

УДК 556:504.455
DOI 10.17513/use.38120

БИОГЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В РАЗНОТИПНЫХ ОЗЕРАХ БОРЕАЛЬНОЙ ЗОНЫ

Чупакова А.А., Прасолов С.Д., Морева О.Ю., Прилуцкая Н.С.

*ФГБУН Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
имени Н.П. Лаврова Уральского отделения Российской академии наук, Архангельск,
e-mail: anna.a.ershova@gmail.com*

Повышенное содержание биогенных элементов (основными из которых являются азот и фосфор) в водоеме приводит к его эвтрофикации, что ведет к ухудшению качества воды, ее природных свойств и может привести к токсическому эффекту. В первую очередь это проявляется в озерах, так как замедленный водообмен способствует накоплению в водной толще биогенных веществ. В работе представлены данные по содержанию биогенных элементов (растворенных минеральных (аммонийный, нитритный и нитратный азот) и общих форм азота, фосфатов и общего фосфора) и трофический статус ненарушенных озер бореальной зоны с широким диапазоном морфометрических и гидролого-гидрохимических характеристик, что позволяет рассматривать полученные результаты в качестве репрезентативной характеристики озерных экосистем обширной территории северной тайги. Результаты показали, что, несмотря на широкий диапазон различных гидролого-гидрохимических характеристик, по биогенным элементам озера отнесены всего лишь к двум типам: к олиготрофному и дистрофному (исключением являются гиперэвтрофные анаэробные зоны меромиктических оз. Светлое и Темное). Вероятно, это наиболее распространенные статусы для бореальных не подверженных прямому антропогенному воздействию озер.

Ключевые слова: Архангельская область, озера, биогенные элементы, азот, фосфор, трофический статус

Исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ, проект № 22-27-00828 «Оценка эмиссии углерода ($CH_4 + CO_2$) с поверхности внутренних водоемов Европейского Севера России», <http://rscf.ru/project/22-27-00828/>.

BIOGENIC ELEMENTS OF DIFFERENT LAKE TYPES IN THE BOREAL ZONE

Chupakova A.A., Prasolov S.D., Moreva O.Yu., Prilutskaya N.S.

*Federal Center for Integrated Arctic Research named after N.P. Laverov, Ural branch
of the Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, e-mail: anna.a.ershova@gmail.com*

An increased content of nutrients (the main ones being nitrogen and phosphorus) in a reservoir leads to its eutrophication, which leads to a deterioration in the quality of water, its natural properties and can lead to a toxic effect. This is primarily manifested in lakes, since slow water exchange contributes to the accumulation of nutrients in the water column. The work presents data on the content of nutrients (dissolved mineral (ammonium, nitrite and nitrate nitrogen) and total forms of nitrogen, phosphates and total phosphorus) and the trophic status of undisturbed lakes of the boreal zone with a wide range of morphometric and hydrological-hydrochemical characteristics, which allows us to consider the obtained results as representative of lake ecosystems across a vast area of northern taiga. The results showed that, despite the wide range of different hydrological and hydrochemical characteristics, in terms of biogenic elements the lakes are classified into only two types: oligotrophic and dystrophic (the exception is the hypereutrophic anaerobic zones of the meromictic lakes Svetloe and Temnoe). These are probably the most common statuses for boreal lakes not subject to direct anthropogenic impact.

Keywords: Arkhangelsk region, lakes, nutrients, nitrogen, phosphorus, trophic status

The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, project No. 22-27-00828 “Estimation of carbon emissions ($CH_4 + CO_2$) from the surface of inland water bodies of the European North of Russia”, <http://rscf.ru/project/22-27-00828/>.

Известно, что в условиях интенсивного антропогенного воздействия на природную среду меняется химический состав природных вод. Особенно сильно свойства вод нарушаются при возрастающем поступлении органических и минеральных биогенных элементов – соединений азота, фосфора. Загрязнение этими веществами и связанный с ним процесс эвтрофикации влияют на экосистемы озер и благосостояние людей. Умеренное обогащение водоемов питательны-

ми веществами способствует увеличению биоразнообразия [1, 2], а высокие концентрации питательных элементов вызывают ухудшение качества озерных экосистем, включая цветение вредных цианобактерий, потерю подводной растительности, гипоксические явления и периодическую гибель рыбы, что в свою очередь может оказывать влияние на снабжение питьевой водой населения и рекреационное использование водоемов [2, 3].

Одним из основных показателей для оценки состояния и функционирования водных экосистем является определение концентрации биогенных элементов. Биогенные элементы активно участвуют в биопродукционных процессах, определяют интенсивность формирования первичной продукции. Содержание в воде водоемов биогенных веществ, в первую очередь содержание общего азота и общего фосфора, представляется эффективным показателем трофического состояния водоемов [1, 3, 4].

Цель работы – определить содержание биогенных элементов в озерах бореальной зоны разного типа, оценить трофический статус по содержанию биогенных элементов, чтобы получить возможность рассматривать полученные результаты в качестве репрезентативной характеристики озерных экосистем обширной территории северной тайги.

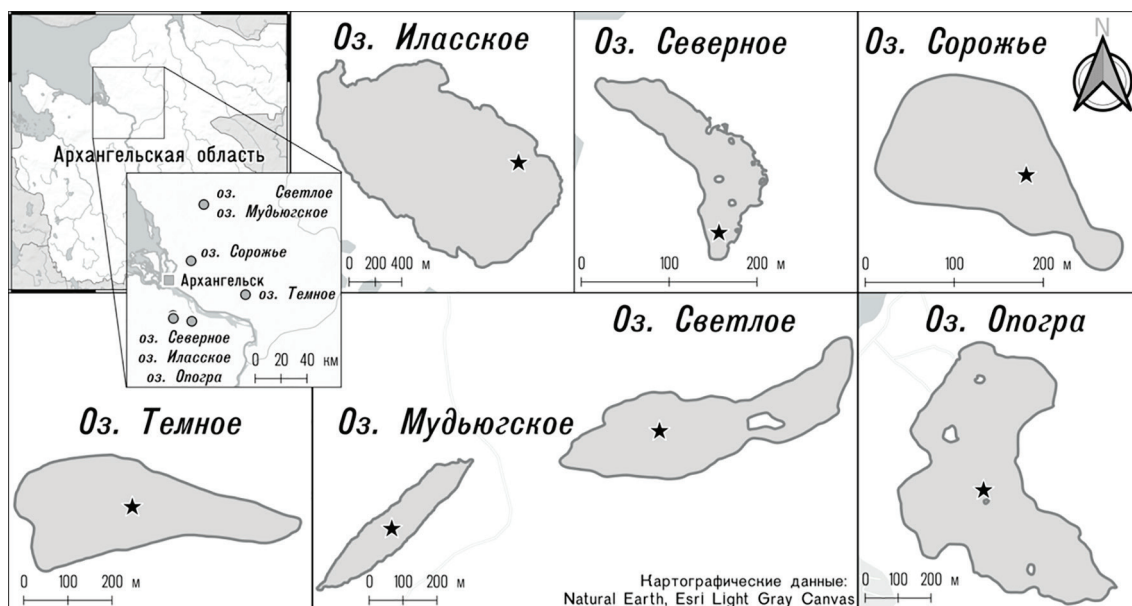
Материалы и методы исследования

Для исследований были выбраны озера Архангельской области (рисунок), различающиеся морфометрией, гидролого-гидрохимическими характеристиками. Озеро Светлое располагается в 65 км на северо-восток от г. Архангельска (65,083° с.ш., 41,115° в.д.) – меромиктическое, глубокое (максимальная глубина 39 м), прозрачное; оз. Мудьюгское также располагается в 65 км северо-восточнее Архангельска (65,080° с.ш., 41,092° в.д.) – средней глубины (максимальная глубина 11 м), прозрачное; оз. Темное располагается в 50 км к востоку от г. Архангельска (64,477° с.ш.,

41,745° в.д.) – меромиктическое, глубокое (максимальная глубина 38 м), ультрапресное, гуминовое; озера Иласского болотного массива расположены в 20 км от г. Архангельска: оз. Иласское (64,315° с.ш., 40,614° в.д.) – гуминовое, мелководное, расположено в центральной возвышенной части болота; оз. Северное (64,334° с.ш., 40,609° в.д.) – внутриболотное, расположено в грядово-озерковом комплексе в северной части болотного массива. Дополнительно выбраны гуминовые озера Опогра (64,296° с.ш., 40,903° в.д.) и Сорожье (64,704° с.ш., 40,892° в.д.), поскольку гуминовые озера Темное и Иласское труднодоступны. Оз. Опогра расположено в 32 км к юго-востоку от Архангельска, оз. Сорожье – в 25 км северо-восточнее Архангельска. Озера Светлое и Темное являются меромиктическими, для обоих озер характерно наличие анаэробной зоны – монимолимниона с постоянной в течение года температурой.

Сравнительная характеристика исследуемых озер [5] представлена в таблице.

Исследуемые озера имеют широкий диапазон характеристик водной толщи: глубина озер от 1,6 до 39 м, прозрачность воды от 1,5 до 12 м, электропроводность от 12 до 350 мкСм/см, значения pH от 3,9 до 8,7, содержание РОУ от 0,7 до 35 мг/л. В данный интервал значений укладываются большинство озер региона исследования, что позволит рассматривать полученные результаты в качестве репрезентативной характеристики озерных экосистем обширной территории северной тайги.



Карта-схема объектов исследования (звездочкой отмечены станции отбора проб)

Классификационные характеристики и некоторые показатели исследуемых озер

| Иласское | Мудьюгское | Опогра | Светлое | Северное | Сорожье | Темное |
|--|---|--|--|---|--|---|
| По площади зеркала водной поверхности по классификации П.В. Иванова [6] | | | | | | |
| 1,768 км ² малое озеро (1,0–10,0 км ²) | 0,043 км ² озерко (< 0,1 км ²) | 0,267 км ² очень малое озеро (0,1–1,0 км ²) | 0,146 км ² очень малое озеро (0,1–1,0 км ²) | 0,013 км ² озерко (< 0,1 км ²) | 0,03 км ² озерко (< 0,1 км ²) | 0,094 км ² озерко (< 0,1 км ²) |
| Максимальная глубина, м | | | | | | |
| 2,5 | 11 | 3,5 | 39 | 2,2 | 5,9 | 38 |
| Средняя глубина, м | | | | | | |
| 1,6 | 7 | 1,9 | 12,1 | 2,0 | 4,1 | 13,2 |
| По показателю относительной глубины (отношение средней глубины к кубическому корню из площади зеркала озера) по классификации П.В. Иванова [6] | | | | | | |
| 1,3 мелкое (0,5–2) | 20 очень глубокое (> 10) | 3,0 нормальной глубины (2–4) | 23 очень глубокое (> 10) | 8,4 глубокое (4–10) | 13,1 очень глубокое (> 10) | 29,0 очень глубокое (> 10) |
| По показателю открытости (отношение площади озера к его средней глубине) [7] | | | | | | |
| 1,105 открытый водоем (0,5–5,0) | 0,006 слабо открытый (< 0,1) | 0,130 умеренно открытый (0,1–0,5) | 0,012 слабо открытый (< 0,1) | 0,007 слабо открытый (< 0,1) | 0,007 слабо открытый (< 0,1) | 0,007 слабо открытый (< 0,1) |
| По типу летней стратификации [8]. | | | | | | |
| эпитермическое | метатермическое | эпитермическое | гипотермическое | эпитермическое | метатермическое | гипотермическое |
| По минерализации по классификации И.В. Баранова [9] | | | | | | |
| ультрапресное (< 100 мг/л) | маломинерализованное (100–200 мг/л) | маломинерализованное (100–200 мг/л) | маломинерализованное (100–200 мг/л) ниже хемоклина – среднеминерализованное (200–500 мг/л) | ультрапресное (< 100 мг/л) | маломинерализованное (100–200 мг/л) | ультрапресное (< 100 мг/л) |
| По прозрачности (определялась по диску Секки) [8] | | | | | | |
| 1,5 м малая прозрачность (1–2 м) | до 6 м Высокая прозрачность (4–8 м) | до 2 м малая прозрачность (1–2 м) | до 12 м Очень высокая прозрачность (> 8 м) | до 2 м малая прозрачность (1–2 м) | 1,5 м малая прозрачность (1–2 м) | 3,5 м малая прозрачность (1–2 м) |
| Показатель рН | | | | | | |
| 4,7–5,5 | 7,6–8,7 | 6,8–7,4 | 7,1–7,7 | 3,9–4,8 | 6,2–7,7 | 5,4–6,2 |
| Электропроводность, мкСм/см | | | | | | |
| 12–46 | 167–280 | 139–270 | 217–350 | 18–40 | 82–156 | 22,4–35,8 |
| РОУ, мг/л | | | | | | |
| 0,74–1,62 | 0,6–2,6 | 29–35 | 0,8–4,3 | 18–23 | 20–28 | 15–30 |

Отбор проб на определение содержания биогенных элементов в исследуемых озерах производился на глубоководных станциях для оз. Светлое, Мудьюгское, Сорожье, Северное – в марте, мае, августе и ноябре 2022 г., для оз. Темное, Иласское – в мае и августе 2022 г., для оз. Опогра – в марте, мае, августе 2022 г. Всего в 2022 г. было

отобрано 107 проб и выполнено порядка 600 измерений на гидрохимические показатели: неорганические формы азота (аммонийный азот, нитритный азот, нитратный азот), общий азот, фосфаты, общий фосфор. Анализ проб на биогенные элементы осуществлялся стандартными фотометрическими методами [10].

Результаты исследования и их обсуждение

Озеро Опогра

Полученные результаты показали, что в распределении аммонийного азота в оз. Опогра наблюдается равномерное распределение по глубине во все сезоны, концентрации варьируют в диапазоне 29,3–103,3 мкгN/л (медиана 58,2 мкгN/л), только в зимний период наблюдается небольшое увеличение в придонном горизонте до 296 мкгN/л. Аналогичное распределение по глубине демонстрируют нитритный азот и фосфаты, их концентрации варьируют в диапазоне 2,4–7,5 мкгN/л (медиана 3,9 мкгN/л) и 2,0–9,0 мкгP/л (медиана 3,0 мкгP/л соответственно, и только в зимний период наблюдается увеличение концентрации этих соединений ко дну до значений 16,5 мкгN/л и 48,2 мкгP/л соответственно. Нитраты распределены равномерно по всему водному столбу во все сезоны, концентрация варьирует в диапазоне 82,3–150,4 мкгN/л (медиана 106,7 мкгN/л). Распределение общего фосфора и общего азота равномерно по водному столбу 5,8–16,5 мкгP/л (медиана 10,1 мкгP/л) и 318,0–523,3 мкгN/л (медиана 426,1 мкгN/л) соответственно. По содержанию основных биогенных элементов озеро можно отнести к олиготрофному [8, 11].

Озеро Иласское

Озеро Иласское мелководное. Концентрации фосфат-ионов варьируют от 0,6 до 1,9 мкгP/л, общий фосфор – 5,5–18,0 мкгP/л, аммонийный азот – 75,1–193,4 мкгN/л, нитритный азот 1,0–1,8 мкгN/л, нитратный азот – 57,4–84,8 мкгN/л, общий азот – 310,0–375,6 мкгN/л. По содержанию основных биогенных элементов озеро можно отнести к дистрофному [8, 11].

Озеро Северное

Озеро Северное мелководное. Концентрации фосфат-ионов варьируют от 0,2 до 2,1 мкгP/л, общий фосфор – 4,7–6,4 мкгP/л, аммонийный азот – 32,9–108,5 мкгN/л, нитритный азот 0,6–4,1 мкгN/л, нитратный азот – 69,4–124,2 мкгN/л, общий азот – 275,8–423,6 мкгN/л. По содержанию основных биогенных элементов озеро можно отнести к дистрофному [8, 11].

Озеро Сорожье

Озеро Сорожье характеризуется глубиной до 6 м. В содержании фосфат-ионов наблюдается равномерное распределение

до глубины 4 м (2,0–10,0 мкгP/л (медиана 5,0 мкгP/л)) с последующим увеличением концентрации до дна (до 279,0 мкгP/л). Аналогичное распределение имеет аммонийный азот. Наблюдается равномерное его распределение до глубины 4 м (18,2–106,0 мкгN/л, медиана 41,4 мкгN/л) с последующим увеличением до 911,5 мкгN/л. Такое же распределение характерно и для общего азота: равномерное распределение до глубины 4 м (238,2–383,0 мкгN/л, медиана 321,0 мкгN/л) с последующим увеличением до 1229,8 мкгN/л. Нитритный азот равномерно распределен, и его содержание варьирует от 0,8 до 8,6 мкгN/л (медиана 3,8 мкгN/л). Нитратный азот также распределен равномерно, концентрации варьируют в диапазоне от 62,8 до 185,0 мкгN/л (медиана 111,8 мкгN/л). По содержанию основных биогенных элементов озеро можно отнести к олиготрофному [8, 11].

Озеро Мудьюгское

Озеро Мудьюгское глубиной до 11 м. Распределение фосфат-ионов равномерно по всему водному столбу во все месяцы отбора, концентрация варьирует от 2,0 до 19,7 мкгP/л, медиана 11,0 мкгP/л. В распределении содержания общего фосфора наблюдается равномерное распределение до глубины 8 м (концентрация варьирует от 7,0 до 24,0 мкгP/л, медиана 22,0 мкгP/л) с небольшим увеличением концентрации ко дну до 54,8 мкгP/л. Концентрация нитрит-ионов очень низкая, значения не превышают 3,1 мкгN/л. Распределение нитрат-ионов практически равномерно по водному столбу, концентрация варьирует от 52,1 до 196,5 мкгN/л, медиана 92,3 мкгN/л. В распределении аммонийного азота наблюдается достаточно равномерное его распределение до глубины 8 м (28,3–138,0 мкгN/л, медиана 50,3 мкгN/л) с увеличением концентрации ко дну до 494,00 мкгN/л. Аналогичное распределение имеет и общий азот: до глубины 8 м равномерное распределение (161,8–367,7 мкгN/л, медиана 238,8 мкгN/л) и увеличение концентрации ко дну до 1059,5 мкгN/л. По содержанию основных биогенных элементов озеро можно отнести к олиготрофному [8, 11].

Озеро Светлое

Озеро Светлое относится к меромиктическим водоемам [12, 13]. Проведенные исследования показали, что содержание фосфатов в миксолимнионе озера невелико (0,1–8,9 мкгP/л, медиана 5,1 мкгP/л).

В анаэробной зоне озера происходит резкое увеличение содержания фосфатов – до 1979,0 мкгР/л. Содержание общего фосфора имеет аналогичную тенденцию распределения: содержание в аэробной зоне составляет 4,9–28,0 мкгР/л, медиана 11,9 мкгР/л, в анаэробной зоне значение концентрации достигает 3215,1 мкгР/л. В динамике распределения аммонийного азота наблюдается увеличение его концентрации с увеличением глубины. Резкий скачок увеличения концентрации происходит на глубине 20–25 м. В миксолимнионе озера содержание аммонийного азота не превышает 104,4 мкгN/л, в то время как в монимолимнионе концентрация достигает 2174 мкгN/л. Распределению нитритного азота аналогично распределению аммонийного азота: в миксолимнионе содержание не превышает 0,8 мкгN/л, а в монимолимнионе концентрация увеличивается до 15,0 мкгN/л. Концентрация нитратного азота в миксолимнионе варьирует в диапазоне от 31,9 до 110,9 мкгN/л, медиана 68,7 мкгN/л, а монимолимнионе – 66,2–73,7 мкгN/л, медиана 68,9 мкгN/л; в зоне хемоклина (20–25 м) регистрируются локальные максимумы концентрации нитратного азота до 176,8 мкгN/л. Динамика распределения общего азота повторяет динамику аммонийного азота: равномерное распределение в миксолимнионе (138,9–218,0 мкгN/л, медиана 174,2 мкгN/л), затем резкое увеличение на глубине 20–25 м, в монимолимнионе концентрация общего азота достигает 2681–3709 мкгN/л. По содержанию основных биогенных элементов в миксолимнионе, эту часть озера можно отнести к дистрофному типу [8, 11].

Озеро Темное

Озеро Темное является меромиктического водоемом [14]. Динамика распределения содержания основных биогенных элементов аналогична динамике их распределения в оз. Светлое. Однако если в оз. Светлое наблюдается резкое увеличение содержания фосфатов, аммонийного азота, нитритного азота, общего азота и общего фосфора, то в оз. Темное отмечено плавное увеличение их содержания. Содержание фосфатов в поверхностном горизонте варьирует от 4,0 до 14,0 мкгР/л, медиана 7,0 мкгР/л и достигает значений в придонном горизонте до 300 мкгР/л, что на порядок ниже, чем в оз. Светлое. Концентрация общего фосфора в поверхностном горизонте варьирует от 5,9 до 25,9 мкгР/л, медиана 11,5 мкгР/л и достигает значений

в придонном горизонте до 246,6 мкгР/л. Содержание аммонийного азота в поверхностных горизонтах составляет 43,6–264,3 мкгN/л, медиана 68,2 мкгN/л, в придонных горизонтах значение концентрации достигает 670,8 мкгN/л. Концентрация нитритного азота в поверхностных горизонтах составляет 2,6–4,7 мкгN/л, медиана 3,5 мкгN/л, в придонных горизонтах значение концентрации достигает 25,2 мкгN/л. Концентрация нитратного азота варьирует от 90,1 до 146,4 мкгN/л по всему водному столбу, медиана 131,5 мкгN/л. Содержание общего азота в поверхностных горизонтах составляет 365,5–441,1 мкгN/л, медиана 399,9 мкгN/л, в придонных горизонтах значение концентрации достигает 1430,5 мкгN/л. По содержанию основных биогенных элементов в миксолимнионе (перемешиваемой части озера) эту часть озера можно отнести к олиготрофному типу [8, 11].

Заключение

Анализ содержания биогенных элементов в исследуемых озерах показал, что, несмотря на широкий диапазон рН, РОУ, электропроводности и прозрачности вод исследуемых озер, по биогенным элементам озера отнесены всего лишь к двум типам: к олиготрофному (оз. Опогра, Соржское, Мудьюгское, миксолимнион оз. Темное) и дистрофному (оз. Иласское, Северное, миксолимнион оз. Светлое). Вероятно, это наиболее распространенные статусы для бореальных не подверженных прямому антропогенному воздействию озер. Исключением являются анаэробные зоны меромиктических оз. Светлое и Темное. В анаэробной зоне озер, монимолимнионе, происходит резкое увеличение содержания всех биогенных элементов. Монимолимнион меромиктических оз. Светлое и Темное отнесен к гиперэтрофному типу.

Список литературы

1. Poikane S., Kelly M.G., Varbiro G., Borics G., Eros T., Hellsten S., Kolada A., Lukacs B., Solheim A., Lopez J., Willby N., Wolfram G., Phillips G Estimating nutrient thresholds for eutrophication management: Novelinsights from understudied lake types // Science of the Total Environment. 2022. Vol. 827. Article 154242. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.154242.
2. Ашихмина Т.Я., Кутявина Т.И., Домнина Е.А. Изучение процессов эвтрофикации природных и искусственно созданных водоемов (литературный обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 3. С. 6–13.
3. Vorobeva T.Y., Klimov S.I., Chupakov A.V., Pokrovsky O.S. Fish death in the mesotrophic lake Lekshmozero: possible causes // Lake Water: Properties and Uses (Case Studies of Hydrochemistry and Hydrobiology of Lakes in Northwest Russia). 2021. P. 71–87.
4. Кайгородов Р.В. Содержание биогенных элементов в воде бессточных открытых водоемов Тюменской области //

Успехи современного естествознания. 2021. № 12. С. 127–131. DOI: 10.17513/use.37747.

5. Прасолов С.Д., Забелина С.А. Пространственная изменчивость потоков метана с поверхности контрастных бореальных озер // Арктические исследования: от экстенсивного освоения к комплексному развитию: материалы III Международной молодежной научно-практической конференции (Архангельск, 26–28 апреля 2022 г.). Архангельск: Издательство Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, 2022. С. 361–364.

6. Теоретические вопросы классификации озер / Отв. ред. Н.П. Смирнов. СПб.: Наука. 1993. 186 с.

7. Верещагин Г.Ю. Методы морфометрической характеристики озер // Труды Олонецкой научной экспедиции. 1930. Ч. II. Вып. 1. С. 3–114.

8. Китаев С.П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 395 с.

9. Баранов И.В. Лимнологические типы озер СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 276 с.

10. Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике / Под ред. П.А. Лозовика, Н.А. Ефременко. СПб.: Нестор-История, 2017. 272 с.

11. Неверова-Дзюпак Е.В., Цветкова Л.И. Оценка трофического статуса поверхностных вод. СПб.: СПбГАСУ, 2020. 176 с.

12. 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) // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: биология. 2019. № 2. С. 147–159.

13. Savvichev A.S., Rusanov I.I., Zakharova E.E., Veslopolova E.F., Lunina O.N., Sigalevich P.A., Pimenov N.V., Gorlenko V.M., Kokryatskaya N.M., Zabelina S.A., Patutina E.O., Bumazhkin B.K., Gruzdev D.S., Kuznetsov B.B. Microbial processes of the carbon and sulfur cycles in an ice-covered, iron-rich meromictic lake Svetloe (Arkhangelsk region, Russia) // Environmental microbiology. 2017. Vol. 19, Is. 2. P. 659–672. DOI: 10.1111/1462-2920.13591.

14. Chupakov A.V., Chupakova A.A., Moreva O.Y., Shirokova L.S., Zabelina S.A., Vorobeva T.Y., Klimov S.I., Brovko O.S., Pokrovsky O.S. Allochthonous and autochthonous carbon in deep, organic-rich and organic-poor lakes of the European Russian subarctic // Boreal Environment Research. 2017. Vol. 22. P. 213–230.