

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.145>

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ В ОЗЕРЕ НИЖНЕЕ (АРХАНГЕЛЬСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Научная статья

Кокрятская Н.М.¹, Титова К.В.^{2,*}, Жибарева Т.А.³

¹ORCID : 0000-0002-0619-7241;

²ORCID : 0000-0001-7664-7706;

³ORCID : 0000-0003-3642-3155;

^{1,2,3}Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова УрО РАН, Архангельск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (ksyu_sev[at]mail.ru)

Аннотация

В статье представлены результаты исследований трех наиболее глубоких участков акватории малого бореального озера Нижнее (Коношский район Архангельской области). Отбор проб воды проводился в период зимней и летней межени 2012-2014 годов. Комплекс выполненных гидрохимических исследований позволил установить, что воды озера Нижнее являются маломинерализованными и по классификации Алекина относятся к гидрокарбонатному классу кальциевой группы. Сезонная температурная стратификация сопровождается практически полным исчерпанием кислорода в придонных слоях воды, где в условиях отсутствия потребителей биогенных элементов происходит их накопление. Активизация восстановительных процессов в условиях сезонной аноксии проявляется в накоплении в придонных водах значительных количеств аммонийного азота и в появлении в толще озерных вод сероводорода, генерируемого в основном в ходе сульфатредукции, и доминировании в составе растворенного железа его восстановленной формы.

Ключевые слова: Архангельская область, озеро Нижнее, сульфатредукция, сероводород, электропроводность, железо, минерализация, ионы.

DISTRIBUTION OF HYDROCHEMICAL INDICATORS IN LAKE NIZHNEE (ARKHANGELSK OBLAST)

Research article

Kokryatskaya N.M.¹, Titova K.V.^{2,*}, Zhibareva T.A.³

¹ORCID : 0000-0002-0619-7241;

²ORCID : 0000-0001-7664-7706;

³ORCID : 0000-0003-3642-3155;

^{1,2,3}N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of RAS, Arkhangelsk, Russian Federation

* Corresponding author (ksyu_sev[at]mail.ru)

Abstract

The article presents the results of studies of the three deepest sections of the water area of the small boreal lake Nizhnee (Konoshsky district, Arkhangelsk Oblast). Water sampling was carried out during the winter and summer low-water periods of 2012-2014. The complex of hydrochemical studies allowed to establish that the waters of Lake Nizhnee are low-mineralised and according to the Alekin classification belong to the hydrocarbonate class of the calcium group. Seasonal temperature stratification is accompanied by almost complete depletion of oxygen in the bottom layers of water, where in the absence of consumers of biogenic elements their accumulation occurs. Activation of reducing processes under conditions of seasonal anoxia is manifested in accumulation of significant amounts of ammonium nitrogen in bottom waters and in appearance of hydrogen sulphide in the lake water column, generated mainly in the course of sulphate-reduction, and dominance of its reduced form in the composition of dissolved iron.

Keywords: Arkhangelsk Oblast, Lake Nizhnyeye, sulphate reduction, hydrogen sulphide, conductivity, iron, mineralization, ions.

Введение

Органическое вещество (ОВ), образованное в процессе фотосинтеза и попадающее в водоем с водосборной территории, вследствие небольшой глубины, характерной для большинства малых озер, подвергается деструкции в ходе аэробно-анаэробных процессов, в разной степени протекающих в водной толще. Соотношение окислительного и восстановительного пути минерализации ОВ зависит от гидрологических особенностей водоема, его трофического статуса, определяющих в свою очередь кислородный режим, и как следствие направленность протекающих в водоеме окислительно-восстановительных процессов. Последствием развития анаэробных микробных процессов (денитрификации, сульфатредукции, ацетогенеза, метаногенеза) в воде и донных осадках является выделение сероводорода, метана и других восстановленных соединений. Появление в водной среде сероводорода, с одной стороны, крайне негативно для всей водной экосистемы вследствие его высокой токсичности для гидробионтов. С другой стороны, именно образование бактериального сероводорода является начальным звеном превращения серы в различные по стабильности соединения в современных осадках [1], [2]. Ранее выполненные нами работы по изучению

биогеохимии серы позволили выявить значимость сульфатредукции в анаэробной минерализации органического вещества в воде и донных осадках пресноводных водоемов [3], [4], [5].

Целью исследования является изучение гидрохимических условий образования и накопления сероводорода в маломинерализованных экосистемах, на примере озера Нижнее в Коношском районе Архангельской области.

Материал и методы исследования

В область исследования входит озеро Нижнее, расположенное в Коношском районе Архангельской области.



Рисунок 1 - Карта-схема области исследований и отбора проб в 2012-2014 гг.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.145.1>

По результатам батиметрической съемки, выполненной в ходе экспедиционных работ в 2012 году озеро Нижнее классифицировалось как мелководное. При измеренных длине около 1,5 км, максимальной ширине примерно 0,4 км и рассчитанной площади зеркала 0,6 км² относится к очень малым озерам. Имеет вытянутую (с севера на юг) форму, береговая линия озера слабо изрезана. Дно сравнительно ровное при средней глубине 3-4 метра с повышением уровня в прибрежных зонах до 1 м; максимальные глубины (5,0-5,5 м) зафиксированы на трех участках акватории. По происхождению озеро ледниковое. Оно расположено в зоне избыточного увлажнения и преобладающую роль в его питании играют атмосферные осадки, а также поверхностные и подземные стоки. Приточность озера обеспечивается в основном поступлением воды в его северную часть из озера Верхнее через узкую сильно заболоченную и заросшую растительностью протоку. Прослеживается слабое течение от устья протоки в сторону истока реки Долгая, расположенного в северо-западной части озера.

Таблица 1 - Расположение станций отбора проб воды и колонок донных осадков в озере Нижнее, их краткая характеристика

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.145.2>

Номер станции	Координаты станции		Глубина отбора, м	Описание места отбора проб
	широта	долгота		
10	60°58.617'	40°13.288'	5,5	В северной части озера, в 50 м от восточного берега чуть севернее начала жилых домов на берегу
11	60°58.312'	40°13.147'	5,1	Около западного берега озера на расстоянии 20-30 м от него, немного южнее лодочной

				станции, расположенной на восточном берегу
12	60°58.145'	40°13.205'	5,1	В южной части озера почти посередине его, расстояние от южного берега 100-120 м

Пробы воды отбирались послойно на станциях (ст. 10, ст. 11, ст. 12), приуроченных к наиболее глубоким участкам акватории (рис. 1), с помощью пластикового горизонтального батометра. Объем проб варьировал в зависимости от аликвоты, необходимой для анализа и достаточной для проведения повторного определения. Вода помещалась в емкости из стекла или пластика согласно требованиям хранения определяемых в ней компонентов (растворенный сероводород – стекло, растворенный кислород – специальные склянки из темного стекла; сульфаты, растворенное железо, биогенные элементы: аммоний, нитриты, фосфаты, кремний – пластик) [6]. Температура и кислород определялись с помощью портативного оксиметра HQ30D.99 Nach Lange с люминесцентным датчиком. In situ были измерены 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 было проведено фотометрическое определение цветности по хром-кобальтовой шкале на спектрофотометре «Unico 1201» (ГОСТ 31868-2012); содержания биогенных элементов (аммония, нитритов, нитратов, фосфатов, кремния) согласно РД 52.24.643-2002; сероводорода (РД 52.24.450-2010); ионного состава (хлорид, сульфат, натрий, калий, кальций, магний) на жидкостном хроматографе LC-20 Prominence; железа. Предварительно проба была отфильтрована и подкислена до pH ниже 2. Определение концентраций растворенного железа в воде проводилось фотометрическим методом. Он основан на реакции феррозина с ионами железа (II) в области pH от 4 до 9 с образованием комплексного соединения, окрашенного в фиолетовый (пурпурный) цвет. Поскольку железо(III) не образует комплексов с феррозином, использование этого реагента дает возможность определять содержание железа(II), суммарного железа после восстановления до железа(II), а по разности – железа(III). В качестве восстановителя применялась аскорбиновая кислота [7].

Результаты исследования и их обсуждение

Работы по изучению биогеохимических процессов, отражающих и влияющих на экологическое состояние изучаемого водоема, начаты в июле 2012 года, когда в ходе рекогносцировочных исследований были получены первые данные о содержании в воде озера сероводорода, подтвердившие перспективность исследований. В последующие два года выполнен комплекс работ по определению основных гидрохимических показателей, позволивший выявить особенности внутриводоемных процессов в озере.

Средняя величина электропроводности озерной воды составляет 180 мкСм/см при интервале концентраций 127-340 мкСм/см. В пределах трёх первых метров водной толщи вариации этого показателя невелики – 164 ± 20 мкСм/см, и не выходят за границы интервала 130-200 мкСм/см. Небольшие межгодовые колебания показателя обусловлены, скорее всего, количеством выпавших осадков и поступлением воды с тальми и паводковыми водами. Отмечено увеличение величины электропроводности в придонных горизонтах воды, наименее выраженное во время летней межени, когда её величина около дна увеличивалась в среднем всего на 20 мкСм/см по сравнению с поверхностью (161 мкСм/см); зимой, напротив, стратификация по этому показателю выражена более отчетливо – электропроводность придонных слоев увеличивается в 1,9 раза по сравнению с подледным слоем воды (рис. 2а).

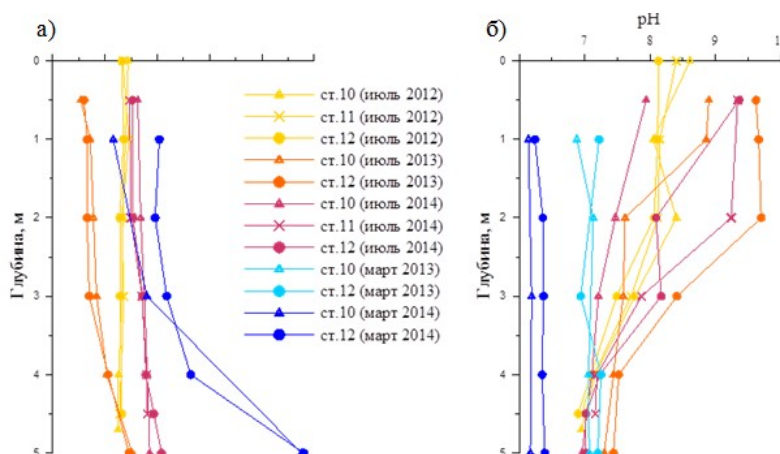


Рисунок 2 - Распределение электропроводности (а) и pH (б) в озере Нижнее
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.145.3>

Минерализация воды озера Нижнее составляет в среднем 130 мг/л, что позволяет отнести их к маломинерализованным [8]. Максимум этого показателя отмечен для периода зимней межени – 158-164 мг/л. Наименее минерализована вода в средней части озера, где в летний период сумма ионов не превышает значения 126 мг/л. В ионном составе воды доминирующим катионом выступает кальций. Его содержание изменяется от 66 до 72% от суммы катионов, причем с повышением минерализации эквивалентная доля кальция снижается. Второе место занимает ион магния – 19-29%-экв. На долю натрия приходится от 6 до 8%-экв. Остальные катионы присутствуют в количестве менее 1%-экв. Среди анионов преобладает гидрокарбонат – 83-90 %-экв. За ним примерно в равных долях следуют сульфат- и хлорид-ионы. Эквивалентная доля HCO_3^- и SO_4^{2-} в содержании анионов в воде с повышением ее минерализации увеличивается. На основании установленного процентного содержания ионов можно сделать вывод, что вода озера Нижнее по классификации Алекина относится к гидрокарбонатному классу кальциевой группы [8].

Жесткость воды, обусловленная наличием катионов кальция и магния, составляет 1,6 мг-экв/л или 4,5°Ж, что позволяет расценивать ее как мягкую [8].

Величина цветности озерных вод практически не изменялась в пределах водяного столба и составляла в среднем (68,94±3,06) градуса цветности, т.е. может рассматриваться как средняя. Не выявлено также сезонных вариаций этого показателя и его изменения по акватории озера.

Величина pH преимущественно варьировала в интервале 7,02-8,12, составляя в среднем 7,60±0,92. В летний период уровень pH существенно превышает «зимние» значения, составляя преимущественно 7,21-8,40 и 6,32-7,09, соответственно летом и зимой (рис. 16). Наиболее значительное подщелачивание вод отмечено в верхнем двухметровом слое воды станции 12 (рис. 2б), во время летней межени 2013 и 2014 годов, когда величина pH составляла в среднем 9,29, изменяясь в интервале 8,09-9,70. В придонном горизонте варибельность показателя уменьшается – для всего периода наблюдений среднее значение pH составляет 6,96±0,36. Наблюдаемое подщелачивание поверхностных вод, скорее всего, обусловлено летним цветением фитопланктона.

В вертикальном распределении температуры во время летней межени все три года исследований наблюдалось монотонное её понижение по мере погружения в воды озера (рис. 3). Разница между температурой поверхностных и придонных горизонтов составляла 10-15°С. Наиболее значительный перепад температур с градиентом 8°С/м был отмечен на горизонте 3 м по всей акватории озера в 2014 году, в то время как годом раньше подобное явление было отмечено только для станции 12, где этот слой располагался на глубине 4 м.

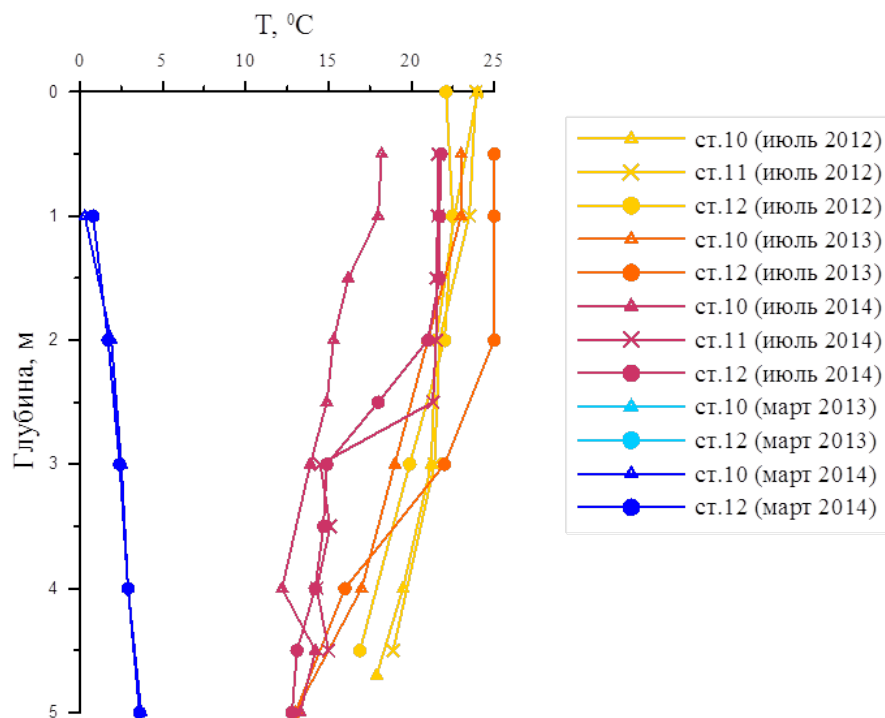


Рисунок 3 - Распределение температуры в озере Нижнее

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.145.4>

Летом 2012 года уменьшение температуры по толще воды было не столь значительно и в целом не превышало 5-6°С с максимальным градиентом 2°С/м в придонных слоях станции 12. В зимнюю межень минимальная температура отмечена в подледных водах (0,6°С), по мере погружения она монотонно увеличивалась до 3,6-3,7°С в придонных слоях воды (вследствие теплоотдачи от дна, аккумулирующего тепло в теплое время года).

Характер вертикального распределения гидрофизических параметров позволяет расценивать озеро Нижнее как димиктическое (по классификации Хатчинсона [9]) и выделить в структуре водной толщи озера слой эпилимниона, метаолимниона (скачка температуры/плотности) и гиполимниона. Абсолютные значения гидрологических

характеристик в структурных слоях, а также толщины слоев испытывают колебания во времени. Тем не менее, эти данные удобно использовать при анализе распределения гидрохимических параметров.

Величина щелочности воды, определяемой в пресных водоемах концентрацией гидрокарбонатных и карбонатных ионов, составляла в среднем 1,30 ммоль/л, при том, что летом величина этого показателя была вдвое ниже, чем зимой – 0,92 и 2,42 ммоль/л, соответственно. Сезонность проявлялась и в вертикальном распределении щелочности, когда летом она практически не изменялась в толще вод – 1,01 ммоль/л в поверхностных водах и 0,91 ммоль/л в придонных, в то время как в зимнюю межень её величина в придонных слоях заметно возрастала, составляя соответственно 2,27 и 3,24 ммоль/л. На величину щелочности в придонных горизонтах кроме гидрокарбонатов существенное влияние, как будет показано ниже, оказывают гидросульфиды и особенно ионы аммония.

В содержании растворенного кислорода наблюдается выраженная стратификация в периоды зимней и летней стагнации (рис. 4).

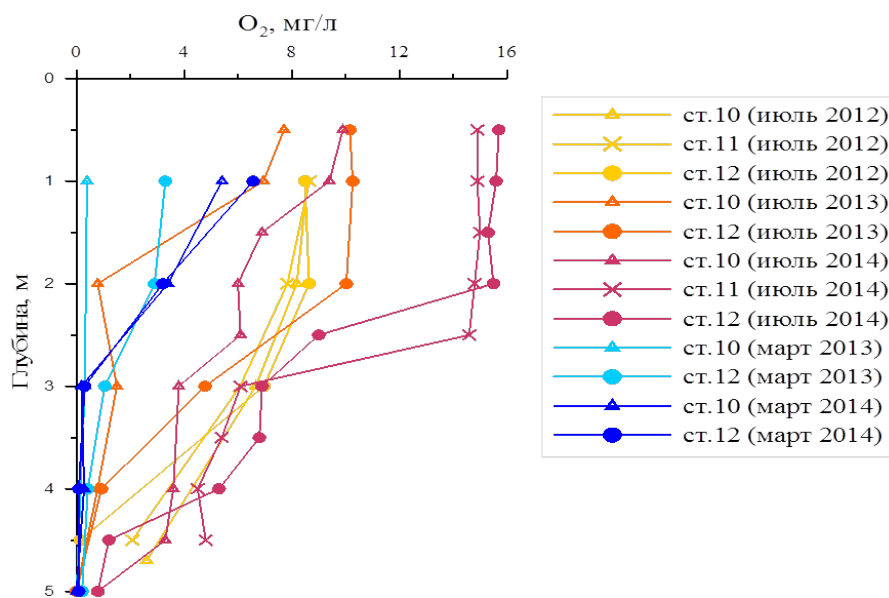


Рисунок 4 - Распределение растворенного кислорода в озере Нижнее
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.145.5>

В эпилимнионе станций 11 и 12 во время летней межени 2014 года концентрации кислорода достигали очень высоких значений 14,6-15,7 мг/л (169-183% насыщения). Причиной таких высоких концентраций растворенного кислорода является активный фотосинтез фитопланктона, что хорошо согласуется с распределением рН в этих водах (рис. 2б). В этот же период поверхностные воды станции 10 содержали кислорода на 5 мг/л ниже, что зафиксировано на двух других станциях. Кроме того и отрицательный скачок его концентраций на этой станции расположен гораздо выше, чем на двух других, т.е. зона активного фотосинтеза на этой станции при одинаковой прозрачности воды (0,5 м) ограничена только самым верхним слоем воды.

Придонный анаэробный слой с практически полным исчерпанием кислорода четко выражен в период как зимней, так и летней межени. Однако при этом в зимний период отмечено наличие дефицита кислорода по всей толще вод на всей акватории озера в оба года наблюдений. Наиболее ярко этот процесс выражен на ст. 10 в зимний период, когда уже в подледной воде количество растворенного кислорода не превышало в 2014 году 5,41 мг/л (39% насыщения), а в 2013 даже 0,39 мг/л (2% насыщения), далее монотонно уменьшаясь до аналитического нуля в придонном горизонте.

Выполнены исследования по изучению распределения в водах озера биогенных элементов. Кремний активно потребляется планктоном, особенно диатомовыми водорослями. При их отмирании он частично переходит в воду, но большей частью захоранивается в донных отложениях. Содержание растворенных соединений кремния в кислородных водах на всей акватории озера изменялось от 803 до 2703 мкг/л, закономерно увеличиваясь во всех случаях к придонным горизонтам – в 3,5 раза в летний период и в 1,8 раза зимой. Сезонные колебания прослеживаются и в содержании кремния (рис. 5а). Отмечена тенденция его накопления в подледный период и снижение в период вегетации во время потребления живыми организмами. Так, в период зимней межени 2013 года содержание растворенного кремния на всей акватории озера составляло в среднем 3300 мкг/л, что более чем в два раза превышало его количество в июле.

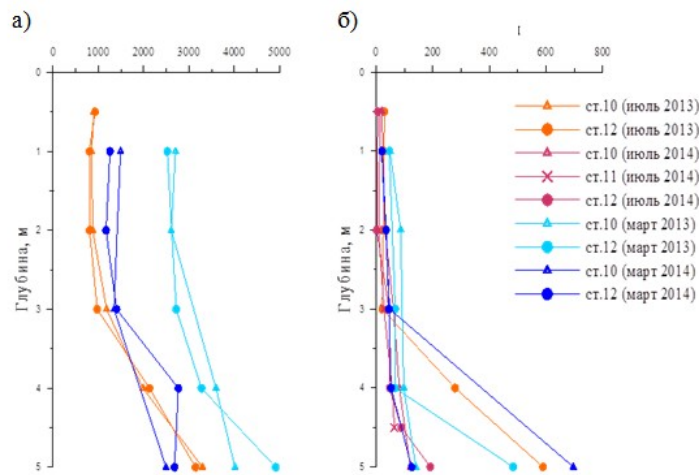


Рисунок 5 - Распределение кремния (а) и минерального фосфора (б) в озере Нижнее
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.145.6>

В содержании минерального фосфора также как и для кремния, отчетливо прослеживаются сезонные изменения – отмечена тенденция его накопления в эпилимнионе в подледный период, где его количество составляет в среднем 42,23 мкг Р-РО₄/л, и снижение в период вегетации (в среднем 17,86 мкг Р-РО₄/л). Для вертикального распределения фосфатов (рис. 5б), характерно концентрирование в придонных слоях воды – в среднем в 8,5 раз зимой и в 13 раз летом. В зимнее время (март 2014 года) минеральный фосфор доминирует в его общем содержании, составляя не менее половины его количества в подледных водах и увеличиваясь до 70-80 % Р_{вал} в придонных горизонтах. Полученные концентрации фосфатов значительно превышают данные характерные для низкоминерализованных антропогенно не нагруженных водоемов Карелии и Северо-запада России [10], [11], [12]. Столь значительное содержание фосфатов в озере Нижнее возможно связано не только с их поступлением с водосбора, диффузией из донных отложений и накоплением в анаэробной зоне в условиях аноксии, как это происходит для того же кремния, но и с постоянным круглогодичным загрязнением озера фосфонатсодержащими моющими средствами, круглогодично используемыми населением для стирки половиков непосредственно на озере.

Соединения азота были представлены в озере во всех формах. Относительно других форм содержание нитритов было наименьшим (0,08-14,67 мкг N-NO₂/л, в среднем 5,27 мкг N-NO₂/л). В вертикальном распределении отмечено концентрирование NO₂ в гиполимнионе в среднем в 2 раза по сравнению с эпилимнионом. Накопление в придонном слое характерно также для нитратного и аммонийного азота (рис. 6), причем, если количество нитратов увеличивалось в среднем в 2 раза, то количество аммонийного азота возрастало в среднем в 30 раз, достигая максимальных значений во время летней межени – 2063 мкг N-NH₄/л, что в 55 раз превышает его содержание на поверхности.

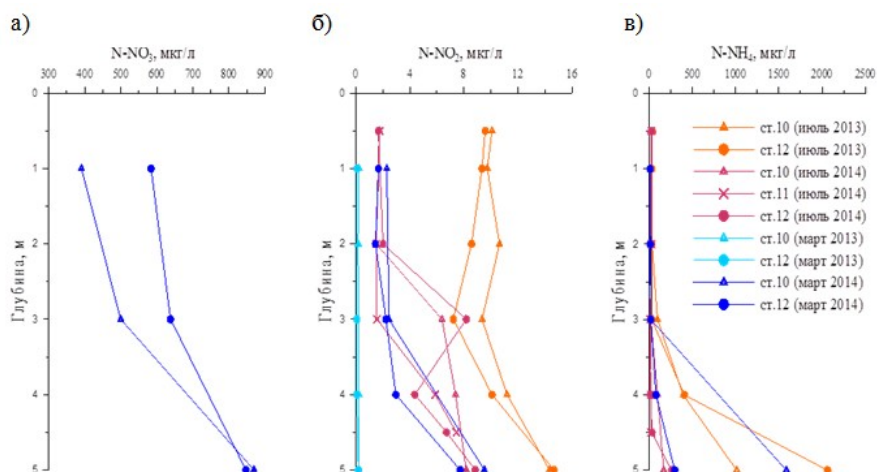


Рисунок 6 - Распределение нитратного (а), нитритного (б) и аммонийного азота (в) в озере Нижнее
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.145.7>

Аммонийный азот появляется в водоеме в результате аммонификации органического азота вследствие активно протекающих здесь процессов деструкции органического вещества.

Во время зимней межени минеральный азот также как и минеральный фосфор доминировал в его валовом содержании, составляя 60-70% и практически 100% в составе N_{вал}, соответственно в поверхностных и придонных горизонтах. Доминирование минеральных форм над органическими указывает на активное протекание в зимний

период по всей толще вод озера Нижнее процессов деструкции органического вещества. Отношения растворенных минеральных форм азота и фосфора как потенциальных источников питательных веществ для первичных продуцентов равны 18,7 в эпилимнионе и 5,4 в придонном анаэробном слое.

Приведенные выше данные свидетельствуют о развитии в озере сезонной стратификации, сопровождающейся развитием анаэробных условий в придонных горизонтах воды, где минерализация органического вещества идет по восстановительному типу и осуществляется в основном в результате деятельности анаэробных гетеротрофных микроорганизмов, к числу которых относятся и сульфатредуцирующие бактерии. В основе энергетического обмена сульфатредуцирующих бактерий лежит окислительно-восстановительная реакция, при которой происходит окисление низкомолекулярных органических веществ до CO_2 за счет сопряженного восстановления сульфат-ионов до сероводорода [13].

В ранее проведенных исследованиях было доказано, что по содержанию биогенных элементов прослеживается наличие антропогенного воздействия на данный водоем, приводящее к его эвтрофированию, массовому развитию фитопланктона. Высокая биологическая продуктивность может являться причиной наличия значительного количества органического вещества, что в свою очередь вызывает интенсификацию микробиологических процессов [14].

В литературе значение концентрации сульфатов, ниже которой сульфатредукция не протекает, представлены величинами от 8 до 40 мкмоль (то есть от 0,8 мг/л до 4 мг/л). Если этот порог не достигнут, то в большей степени содержание органического вещества и его доступность для сульфатредукторов будут оказывать заметное влияние на протекание процесса восстановления сульфатов [15].

Среднее содержание сульфатов в эпилимнионе составляло 5,72 мг/л при интервале преимущественных концентраций 4,40-6,97 мг/л. Отмечено наличие сезонных вариаций в распределении этого параметра (рис. 7).

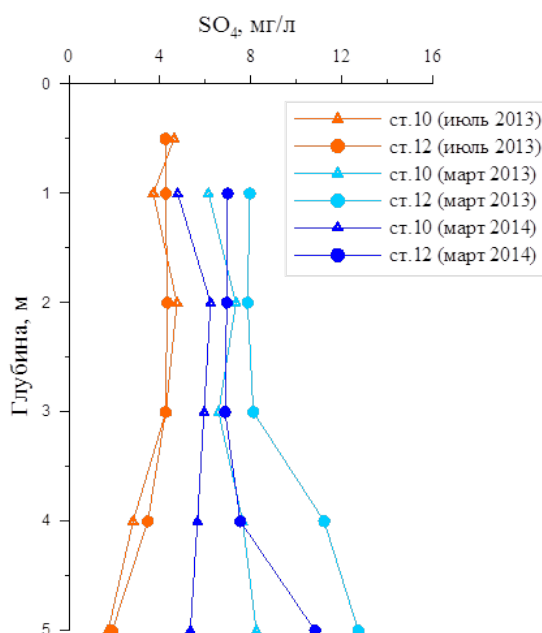


Рисунок 7 - Распределение сульфатов в озере Нижнее
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.145.8>

Так во время зимней межени количество сульфатов в верхних горизонтах воды составляло 6,78 мг/л и затем монотонно увеличивалось до 9,29 мг/л в придонном слое, скорее всего, за счет их диффузии из донных отложений. В летний период концентрации сульфатов в целом были несколько ниже по сравнению с зимой – 4,32 мг/л и количество их в анаэробных придонных водах уменьшалось до 1,81 мг/л за счет расхода на восстановление в ходе сульфатредукции.

Подтверждением протекания в водной среде озера Нижнее процесса бактериальной редукции сульфатов является обнаруженный сероводород, при существующих величинах pH находящийся преимущественно в форме гидросульфид-иона. В верхних 2-3 метрах водной толщи количество его невелико и составляет в среднем 22,91 мкг/л в летнюю межень и 9,38 мкг/л в зимнюю. В зимнее время выявлено достаточное ровное распределение концентраций H_2S по водяному столбу (рис. 8а), при том, что максимальные значения показателя – 24,3 мкг/л (ст. 10) были приурочены к подледным горизонтам. Связано это, скорее всего, с активной деятельностью микроорганизмов (фитопланктона) у нижней кромки льда, где находятся воды, обогащенные в результате вымораживания при образовании льда биогенными элементами; при отмирании этой ледовой флоры образуются частицы свежего органического вещества, в микропорах которого создаются условия благоприятные для жизнедеятельности анаэробных и, в частности, сульфатредуцирующих микроорганизмов.

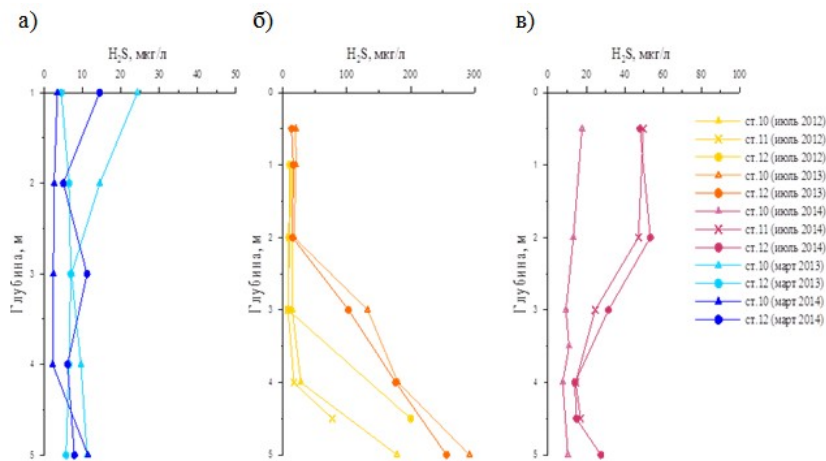


Рисунок 8 - Распределение сероводорода в озере Нижнее во время зимней межени 2012-2013 гг. (а), летней межени 2012-2013 гг. (б) и летней межени 2014 г. (в)
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.145.9>

В летнюю межень 2013 года содержание сероводорода в придонных горизонтах воды увеличивалось в среднем в 16 раз по сравнению с водами эпилимниона (рис. 8б), достигая значений 200-300 мкг/л. Подтверждением достаточно интенсивного течения бактериального восстановления сульфатов в этот период является и отмеченное выше уменьшение содержания сульфатов в этих придонных водах.

В 2014 году максимальные концентрации сероводорода были приурочены не к придонным горизонтам, а к нижнему краю эпилимниона станций 11 и 12 (рис. 8в), где над слоем термоклина задерживаются отмерший фито- и зоопланктон и формируется так называемое «жидкое дно», где формируется особое сообщество гетеротрофных микроорганизмов, в состав которого входят и сульфатредукторы. Ниже этого слоя вертикальное распределение сероводорода довольно однородно.

Как известно [1], распределение в водной экосистеме сероводорода тесно связано с наличием растворенного железа, которое играет важную роль в окислительно-восстановительных процессах, а также в процессах трансформации и перераспределения органических и минеральных соединений в водоемах. В воде озера Нижнее содержание растворенного железа составляло в среднем 1060 мкг/л, изменяясь в широком интервале концентраций – от 130 до 7000 мкг/л. Как видно из данных рисунка 9 в период, как зимней, так и летней межени доминирующей является восстановленная форма, доля которой в общем содержании растворенного железа не опускалась менее 66 %, при среднем значении 94%. Минимальные количества Fe(III) обусловлены аэробными условиями в верхних слоях воды.

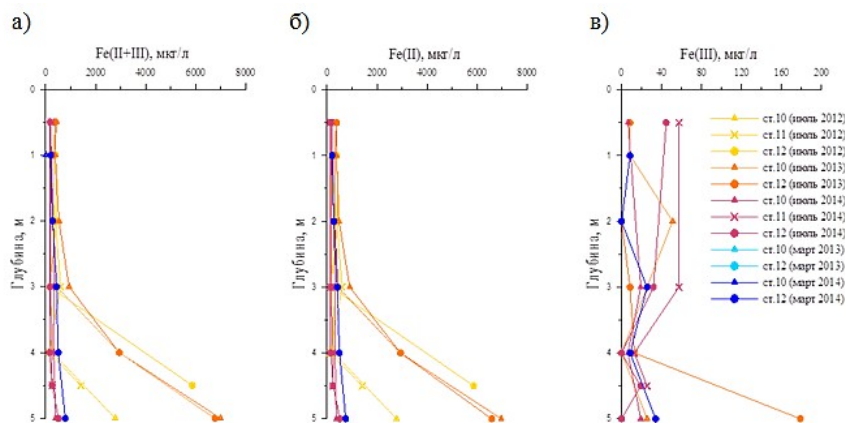


Рисунок 9 - Распределение в воде озера Нижнее общего растворенного железа (а), Fe(II) (б) и Fe(III) (в)
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.145.10>

В вертикальном распределении $Fe_{\text{раств}}$ можно отметить однородность его концентраций в эпилимнионе при содержании 201-404 мкг/л (в среднем 375 мкг/л) и увеличение до 2930 мкг/л (в среднем) в придонном анаэробном слое. Можно также выделить наличие сезонных вариаций в распределении этого показателя в верхних горизонтах воды – так, в летний период количество $Fe_{\text{раств}}$ составляло всего 316 мкг/л (164-527 мкг/л), что в 3 раза меньше его количества зимой. Для придонных анаэробных вод эти различия менее выражены – среднее содержание растворенного железа составляет 3120 и 2130 мкг/л, во время летней и зимней межени соответственно. Столь высокое содержание реакционноспособного железа в придонных слоях воды может быть связано как с выносом железосодержащих соединений с водосборных площадей, так и с его диффузией из поровой воды донных осадков и концентрированием в

анаэробных водах, где низкое содержание кислорода способствует устойчивости железа (II). Меньшие в несколько раз количества сероводорода в анаэробной зоне по отношению к железу обуславливают возможность последнего к миграции.

Заключение

Комплекс выполненных гидрохимических исследований позволил установить, что воды озера Нижнее являются мягкими (жесткость 4,5 °Ж); маломинерализованными (минерализация 130 мг/л) и по классификации Алекина относятся к гидрокарбонатному классу кальциевой группы. Величина pH преимущественно варьировала в интервале от 7,02 до 8,12, составляя в среднем $7,60 \pm 0,92$. В период летней межени для верхнего двухметрового слоя воды отмечено значительное подщелачивание (8,09-9,70) на фоне очень высоких концентраций растворенного кислорода – 14,6-15,7 мг/л (169-183% насыщения), обусловленных процессами фотосинтеза фитопланктона.

Установлена однородность распределения концентраций $Fe_{раств}$ в эпиплимнионе, составляющих 200-400 мкг/л и их увеличение до 2930 мкг/л (в среднем) в придонном анаэробном слое вследствие его диффузии из поровой воды донных осадков с последующим концентрированием в анаэробных водах, где низкое содержание кислорода способствует устойчивости железа (II). В ходе процесса аммонификации органического вещества в придонных анаэробных слоях воды происходит накопление аммонийного азота в количестве 215-1300 мкг/л, достигая максимальных значений (2060 мкг N-NH₄/л) во время летней межени.

Наиболее сильное сероводородное заражение отмечено в период летней стагнации 2012-2013 годов, когда в придонных анаэробных горизонтах количества сероводорода достигали значений 200-300 мкг/л на фоне заметного расхода сульфатов в редуцирующем процессе. Летом 2014 года активизация сульфатредукции (40-50 мкг H₂S/л) приурочена к верхней границе термоклина, где в аэробно-анаэробных условиях происходит разложение и повторное использование ОВ особым сообществом гетеротрофных микроорганизмов, в состав которого входят и сульфатредукторы. В зимнюю межень при достаточно ровном вертикальном распределении по глубине и акватории озера, повышенные содержания H₂S приурочены к подледным слоям воды, обогащенным лабильным органическим веществом, продуцируемым сообществом микроорганизмов, обитающих на нижней кромке льда.

Финансирование

Работа выполнена на основании госзадания за счет средств Минобрнауки РФ проект № FUUW-2022-0026 «Изучение закономерностей биогеохимических процессов циклов серы и хлора в экосистемах Европейского севера России».

Funding

The work was carried out on the basis of a state assignment at the expense of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, project No. FUUW-2022-0026 “Study of the Patterns of Biogeochemical Processes of Sulfur and Chlorine Cycles in the Ecosystems of the European North of Russia”.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Волков И.И. Геохимия серы в осадках океана / И.И. Волков. — М.: Наука, 1984. — 272 с.
2. Гурский Ю.Н. Геохимия литогидросферы внутренних морей. Т. 1. Методы изучения и процессы формирования химического состава иловых вод в отложениях Черного, Азовского, Каспийского, Белого, Балтийского морей / Ю.Н. Гурский. — М.: ГЕОС, 2003. — 332 с.
3. Кокрятская Н.М. Соединения серы в донных осадках пресноводных водоемов (устье Северной Двины и Рыбинское водохранилище) / Н.М. Кокрятская, И.И. Волков, Т.П. Демидова [и др.] // Литология и полезные ископаемые. — 2003. — № 6. — С. 647-659.
4. Кокрятская Н.М. Сезонные биогеохимические и микробиологические исследования малых озер таежной зоны северо-запада России (Архангельская область) / Н.М. Кокрятская, С.А. Забелина, А.С. Саввичев [и др.] // Водные ресурсы. — 2012. — Т. 39. — № 1. — С. 78-91.
5. Титова К.В. Соединения серы в воде и донных осадках малых озер юго-запада Архангельской области / К.В. Титова, Н.М. Кокрятская // Вестник Московского государственного областного университета. Естественные науки. — 2013. — № 2. — С. 101-105.
6. ГОСТ 2874-82. Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством. — Введ. 1985-01-01. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 7 с.
7. Титова К.В. Оптимизация методики определения растворенного железа с использованием феррозина в пресноводных озерах / К.В. Титова, Н.М. Кокрятская // Вода. Химия и экология. — 2013. — № 10. — С. 85-89.
8. Алекин О.А. Основы гидрохимии / О.А. Алекин. — Л.: Гидрометеиздат, 1953. — 296 с.
9. Хатчинсон Д.Э. Лимнология. Географические, физические и химические характеристики озер / Д.Э. Хатчинсон. — М.: Прогресс, 1969. — 592 с.
10. Современное состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1992-1997 гг. / отв. ред. Н.Н. Филатов. — Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1998. — 188 с.

11. Морева О.Ю. Биогенные элементы в оценке экологического состояния водных экосистем Архангельской области / О.Ю. Морева, А.А. Ершова, А.В. Чупаков [и др.] // Юдахинские чтения. Геодинамика и экология Баренц-региона в XXI в. — Архангельск: Институт экологических проблем Севера Уральского отделения Российской академии наук, 2014. — С. 1620-1625.
12. Моисеенко Т.И. Формирование химического состава вод озер в условиях изменения окружающей среды / Т.И. Моисеенко, Н.А. Гашкина. — М.: Наука, 2010. — 268 с.
13. Иванов В.М. Распространение и геохимическая деятельность бактерий в осадках океана / В.М. Иванов // Океанология. Химия океана. Т. 2. Геохимия донных осадков / отв. ред. И.И. Волков. — М.: Наука, 1979. — С. 312-349.
14. Матвеев А.А. Об интенсивности процесса сульфатредукции в донных отложениях Ладожского озера / А.А. Матвеев, А.А. Кучинскене, С.А. Резников // Гидрохимические материалы. Том CVIII. Формирование гидрохимического и гидробиологического режима водных объектов и вынос химических веществ реками. — Л.: Гидрометеиздат, 1990. — С. 153-157.
15. Holmer M. Sulphate Reduction and Sulphur Cycling in Lake Sediments: a review / M. Holmer, P. Storkholm // Freshwater Biology. — 2001. — Vol. 46. — Iss. 4. — P. 431-451.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Volkov I.I. Geohimija sery v osadkah okeana [Geochemistry of Sulphur in Ocean Sediments] / I.I. Volkov. — М.: Nauka, 1984. — 272 p. [in Russian]
2. Gurskij Ju.N. Geohimija litogidrosfery vnutrennih morej. T. 1. Metody izuchenija i processy formirovanija himicheskogo sostava ilovyh vod v otlozhenijah Chernogo, Azovskogo, Kaspijskogo, Belogo, Baltijskogo morej [Geochemistry of Lithohydrosphere of Inland Seas. Vol. 1. Methods of Study and Processes of Formation of Chemical Composition of Silt Waters in the Sediments of the Black, Azov, Caspian, White, Baltic Seas] / Yu.N. Gursky. — М.: GEOS, 2003. — 332 p. [in Russian]
3. Kokrjatskaja N.M. Soedinenija sery v donnyh osadkah presnovodnyh vodoemov (ust'e Severnoj Dviny i Rybinskoe vodohranilishhe) [Sulphur Compounds in Bottom Sediments of Freshwater Reservoirs (Northern Dvina estuary and Rybinsk Reservoir)] / N.M. Kokryatskaya, I.I. Volkov, T.P. Demidova [et al.] // Litologija i poleznye iskopaemye [Lithology and Mineral Resources]. — 2003. — № 6. — P. 647-659. [in Russian]
4. Kokrjatskaja N.M. Sezonnnye biogeohimicheskie i mikrobiologicheskie issledovanija malyh ozer taezhnoj zony severo-zapada Rossii (Arhangel'skaja oblast') [Seasonal Biogeochemical and Microbiological Studies of Small Lakes of the Taiga Zone of North-West Russia (Arkhangelsk Oblast)] / N.M. Kokryatskaya, S.A. Zabelina, A.S. Savvichev [et al.] // Vodnye resursy [Water Resources]. — 2012. — Vol. 39. — № 1. — P. 78-91. [in Russian]
5. Titova K.V. Soedinenija sery v vode i donnyh osadkah malyh ozer jugo-zapada Arhangel'skoj oblasti [Sulphur Compounds in Water and Bottom Sediments of Small Lakes in the South-West of Arkhangelsk Oblast] / K.V. Titova, N.M. Kokryatskaya // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Estestvennye nauki [Bulletin of Moscow State Regional University. Natural Sciences]. — 2013. — № 2. — P. 101-105. [in Russian]
6. GOST 2874-82. Voda pit'evaja. Gigienicheskie trebovanija i kontrol' za kachestvom [GOST 2874-82. Drinking Water. Hygienic Requirements and Quality Control]. — Introduced 1985-01-01. — М.: Publishing House of Standards, 1985. — 7 p. [in Russian]
7. Titova K.V. Optimizacija metodiki opredelenija rastvorenogo zheleza s ispol'zovaniem ferrozina v presnovodnyh ozerah [Optimization of the Methodology of Dissolved Iron Determination Using Ferrozine in Freshwater Lakes] / K.V. Titova, N.M. Kokryatskaya // Voda. Himija i jekologija [Water. Chemistry and Ecology]. — 2013. — № 10. — P. 85-89. [in Russian]
8. Alekin O.A. Osnovy gidrohimii [Fundamentals of Hydrochemistry] / O.A. Alekin. — L.: Gidrometeoizdat, 1953. — 296 p. [in Russian]
9. Hutchinson G.E. Limnologija. Geograficheskie, fizicheskie i himicheskie harakteristiki ozer [Limnology. Geographical, Physical and Chemical Characteristics of Lakes] / D.E. Hutchinson. — М.: Progress, 1969. — 592 p. [in Russian]
10. Sovremennoe sostojanie vodnyh ob'ektov Respubliki Karelija. Po rezul'tatam monitoringa 1992-1997 gg. [Current State of Water Bodies in the Republic of Karelia. Based on the Results of Monitoring in 1992-1997] / resp. ed. N.N. Filatov. — Petrozavodsk: Karelian Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, 1998. — 188 p. [in Russian]
11. Moreva O.Ju. Biogennye jelementy v ocenke jekologicheskogo sostojanija vodnyh jekosistem Arhangel'skoj oblasti [Biogenic Elements in the Assessment of the Ecological State of Aquatic Ecosystems of Arkhangelsk Oblast] / O.Yu. Moreva, A.A. Ershova, A.V. Chupakov [et al.] // Judahinskie chtenija. Geodinamika i jekologija Barenс-regiona v XXI v. [Yudakhinskie readings. Geodynamics and Ecology of the Barents Region in the XXI century]. — Arkhangelsk: Institute of Ecological Problems of the North of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2014. — P. 1620-1625. [in Russian]
12. Moiseenko T.I. Formirovanie himicheskogo sostava vod ozer v uslovijah izmenenija okružhajushhej sredy [Formation of the Chemical Composition of Lake Waters under the Conditions of Environmental Change] / T.I. Moiseenko, N.A. Gashkina. — М.: Nauka, 2010. — 268 p. [in Russian]
13. Ivanov V.M. Rasprostranenie i geohimicheskaja dejatel'nost' bakterij v osadkah okeana [Distribution and Geochemical Activity of Bacteria in Ocean Sediments] / V.M. Ivanov // Okeanologija. Himija okeana. T. 2. Geohimija donnyh osadkov [Oceanology. Ocean Chemistry. Vol. 2. Geochemistry of Bottom Sediments] / resp. ed. I.I. Volkov. — М.: Nauka, 1979. — P. 312-349. [in Russian]
14. Matveev A.A. Ob intensivnosti processa sulfatredukcii v donnyh otlozhenijah Ladozhskogo ozera [On the Intensity of Sulfate Reduction Process in the Bottom Sediments of Lake Ladoga] / A.A. Matveev, A.A. Kuchinskene, S.A. Reznikov // Gidrohimicheskie materialy. Tom CVIII. Formirovanie gidrohimicheskogo i gidrubiologicheskogo rezhima vodnyh ob'ektov i vynos himicheskikh veshhestv rekami [Hydrochemical Materials. Volume CVIII. Formation of the Hydrochemical and

Hydrobiological Regime of Water Bodies and Removal of Chemical Substances by Rivers]. — L.: Gidrometeoizdat, 1990. — P. 153-157. [in Russian]

15. Holmer M. Sulphate Reduction and Sulphur Cycling in Lake Sediments: a review / M. Holmer, P. Storkholm // Freshwater Biology. — 2001. — Vol. 46. — Iss. 4. — P. 431-451.