноокрашенные (>200) — Большое Куможье, Лесное. Сравнивая водоемы этих градаций по гумусности (табл. 3), можно отметить, что для слабоокрашенных вод оз. Нижний Перт их цветность обуславливается в основном содержанием

Таблица 3. Классификация вод исследованных озер по гумусности

Озеро	По цветности, град [11]	По содержанию органического вещества, мг/л [10]	По содержанию общего железа, мг/л [12]
Банное	Олигомеzogумусное	Мезогумусное	Мезогумусное
Биосадское	Мезополигумусное	Мезогумусное	Мезогумусное
Большое Куможье	Полигумусное	Мезополигумусное	Полигумусное
Варваринское	Мезополигумусное	Мезогумусное	Полигумусное
Лесное	Полигумусное	Мезополигумусное	Полигумусное
Нижний Перт	Олигомеzogумусное	Мезогумусное	Ультраолигогумусное
Питьевое	Мезополигумусное	Мезогумусное	Мезогумусное
Святое	Мезополигумусное	Мезогумусное	Полигумусное
Средний Перт	Мезополигумусное	Мезогумусное	Мезогумусное

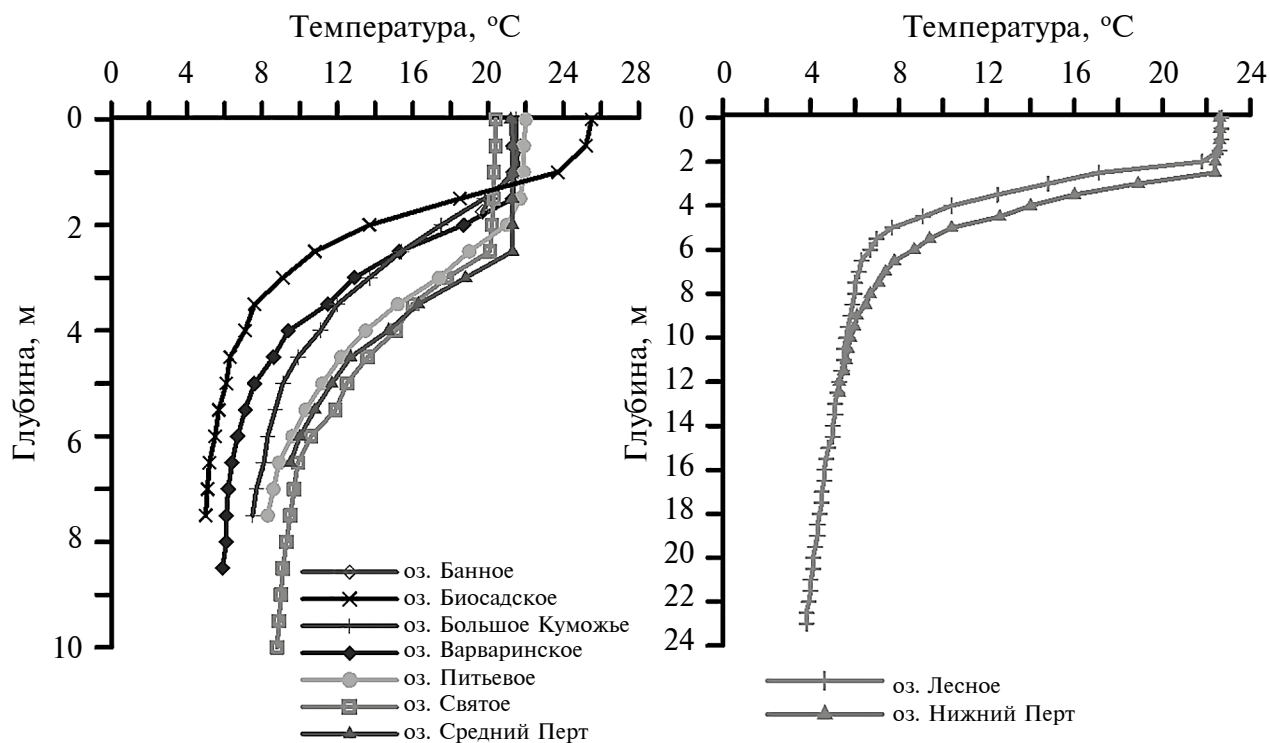


Рис. 4. Вертикальное распределение температуры в исследованных озерах Большого Соловецкого острова.

органического вещества, для самых окрашенных (озера Большое Куможье и Лесное) – значителен вклад железа; для среднеокрашенных озер, за исключением оз. Варваринского, оба показателя обуславливают их цветность.

Содержание марганца ≤ 0.02 мг/л для всех озер, кроме Святого (0.16), Большое Куможье (0.22) и Варваринское (0.22). Концентрации других тяжелых металлов, а также нефтепродуктов для всех исследованных озер не превышали нормативы.

По усредненному содержанию органического вещества (мг/л) водоемы классифицировались следующим образом [7]: с низким содержанием (7.5–15) – Нижний Перт (8) < Питьевое (8.5) < Средний Перт (8.9) < Банное (9.9) < Варваринское (12.7); средним (15–30) – Святое (16.7) < Биосадское (18.5) < Большое Куможье (27.6) < Лесное (30.0).

Температура поверхностного слоя в летний период 2022 г. для исследованных озер менялась от 20 до 25 °C (рис. 4). Из-за закрытости

лесом, особенностей котловин и глубины водоемов в них наблюдалась обратная температурная стратификация вод, за исключением оз. Банного. Для озер Лесного (высококрасочное и глубокое) и Нижний Перт (слабоокрашенное и глубокое), а также Биосадского (темноокрашенное средней глубины) ко дну наблюдалось снижение температуры до 4–5 °C. Наиболее прогретыми оставались воды оз. Банного – 19 °C. Самый большой градиент температуры отмечен для воды озер Биосадского (20 °C) и Лесного (19 °C). Для всех озер (за исключением Банного) достаточно отчетливо выражен слой термоклина, мощность которого различна. Меньше всего этот слой в озерах Святом и Средний Перт.

Содержание кислорода в поверхностном слое озерных вод в летний период составляло 8.0–9.6 мг/л (рис. 5). Пересыщение вод кислородом отмечалось для озер Варваринского, Большое Куможье и Нижний Перт. Для всех озер отмечено снижение концентрации кислорода от поверхности ко дну. В придонном слое зафиксировано значимое содержание кислорода для озер

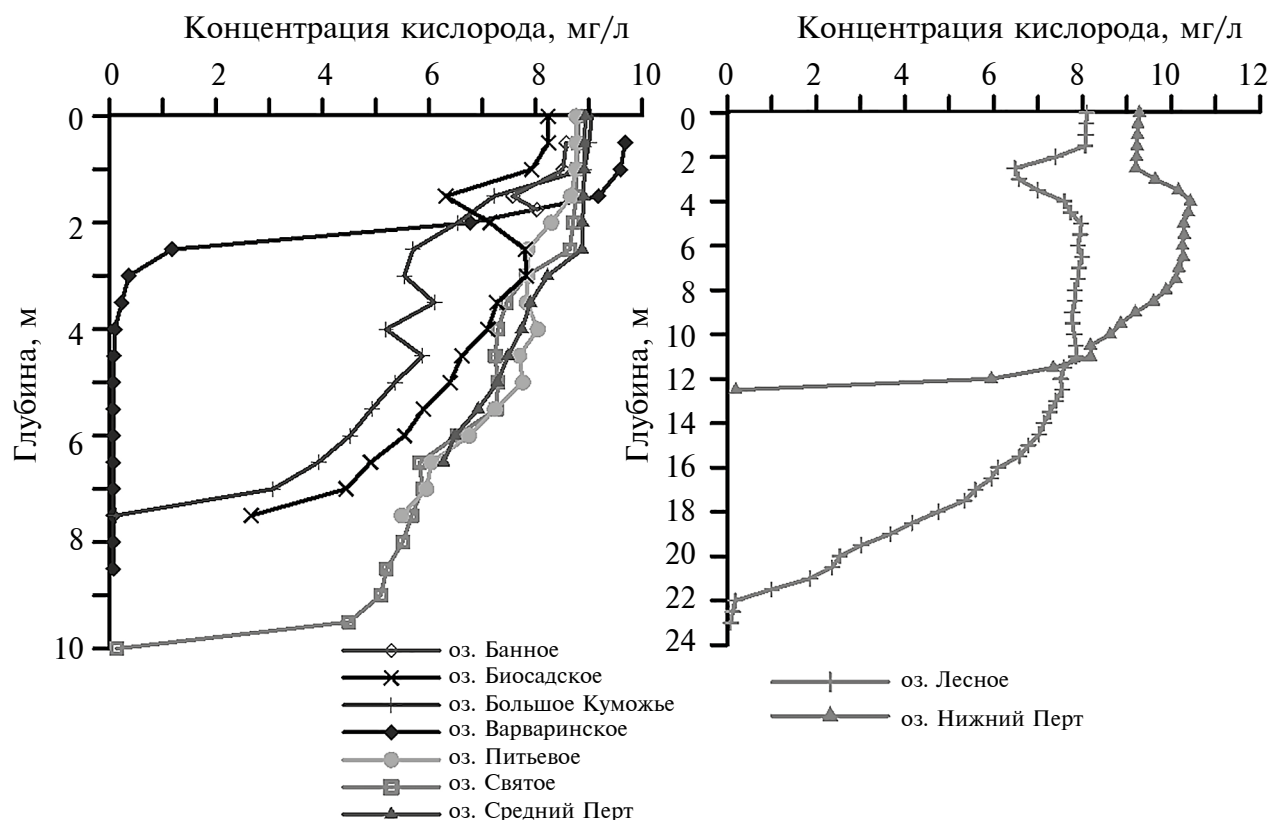


Рис. 5. Вертикальное распределение концентраций кислорода в исследованных озерах Большого Соловецкого острова.

Банного (8) (малой глубины), Средний Перт (6.3), Питьевого (5.5 мг/л) (проточность, озерно-канальная система) и немного меньшее для оз. Биосадского (2.6 мг/л). Полное исчерпание кислорода в придонном горизонте отмечено для озера Лесного, Нижний Перт, Большое Куможье и Святого. Только для оз. Варваринского выявлено наличие границы аэробно-анаэробных условий на горизонте 3 м.

При небольших концентрациях сульфатов в воде исследуемых водоемов в целом содержание сульфидов >5 мкг/л (ПДК для рыбохозяйственных водоемов) [15] выявлено в водах озера Святого (12), Большое Куможье, Лесном (21) и Варваринском (до 376 мкг/л в анаэробной зоне), что свидетельствует о процессе сульфатредукции в них [25].

Исследованные озера также различались по щелочности и содержанию гидрокарбонатов (табл. 2): для оз. Биосадского эти показатели стремились к нулю, были близки для

вод озера Питьевого, Средний Перт, Святого (0.10–0.11 ммоль/л и 6.1–6.7 мг/л соответственно); Нижний Перт, Банного, Большое Куможье (0.18–0.19 ммоль/л и 11–11.5 мг/л); наибольшие значения этих показателей отмечены для озера Лесного (0.32–0.40 ммоль/л и 19.5–24.4 мг/л) и Варваринского (0.53–0.99 ммоль/л и 32–60 мг/л).

Содержание биогенных элементов – один из основных показателей трофических условий в озере. Содержание кремния определяется степенью выветривания из кремнийсодержащих пород и минералов – наибольшим его количество было в водах оз. Лесного (табл. 4). Из соединений минерального азота в водах всех исследованных озера, за исключением оз. Варваринского, преобладающими были нитраты. Минимальные их количества отмечены для воды оз. Святого, что связано с потреблением их фитопланктоном, а максимальные – в оз. Средний Перт. Значительный вклад органической составляющей в общее количество сое-

Таблица 4. Концентрация биогенных элементов в воде исследуемых озер (числитель – среднее значение (медиана), знаменатель – значение в поверхностном–придонном слоях)

Озеро	$P_{\text{мин}}$, мкг/л	$P_{\text{вал}}$, мкг/л	$N-NO_2$, мкг/л	$N-NO_3$, мкг/л	$N-NH_4$, мкг/л	$N_{\text{вал}}$, мкг/л	Si, мкг/л
Банное	<u>30.78</u> 26.05–35.52	<u>35.65</u> 22.15–38.65	<u>3.11</u> 3.14–3.08	<u>118.40</u> 119.8–117.0	<u>21.55</u> 20.87–22.23	<u>334.1</u> 370.0–298.3	<u>1090</u> 1116–1065
Биосадское	<u>5.47</u> 1.48–17.17	<u>5.48</u> 8.55–15.50	<u>5.16</u> 4.59–7.34	<u>82.60</u> 66.40–97.00	<u>33.44</u> 21.84–67.67	<u>347.4</u> 237.0–528.4	<u>844</u> 503–1887
Большое Куможье	<u>32.86</u> 13.62–75.18	<u>49.24</u> 24.76–76.72	<u>8.12*</u> 8.23–9.91	<u>89.45</u> 79.70–134.3	<u>36.08</u> 28.28–98.28	<u>566.2*</u> 508.3–558.1	<u>2101</u> 781–3420
Варваринское	<u>89.45</u> 7.40–686.1	<u>92.40</u> 34.78–750.0	<u>4.48</u> 2.41–8.12	<u>144.8</u> 11.70–163.1	<u>321</u> 25.16–2726	<u>601.5</u> 382.8–2900	<u>1297</u> 161–3097
Лесное	<u>44.26</u> 13.62–108.6	<u>73.74</u> 44.25–108.2	<u>8.46</u> 8.00–13.80	<u>165.8</u> 110.1–266.5	<u>35.98</u> 23.20–138.5	<u>622.7**</u> 629.5–945.5	<u>3528</u> 2365–4436
Нижний Перт	<u>1.04</u> 0.30–1.78	<u>27.34</u> 24.66–35.78	<u>0.98</u> 0.73–1.23	<u>109.6</u> 109.5–137.4	<u>30.62</u> 18.92–40.17	<u>283.0</u> 228.4–324.2	<u>844</u> 684–1007
Питьевое	<u>2.07</u> 2.66–2.96	<u>29.81</u> 21.86–66.02	<u>1.32</u> 1.23–1.90	<u>116.8</u> 116.8–119.6	<u>27.45</u> 19.10–46.60	<u>225.8</u> 208.4–221.1	<u>1120</u> 1118–1340
Святое	<u>13.92</u> 5.03–49.43	<u>34.14</u> 26.69–54.25	<u>4.17</u> 3.36–7.84	<u>77.30</u> 72.20–90.20	<u>33.70</u> 22.80–141.5	<u>396.5</u> 362.3–480.4	<u>1747</u> 1094–2500
Средний Перт	<u>1.78</u> 1.78–1.78	<u>18.98</u> 34.62–9.64	<u>7.17</u> 5.15–8.40	<u>132.5</u> 132.5–187.5	<u>25.70</u> 18.70–30.00	<u>350.1</u> 477.1–350.0	<u>1224</u> 1224–1563

*Медиана не попадает в интервал для поверхностного и придонного слоев из-за содержания элементов в срединных слоях воды.

Таблица 5. Классификация вод исследованных озер по трофности [7, 8, 24, 30, 31, 33, 34]

Озеро	Классификация		
	по содержанию общего азота, мкг/л	по содержанию общего фосфора, мкг/л	по прозрачности воды, м
Банное	Олиготрофное	Олиготрофное	Мезотрофное
Биосадское*	Олиготрофное	Олиготрофное	Эвтрофное
Большое Куможье	Мезотрофное	Эвтрофное	Эвтрофное
Варваринское	Эвтрофное	Гиперэвтрофное	Эвтрофное
Лесное	Мезотрофное	Эвтрофное	Эвтрофное
Нижний Перт	Ультраолиготрофное	Олиготрофное	Олиготрофное
Питьевое	Ультраолиготрофное	Олиготрофное	Мезотрофное
Святое	Олиготрофное	Мезотрофное	Мезотрофное
Средний Перт	Олиготрофное	Олиготрофное	Мезотрофное

*По использованным классификациям выделены только три категории (олиго-, мезо- и эвтрофный водоем). Озеро по остальным критериям – дистрофное.

динений азота был в основном отмечен для вод гумифицированных водоемов с высокой цветностью воды. Накопление аммонийной формы азота зафиксировано в озерах Варваринском (до 2700 мкг/л), Лесном и Святом в анаэробных условиях. Это можно объяснить активными процессами минерализации органического вещества и отсутствием окисления аммония в бескислородных слоях. На основе полученных данных была проведена классификация исследуемых водоемов по трофности (табл. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Атмосферные осадки, грунтово-подземные и озерные воды на территории Большого Соловецкого острова отнесены к категории хлоридно-натриевых, что подтверждает значительное влияние морского окружения. При этом по жесткости озерные воды не выходили за границы “мягких”, бóльший вклад в эту величину вносили ионы кальция, что говорит об утрате к настоящему времени непосредствен-

ной взаимосвязи изучаемых озер с Белым морем.

В исследованных проточных водоемах озерно-канальной системы кислород сохранялся до дна; исключение — оз. Святое, где к придонным слоям отмечено его полное исчерпание. Исчезновение кислорода в придонных слоях воды было характерно для водоемов, не связанных каналами. Значительная бескислородная зона зафиксирована для оз. Варваринского. Продукты анаэробных процессов деструкции органического вещества выявлены в водоемах с бескислородными слоями.

За исключением оз. Нижний Перт с почти бесцветной водой, окраска воды в водоемах, отнесенных к категории средне- и темноокрашенных, в связи с заболоченностью острова была обусловлена в большей степени наличием гумусовых кислот, для высокоцветных водоемов дополнительный вклад в этот показатель вносило железо. Несмотря на разную цветность, для всех исследуемых озер характерно низкое и среднее содержание органического вещества.

Все исследуемые водоемы со средней цветностью воды отнесены к мезотрофным, по мере усиления окраски увеличивался и трофический статус вплоть до эвтрофного. Олиготрофное — только оз. Нижний Перт. Исходя из таких показателей, как минерализация, содержание органического вещества и биогенных элементов, оз. Биосадское на момент исследований отнесено к дистрофным водоемам. Варваринское озеро отнесено к гиперэвтрофным. Уровень трофии исследуемых водоемов обусловлен в основном естественным развитием озер и особенностями их водосборов, а не антропогенным воздействием. Для оз. Варваринского статус обусловлен наличием плотностной стратификации, предположительно, из-за наименьшего времени его отделения от моря, а также его морфометрическими особенностями (небольшая площадь зеркала и глубина ~9 м).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 31868-2012. Вода. Методы определения цветности. М.: Стандартинформ, 2019. 12 с.
2. ГОСТ 31957-2012. Вода. Методы определения щелочности и массовой концентрации карбонатов и гидрокарбонатов. М.: Стандартинформ, 2013. 30 с.
3. ГОСТ Р 59024-2020. Вода. Общие требования к отбору проб. Национальный стандарт Российской Федерации. Дата введения 2022-06-01. М.: Росин-т стандартизации, 2023. 57 с.
4. Грицевская Г.Л., Кябелева Г.К., Николаева Л.А., Семенов В.Н. Гидрология и гидрохимия Соловецких озер // Соловецкие острова. Материалы по комплексному изучению озер. Тр. СевНИОРХ. Т. 6. Петрозаводск: Изд-во Карелия, 1972. С. 5–44.
5. Жинжакова Л.З., Чередник Е.А. Ионный состав поверхностных вод Кабардино-Балкарского государственного заповедника в период летнего интенсивного таяния ледников // Chronos. 2022. Т. 7. № 10 (72). С. 87–91.
6. Загорюлько Н.А. Особенности основного ионного состава поверхностных вод бассейна р. Куды // Вестн. ИрГТУ. 2014. № 2 (85). С. 61–67.
7. Китаев С.П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КарНЦ, 2007. 395 с.
8. Китаев С.П. Характеристика экологического фона жизни рыб озер Балтийского Кристаллического щита: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск: ПетрГУ, 1970. 28 с.
9. Кокрятская Н.М., Чупаков А.В., Титова К.В., Чупакова А.А., Забелина С.А., Морева О.Ю., Неверова Н.В., Жибарева Т.А. Гидролого-гидрохимические характеристики меромиктического железо-марганцевого пресноводного озера Светлое (Архангельская область) // Журн. Сиб. федерал. ун-та. Сер. биология. 2019. Т. 12. № 2. С. 147–159. DOI: 10.17516/1997-1389-0036
10. Лозовик П.А. Геохимическая классификация поверхностных вод гумидной зоны на основе их кислотноосновного равновесия // Вод. ресурсы. 2013. Т. 40. № 6. С. 583–592. DOI: 10.7868/S0321059613060072
11. Лозовик П.А., Сабылина А.В., Коваленко В.Н. и др. Гидрохимическая характеристика малых озер Карелии // Антропогенные изменения экосистем малых озер (причины, последствия, возможность управления). СПб.: Гидрометеиздат, 1991. Кн. 1. С. 34–37.
12. Лозовик П.А., Шкиперова О.Ф., Зобков М.Б., Платонов А.В. Геохимические особенности поверхностных вод Карелии и их классификация по химическим показателям // Тр. КарНЦ РАН. 2006. № 9. С. 130–143.

13. *Натытник А.А., Никишин Н.А.* Озерно-канальные водохозяйственные системы Соловецких островов – памятники истории и культуры в гидросфере // Изучение памятников истории и культуры в гидросфере. 1990. Вып. 1. С. 124–140.
14. *Никаноров А.М.* Гидрохимия: Учебник. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 444 с.
15. Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 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”. (Рег. Минюст России 13.01.2017 № 45203). М.: Минсельхоз, 2016. 91 с.
16. Природная среда Соловецкого архипелага в условиях меняющегося климата / Под ред. *Ю.Г. Шварцмана, И.Н. Болотова*. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 184 с.
17. РД 52.24.450-2010. Массовая концентрация сероводорода и сульфидов в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с N,N-диметил-п-фенилендиамином. Ростов н/Д: Росгидромет, 2010. 50 с.
18. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана. М.: ВНИРО, 2003. 202 с.
19. *Субетто Д.А., Шевченко В.П., Лудикова А.В., Кузнецов Д.Д., Сапелко Т.В., Лисицын А.П., Евзеров В.Я., Ван Беек П., Суо М., Субетто Г.Д.* Хронология изоляции озер Соловецкого архипелага и скорости современного озерного осадконакопления // ДАН. 2012. Геология. Т. 446. № 2. С. 183–190.
20. *Титова К.В., Жибарева Т.А., Морева О.Ю., Собко Е.И., Слобода А.А., Попов С.С., Прилуцкая Н.С.* Гидрохимические и гидробиологические исследования озер Большого Соловецкого острова // Успехи современного естествознания. 2020. № 11. С. 125–131.
21. *Фортунатов М.А.* Цветность и прозрачность воды Рыбинского водохранилища как показатель его режима // Тр. Ин-та биологии водохранилищ АН СССР. 1959. Вып. 2 (25). С. 246–357.
22. *Хатчинсон Д.* Лимнология: Географические, физические и химические характеристики озер / Пер. с англ. *Г.В. Цыцарина и Г.Г. Шинкар.* М.: Прогресс, 1969. 592 с.
23. *Atabieva F.A., Vishnevetskaya E.V.* Variability of mineralization of the rivers of the central Caucasus // Int. Applied Fundamental. Res. 2022. № 7. P. 13–16. doi:10.17513/mjpf.13406
24. *Carlson R.E.* A Trophic State Index for Lakes // Limnol. Oceanogr. 1977. V. 22. № 2. P. 361–369. doi:10.4319/lo.1977.22.2.0361
25. *Fedorov Y.A., Mikhailenko A.V., Dotsenko I.V.* Sulfide sulfur in water objects with different mineralization // Water Resour. 2019. V. 46. № 2. P. 59–64. doi: 10.1134/S0097807819080086
26. *Ferreira-Pego C., Babio N., Maraver F., Vitoria I., Salas-Salvado J.* Water mineralization and its importance for health // Nutri Salud. 2016. V. 23. № 1. P. 4–18.
27. Global drinking water quality index development and sensitivity analysis report. Ontario: United Nations Environ. Programme, GEMS/Water, 2007. 60 p.
28. *Kondakova O.V., Savkin V.M., Dvurechenskaya S.Y., Marusin K.V.* Water balance and patterns of mineralization of closed lake Chany // Geogr. Natural Resour. 2020. V. 41. № 1. P. 51–58. doi: 10.1134/S1875372820010072
29. *Pavlov V.E., Sorokovikova L.M., Tomberg I.V., Khvostov I.V.* Fifty-year variations in water ionic composition in small tributaries of the southern Baikal // Water Resour. 2014. V. 41. № 5. P. 553–555. doi: 10.1134/S009780781405008X
30. *Razumovsky V.L.* Assessment of long-term changes in the trophic status of two reservoirs // IOP Conf. Ser.: earth and environmental science: the VIII all-Russian scientific-practical conference with international participation “Modern problems of reservoirs and their catchments”. Perm, 2021. Article number 012040. doi: 10.1088/1755-1315/834/1/012040
31. *Rivera C.A., Zapata A., Villamil W., Leon-Lipez N.* Trophic assessment of four tropical reservoirs using phytoplankton genera // Acta Limnologica Brasiliensia. 2022. V. 34. e26. <https://doi.org/10.1590/S2179-975X11820>
32. UN Environment Programme. <https://www.unenvironment.org/> (дата обращения: 15.03.2023)
33. *Vidovic M.* Assessment of the Trophic Status by Monitoring of Reservoir’s Water Quality // J. Water Resour. Protection. 2015. № 7. P. 1–13. doi:10.4236/jwarp.2015.71001
34. *Xinyi F., Yihong Y., Lin M., Xiaoying L., Zhehui H., Jiajie L., Liu L., Fushun W.* Coupling effects of hydrological characteristics and nutrient load in sediments on the trophic state of reservoirs // Acta Geochimica. 2021. V. 4. № 4. P. 640–649. doi:10.1007/s11631-021-00478-y