

ГИДРОХИМИЯ И ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ

УДК 550.47

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СОЕДИНЕНИЙ СЕРЫ КАК РЕЗУЛЬТАТ ПРОТЕКАНИЯ ПРОЦЕССА СУЛЬФАТРЕДУКЦИИ В ПРЕСНОВОДНОМ ОЗЕРЕ СВЯТОЕ

**К. В. Титова, Н. М. Кокрятская, Т. А. Жибарева,
Е. А. Вахрамеева**

*Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики РАН
им. Н. П. Лаверова, Архангельск*

В работе представлены результаты исследований состояния пресноводного озера Святое (Коношский район Архангельской области) на основании данных по распределению соединений серы в воде и донных отложениях на мелководном участке акватории и в глубоководной зоне. Выявлен участок воздействия хозяйственно-бытовой деятельности населения на водоем, а также тенденции по изменению состояния водного объекта.

Ключевые слова: восстановление сульфатов; органическое вещество; природные воды; донные отложения; озеро Святое; Архангельская область.

**K. V. Titova, N. M. Kokryatskaya, T. A. Zhibareva, E. A. Vahrameeva.
DISTRIBUTION OF SULFUR COMPOUNDS AS A RESULT OF THE SULFATE
REDUCTION PROCESS IN FRESHWATER LAKE SVYATOE**

The results of investigations of the state of the freshwater Lake Svyatoye (Konoshsky District of the Arkhangelsk Region) based on data on the distribution of sulfur compounds in the water and sediments in the shallow- and deep-water parts of the lake are presented. The area affected by human activities and the tendencies for change in the condition of the lake were revealed.

Keywords: sulfate reduction; organic matter; natural water; bottom sediments; Lake Svyatoye; Arkhangelsk Region.

Введение

Одним из распространенных элементов в земной коре и в гидросфере является сера.

Источником ее соединений в водных объектах суши служат поверхностный сток и подземные воды. Соединения серы поступают в них как в ходе естественных природных процессов,



Рис. 1. Расположение оз. Святое и станций отбора проб

так и в результате антропогенного влияния. Наиболее термодинамически устойчивой формой серы являются сульфаты. Хотя концентрации сульфатов в пресных водоемах могут быть низкими, круговорот серы как в пространстве, так и во времени сильно влияет на многие биогеохимические процессы [Holmer, Storkholm, 2001]. Часто водоемы подвергаются антропогенному воздействию, которое не ограничивается только увеличением содержания сульфатов в воде и ее подкислением. В ряде случаев наблюдается комбинированное загрязнение водоемов сернистыми соединениями и органическими веществами, а также азотом и фосфором, что приводит к активизации

цепочки биологических процессов, приводящих к эвтрофированию водоемов, а также при дефиците кислорода, распаде органических веществ (ОВ) – к образованию сероводорода за счет активизации деятельности сульфатредуцирующих бактерий (СРБ) в возникших анаэробных условиях [Глобальный..., 1983]. Образование сероводорода, за исключением процессов гниения, является результатом протекания сульфатредукции, в основе которой лежит окислительно-восстановительная реакция окисления органических веществ СРБ за счет сопряженного восстановления сульфатов [Иванов, 1979]. Наличие H_2S в придонных слоях водного объекта обычно служит показателем

присутствия большого количества ОВ, признаком острого дефицита кислорода и наличия заморных явлений. Высокая токсичность H_2S и специфичный запах, который резко ухудшает органолептические свойства воды, делают ее непригодной для питьевого водоснабжения и других хозяйственных целей [РД..., 2010].

Донные отложения (ДО) являются неотъемлемой частью водоема, находятся в постоянном взаимодействии с водной толщей; в них накапливаются и трансформируются различные элементы, которые при изменении условий в водоеме могут выступать источниками вторичного загрязнения. Изучение содержания таких элементов в донных отложениях весьма важно не только для выяснения внутриводоемных процессов, но и для решения практических вопросов, например, выявления участков антропогенного воздействия на водоем.

Основными лимитирующими факторами развития СРБ в пресных водоемах являются наличие сульфатов, низкомолекулярных органических соединений, нейтральная реакция среды, а также восстановительные условия среды [Волков, 1984; Намсараев и др., 1995]. Объектами исследования, отвечающими подобным условиям, могут выступать малые озера, которые в основной своей массе остаются малоизученными.

Целью данной работы являлось изучение протекания в зимний период процесса сульфатредукции по распределению соединений восстановленной серы – производных сероводорода и сульфатов в воде и донных отложениях оз. Святое на его мелководной станции, для которой ранее отмечалось возникновение заморных явлений, и для сравнения – на мелководном участке водоема.

Материалы и методы

Озеро Святое – наиболее крупное в Ротковецкой системе. Длина его достигает 4,30 км, наибольшая ширина – 0,93 км, площадь водного зеркала 2,11 км². Дно неоднородное: при средней глубине водоема 3,6 м его центральная часть мелководна, здесь отмечен максимум глубин 16 м – станция Sv (N60.83708, E039.50888), а северная часть мелководна – станция Smz (N60.86018; E039.51455) – глубина 4 м [Климов и др., 2008] (рис. 1). Береговая линия сильно изрезана. Приток вод в водоем осуществляется посредством нескольких речушек (ручьев) в южной части озера. Из водоема берет свое начало речка Святица.

По берегам водоема располагаются существующие или в настоящее время заброшенные деревни Климовская, Поповка, Поздеевская, Мокеевская, Юшковская и др., объединенные в МО Климовское. До недавнего времени на севере озера функционировал маслозавод, стоки которого без очистки поступали в водоем.

Пробы воды отбирались в соответствии с ГОСТ Р 51592–2000 [2001] послойно на выбранных станциях с помощью горизонтального пластикового батометра. Вода помещалась в емкости из стекла согласно требованиям хранения. Ввиду отсутствия возможности незамедлительного выполнения аналитических работ по установлению концентраций сероводорода пробы консервировались путем предварительного добавления ацетата цинка [ГОСТ..., 2001].

Донные осадки были отобраны согласно требованиям ГОСТ 17.1.5.01–80 [1980б] в мелководной части озера и в северной относительно мелководной его части. Послойное разделение отобранных ударной грунтовой трубкой осадков проводилось с дискретностью 5 см.

Определение **сероводорода и сульфидов** выполнялось фотометрическим методом. Он основан на реакции сульфид-ионов в кислой среде с N,N'-диметил-p-фенилендиамином с образованием промежуточного серусодержащего соединения, которое переходит в лейкоформу, а затем окисляется (окислитель – Fe^{3+}) до окрашенной формы метиленового синего [РД..., 2010].

Определение **сульфатов в воде** осуществлялось хроматографически на жидкостном хроматографе LC-20 Prominence с кондуктометрическим детектором [ПНД..., 2008]. Идентификацию сульфатов проводили по времени удерживания, количественное определение – по площадям пиков методом абсолютной калибровки. Полученные результаты обрабатывали с помощью программы LC Solution.

Определение различных **форм серы в донных отложениях** проводили по методике, разработанной в лаборатории геохимии Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН [Волков, Жабина, 1980]. Методика предусматривает определение сульфидной, элементной, пиритной и органической форм серы из одной навески донных осадков.

Определение **общего и органического углерода в донных отложениях** осуществляли методом сухого сжигания с последующим газохроматографическим разделением газовой смеси на C,H,N-анализаторе фирмы Hewlett-Packard.

Определение **гранулометрического состава донных осадков** проводили в соответствии с ГОСТ 12536–79 [1980а].

Определение **прокаленного остатка (ППП) донных осадков** выполнено в соответствии с [Heiri et al., 2001]. Метод определения прокаленного остатка основан на прокаливании полученного остатка при температуре 550 ± 20 °С и его взвешивании. Предварительно пробу высушивают при температуре 105 ± 2 °С до постоянной массы.

Определение содержания **гуминовых веществ** проводили после извлечения их из высушенного и тонко растертого осадка 0,5% раствором NaOH [Методы..., 1980]. Количество гуминовых веществ оценивалось по содержанию органического углерода (дихроматное окисление со спектрофотометрическим окончанием).

Результаты и обсуждение

Озеро Святое является мезотрофным [Shirokova et al., 2013] со средним удельным водосбором, равным 59; по показателю (коэффициенту) условного водообмена ($4,6 \text{ год}^{-1}$) относится к водоемам со средним водообменом [Климов и др., 2008]. В ионном составе озерной воды преобладают Ca^{2+} и HCO_3^- , поэтому воды озера относятся к гидрокарбонатному классу кальциевой группы [Климов, 2008; Кокрятская и др., 2012], pH изменяется от 7,9 до 6,6 [Кокрятская и др., 2012]. В зимний период (март) воды содержали кислород по всей толще, в придонных слоях концентрация растворенного кислорода составляла 1–2 мг/л [Shirokova et al., 2013] и менее 1 мг/л. В результате ветрового перемешивания в летний период (июль) вода по всей толще насыщена кислородом [Кокрятская и др., 2012].

Содержание растворенного органического углерода (РОУ) изменялось от 15 до 20 мг/л для мелководной станции; отмечено устойчивое снижение (на 20–30 %) его концентрации книзу в зимний период и довольно постоянное вертикальное распределение в летнее время [Shirokova et al., 2013], как и для глубоководной станции в зимний период (20–22 мг/л). Концентрация HCO_3^- увеличивалась от поверхности до дна в среднем в 1,2 раза для обеих станций. Для северной мелководной части озера отмечено влияние стоков действовавшего до 2010 года маслозавода и деревень на его берегу – по периодической минимальной деструкции ОВ при высокой продукции [Широкова и др., 2008], заметному содержанию (до 7 КОЕ/мл) представителей бактерий группы кишечной палочки в период весеннего половодья

[Широкова, Добродеева, 2006]; значительному возрастанию количества фосфатов в придонном слое воды в зимний период [Кокрятская и др., 2012].

Среднее содержание H_2S в воде мелководной станции оз. Святое в зимний период наблюдений 2008–2009 годов составляло 8,9 мг/л и изменялось в интервале от 3,3 до 13,4 мг/л, для глубоководной – 7,0 мг/л, с интервалом от 2,4 до 15,7 мг/л. К 2016 году среднее содержание H_2S снизилось в 1,5 раза (по сравнению с 2008–2009 годами) для обеих станций, изменяясь в интервале от 3,1 до 8,6 мг/л. Содержание сульфатов, как и ранее, у дна в среднем составляло 9,6 мг/л. Снижается содержание РОУ от поверхности водоема ко дну на 30 % (до 20 мг/л в пересчете на органический углерод). Кислородом был насыщен только поверхностный метровый горизонт, к придонному слою его содержание падало практически до нуля. Таким образом, условия среды, необходимые для жизнедеятельности СРБ (анаэробная зона, pH, наличие ОВ и сульфатов), имели место, а сульфатредукция в воде протекала вяло.

Как известно, в течение вегетационного сезона экологические условия в водоемах меняются – для рассматриваемого в работе димиктического оз. Святое меженные периоды – зимний (март) и летний (июль) – характеризуются стагнацией воды, истощением кислорода в гипolimнионе и накоплением восстановленных продуктов. В донных отложениях создаются анаэробные условия (для мелководной станции возможны аэробно-анаэробные), в которых СРБ могут активизировать свою деятельность.

В результате протекания процесса сульфатредукции образуется ряд соединений восстановленной серы – продукты трансформации бактериального сероводорода, куда входят кислоторастворимые сульфиды (S^{2-}), элементная (S^0) и пиритная сера ($\text{S}_{\text{пирит}}$), также сера в составе органических соединений ($\text{S}_{\text{орг}}$) [Остроумов, 1953]. Помимо распределения содержания указанных форм серы в работе будет также оценено количество сульфатов в жидкой и твердой фазах донных отложений.

Работы по изучению сульфатредукции в донных отложениях оз. Святого были начаты ранее, результаты этих исследований представлены в ряде публикаций [Кокрятская и др., 2012; Титова, Кокрятская, 2013, 2014]. Было установлено, что анаэробный процесс сульфатредукции протекает в донных отложениях оз. Святое начиная с их поверхностных горизонтов (до 10 см), что характерно для отложений большинства пресноводных водоемов

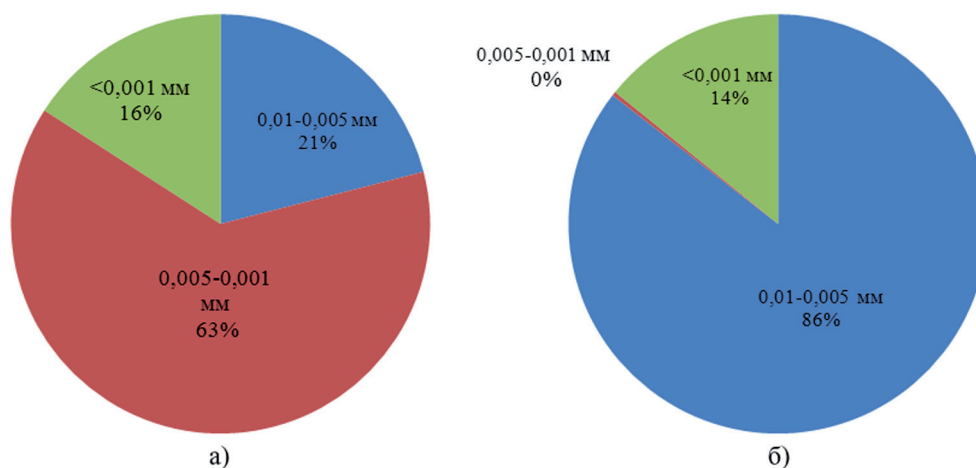


Рис. 2. Распределение фракций в составе пелитов поверхностного горизонта донных отложений мелководной (а) и глубоководной (б) станций оз. Святое

[Кузнецов, 1952; Urban et al., 1994; Намсараев и др., 1995; Li et al., 1996; Holmer, Storkholm, 2001]. Однако более явно он выражен в толще осадков (глубина более 25 см). Это подтверждается количественными данными распределения форм серы – доминирующей среди сульфидных форм здесь является пиритная (до 1%) [Титова, Кокрятская, 2014], а также данными микробиологических исследований по численности СРБ и интенсивности сульфатредукции [Забелина и др., 2012; Кокрятская и др., 2012].

Контролирующими факторами протекания сульфатредукции в поверхностном слое донных отложений являются содержание сульфатов (акцептор электронов) в иловых водах и органического вещества (донор электронов) [Глобальный..., 1983; Волков, 1984]. Исследователями установлено, что сульфатредукция в пресноводных отложениях с концентрациями сульфатов до 100 мкМ ограничена прежде всего наличием доступных для СРБ доноров электронов [Holmer, Storkholm, 2001], а в ДО оз. Святого концентрация сульфатов в жидкой фазе в среднем более 2000 мкМ. Вследствие чего лимитирующим сульфатредукцию фактором для отложений оз. Святое будет выступать количественный и качественный состав ОВ.

Донные отложения, отобранные для настоящего исследования и проанализированные ранее [Титова, Кокрятская, 2014], визуально были однотипны. Влажность поверхностного слоя отложений составляла в среднем за все годы исследования $88,03 \pm 1,90$ %. Отобранные осадки представлены в основном пелитовой фракцией. Для мелководной станции Smz в зимний период содержание этой фракции составляло 93,21 % (в расчете на сухой осадок), преобладающей была фракция 0,005–0,001 мм (63 % от количества пелитовой фракции),

далее фракция размером 0,01–0,005 мм (21 %) (рис. 2, а). Количество алевритовой фракции – 5,82 %. Для глубоководной станции Sv пелитовая фракция составляла 98,08 %, преобладающей была фракция 0,01–0,005 мм (86 %), далее < 0,001 мм – 14 % (рис. 2, б); алевритовая фракция – всего 1,51 %.

По результатам ранее проведенных исследований содержание органического углерода в поверхностном горизонте ДО глубоководной станции составляло 8,39 % (здесь и далее в расчете на сухой осадок), что сопоставимо с данными для мелководного участка.

В настоящее время содержание органического углерода в ДО для мелководной станции несколько увеличилось и составило в среднем 9,40 %, в то время как для глубоководной оно снизилось в среднем до 6,90 %. Потери при прокаливании составляют 19,70 и 21,49 % для мелководной и глубоководной станций соответственно. Таким образом, содержание ОВ еще в целом значительно – более 6 % (это органическое вещество названо в работе остаточным, то есть не израсходованным в процессах аэробной и анаэробной минерализации ОВ после его поступления в водоем). Следовательно, количественное содержание органического вещества не должно выступать в роли лимитирующего процесс сульфатредукции фактора.

Значения C/N в поверхностном слое ДО мелководной станции для зимней межени (март) составляли 9, для летней (июль) – 8; для глубоководной – 9 (март) и 7 (июль). Для поверхностных слоев воды озера в растворенном ОВ в марте были отмечены высокие значения отношения C/N (до 62), но в придонных водах оно снижается до 12; в июле – от 33 до 20 соответственно [Shirokova et al., 2013]. Подобные

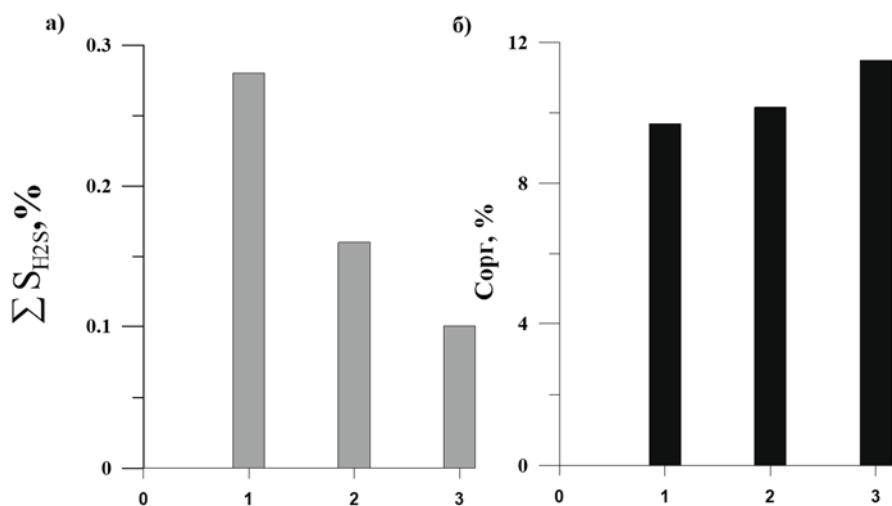


Рис. 3. Изменение содержания соединений восстановленной серы (а) и остаточного органического углерода (б) в поверхностном слое донных отложений мелководного участка в 2009 (1), 2014 (2) и 2013 (3) годах

соотношения говорят не только о поступлении аллохтонных веществ с водосбора, но и о частичной трансформации ОВ в водной толще.

В 2013 году в зимний период были зафиксированы за весь период исследований наиболее высокие значения этого показателя в донных отложениях как для мелководной станции – 11, так и для глубоководной – 24, при том, что для летней межени (июль) они были небольшими – в среднем 6 и 7 соответственно. В настоящее время значения отношения С/Н в поверхностном слое ДО обеих станций для зимней межени в среднем немного снизились.

Содержание гуминовых веществ как одних из наиболее трудноминерализуемых извлекаемых органических соединений составляло около 33 % от общего содержания ОВ для мелководной станции, около 56 % для глубоководной.

По результатам ранее выполненных исследований содержание соединений восстановленной серы (ΣSH_2S) в поверхностном горизонте донных отложений на мелководной станции озера составляло в зимний период 0,38 % (здесь и далее в расчете на сухой осадок). Доминирующей формой являлась органическая, составляющая до 92 % от общего содержания соединений восстановленной серы. Количество сульфатной серы составляло 0,24 %. В это же время для донных отложений глубоководной станции оз. Святое Sv содержание соединений восстановленной серы составляло 0,23 %; количество сульфатной серы – 0,14 %.

В настоящее время содержание соединений восстановленной серы в поверхностном слое осадков на обоих участках озера сокращается для зимнего периода в среднем в 1,5–2 раза за счет снижения количества всех ее форм.

Содержание сульфидных форм серы (кислорастворимых сульфидов и пирита) в донных отложениях мелководной станции Smz было изначально небольшим и еще несколько снизилось в настоящее время с 0,04 до 0,01–0,02 %. Количество элементарной серы также было низким (максимально до 0,05 %) и в настоящее время уменьшилось до 0,01 %. Содержание органической формы снижается в 1,5–2 раза, но остается еще довольно значительным. Преобладающим источником поступления органической серы в донные отложения может являться отмирание водной растительности и поверхностный сток. Известно, что содержание общей серы в водных растениях может быть различно и изменяться от 0,24 до 4,99 % в расчете на сухое вещество [Волков, 1984].

Для мелководного участка водоема отмечена обратная связь между содержанием органической формы серы и органического углерода – чем меньше $C_{орг}$, тем больше количество $S_{орг}$. Данная тенденция изменения в содержании остаточного органического углерода согласуется с колебаниями расхода ОВ на восстановление сульфатов (рис. 3), но следует иметь в виду, что увеличение остаточного количества органического вещества связано и со снижением расхода его на другие анаэробные процессы.

Невысокое содержание всех форм восстановленной серы, скорее всего, свидетельствует о низкой активности сульфатредукции в поверхностном горизонте донных отложений оз. Святое, несмотря на достаточное количество сульфатов в жидкой фазе отложений. Вялость протекания этого процесса как одного из терминальных анаэробных процессов минерализации ОВ связано с нехваткой доступного для

гетеротрофных анаэробных бактерий органического вещества (доноров электронов), так как для их жизнедеятельности необходимы низкомолекулярные карбоновые кислоты и спирты, простейшие сахара [Беляев и др., 1981; Волков, 1984], которые не успевают образоваться в аэробной зоне водной толщи из-за незначительной глубины озера на этом участке.

Заключение

На мелководной станции оз. Святое в зимний период создаются благоприятные условия среды, необходимые для жизнедеятельности СРБ (анаэробный гипополимнион, рН, наличие достаточного количества ОВ и сульфатов), но при этом отмечается незначительная активность протекания процесса сульфатредукции как в водной толще озера, так и в поверхностном слое донных отложений.

Вялость протекания этого процесса как одного из терминальных анаэробных процессов минерализации ОВ связано, скорее всего, с нехваткой доступных для гетеротрофных анаэробных бактерий низкомолекулярных органических соединений, которые не успевают образоваться в результате минерализации органического вещества в аэробной зоне водной толщи, а продуцирование этих соединений затруднено из-за цветности воды.

Влияние хозяйственно-бытовой деятельности населения сказывается в поступлении дополнительного количества ОВ и затратах кислорода на его окисление. На относительно мелководном участке водоема, испытывающем влияние прибрежных деревень и ранее функционировавшего здесь маслозавода, в зимний период сульфатредукция протекала немного активнее, чем на отдаленном глубоководном участке, – общее содержание соединений восстановленной серы в ДО, по значению которого косвенно можно судить об интенсивности протекания сульфатредукции, составляло в среднем 0,38 и 0,23 % (в расчете на сухой осадок) соответственно. К настоящему времени отмечено снижение содержания сероводорода в водной толще и его производных в поверхностном горизонте отложений в среднем в 1,5–2 раза по сравнению с периодом исследований 2008–2009 годов.

Авторы выражают благодарность рецензенту П. А. Лозовику за внимательное прочтение рукописи и ценные рекомендации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект мол_а № 16-35-00025) и ФАНО (№ 0410-2014-0026).

Литература

- Беляев С. С., Леин А. Ю., Иванов М. В. Роль метанообразующих и сульфатредуцирующих бактерий в процессах деструкции органического вещества // *Геохимия*. 1981. № 3. С. 437–445.
- Волков И. И. *Геохимия серы в осадках океана*. М.: Наука, 1984. 272 с.
- Волков И. И., Жабина Н. Н. Методы определения различных соединений серы в морских осадках // *Химический анализ морских осадков*. М.: Наука, 1980. С. 5–27.
- Глобальный биогеохимический цикл серы и влияние на него деятельности человека* / Под ред. акад. Г. К. Скрябина. М.: Наука, 1983. 424 с.
- ГОСТ 12536–79. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. Межгосударственный стандарт. М.: ИПК Изд-во стандартов СССР, 1980а. 15 с.
- ГОСТ 17.1.5.01–80. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. М.: Изд-во стандартов СССР, 1980б. 5 с.
- ГОСТ Р 51592–2000. Вода. Общие требования к отбору проб. М., 2001. 48 с.
- Забелина С. А., Кокрятская Н. М., Широкова Л. С., Покровский О. С., Саввичев А. С., Воробьева Т. Я., Чупаков А. В., Климов С. И. Анаэробные процессы деструкции органического вещества в озерах Архангельской области // *Материалы всерос. симпозиума с международным участием «Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах»* (Петрозаводск, 10–14 сентября 2012 г.). Петрозаводск, 2012. С. 193–196.
- Иванов М. В. Геохимическая деятельность сульфатредуцирующих бактерий // *Химия океана*. Геохимия донных осадков. М.: Наука, 1979. Т. 2. С. 327–339.
- Климов С. И., Широкова Л. С., Забелина С. А., Воробьева Т. Я., Морева О. Ю. Особенности формирования термической структуры озер Ротковецкой группы // *Современные проблемы науки и образования*. 2008. № 3. С. 9–14.
- Кокрятская Н. М., Забелина С. А., Саввичев А. С., Морева О. Ю., Воробьева Т. Я. Сезонные биогеохимические и микробиологические исследования малых озер таежной зоны Северо-Запада России (Архангельская область) // *Водные ресурсы*. 2012. Т. 39, № 1. С. 78–91.
- Кузнецов С. И. Роль микроорганизмов в круговороте веществ в озерах. М.: АН СССР, 1952. 300 с.
- Методы исследования органического вещества в океане*. М.: Наука, 1980. 343 с.
- Намсараев Б. Б., Дулов Л. Е., Земская Т. И., Карабанов Е. Б. Геохимическая деятельность сульфатредуцирующих бактерий в донных осадках озера Байкал // *Микробиология*. 1995. Т. 64, № 3. С. 405–410.
- Остроумов Э. А. О формах соединений серы в отложениях Черного моря // *Тр. Ин-та океанологии АН СССР*. 1953. Т. 7. С. 70–90.

ПНД Ф 14.1:2:4.132–98. Методика выполнения измерений массовой концентрации анионов: нитрита, нитрата, хлорида, фторида, сульфата и фосфата в пробах природной питьевой и сточной воды методом ионной хроматографии. М., 2008. 21 с.

РД 52.24.450–2010. Массовая концентрация сероводорода и сульфидов в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с N,N'-диметил-п-фенилендиамином. Ростов-на-Дону: Росгидромет, 2010. 50 с.

Титова К. В., Кокрятская Н. М. Соединения серы в воде и донных осадках малых озер юго-запада Архангельской области // Вестник Московского гос. обл. университета. 2013. № 2. С. 101–105.

Титова К. В., Кокрятская Н. М. Сульфатредукция в донных отложениях озера Святое (юг Архангельской области) // Вестник Иркутского гос. тех. университета. 2014. № 1 (84). С. 52–56.

Широкова Л. С., Добродеева Л. К. Роль бактериопланктона в процессах самоочищения Ротковецких озер (Коношский район) // Вестник Поморского университета. 2006. № 1 (9). С. 115–122.

Широкова Л. С., Воробьева Т. Я., Забелина С. А., Морева О. Ю., Климов С. И. Характеристика продукционно-деструкционных процессов малых озер Архангельской области // Современные

проблемы науки и образования, 2008. № 5. С. 11–17.

Heiri O., Lotter A., Lemeke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results // Journal of Paleolimnology. 2001. Vol. 25. P. 101–110.

Holmer M., Storkholm P. Sulphate reduction and sulphur cycling in lake sediments: a review // Freshwater Biology. 2001. Vol. 46, iss. 4. P. 431–451.

Li J. H., Takii S., Kotakemori R., Hayashi H. Sulfate reduction in profundal sediments in Lake Kizaki, Japan // Hydrobiologia. 1996. Vol. 33. P. 201–208.

Shirokova L. S., Pokrovsky O. S., Moreva O. Yu., Chupakov A. V., Zabelina S. A., Klimov S. I., Shorina N. V., Vorobieva T. Ya. Decrease of concentration and colloidal fraction of organic carbon and trace elements in response to the anomalously hot summer 2010 in a humic boreal lake // Science of the Total Environment. 2013. Vol. 463–464. P. 78–90.

Urban N. R., Brezonik P. L., Baker L. A., Sherman L. A. Sulfate reduction and diffusion in sediments of Little Rock Lake, Wisconsin // Limnol. Oceanogr. 1994. Vol. 39 (4). P. 797–815.

Поступила в редакцию 13.10.2016

References

Belyaev S. S., Lein A. Yu., Ivanov M. V. Rol' metanoobrazuyushchikh i sul'fatredutsiruyushchikh bakterii v protsessakh destruktzii organicheskogo veshchestva [The role of methane-producing and sulfate-reducing bacteria in the processes of organic matter degradation]. *Geokhimiya [Geochemistry]*. 1981. No. 3. P. 437–445.

Global'nyi biogeokhimicheskii tsikl sery i vliyanie na nego deyatel'nosti cheloveka [The global biogeochemical cycle of sulfur and human impact on it]. Ed. by acad. G. K. Skryabin. Moscow: Nauka, 1983. 424 p.

GOST 12536–79. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya granulometricheskogo (zernovogo) i mikroagregatnogo sostava. Mezghosudarstvennyi standart [Soils. Methods of laboratory granulometric (grain-size) and microaggregate distribution. Interstate standard]. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov SSSR, 1980a. 15 p.

GOST 17.1.5.01–80. Okhrana prirody. Gidrosfera. Obshchie trebovaniya k otboru prob donnykh otlozhenii vodnykh ob'ektov dlya analiza na zagryaznennost' [Nature protection. Hydrosphere. General requirements for sampling of bottom sediments of water objects for their pollution analysis]. Moscow: Izd-vo standartov SSSR, 1980b. 5 p.

GOST R 51592–2000. Voda. Obshchie trebovaniya k otboru prob [Water. General requirements for sampling]. Moscow, 2001. 48 p.

Ivanov M. V. Geokhimicheskaya deyatel'nost' sul'fatredutsiruyushchikh bakterii [Geochemical activity of sulfate-reducing bacteria]. *Khimiya okeana. Geokhimiya donnykh osadkov [Ocean Chemistry. Geochemistry of Bottom Sediments]*. Moscow: Nauka, 1979. Vol. 2. P. 327–339.

Klimov S. I., Shirokova L. S., Zabelina S. A., Vorob'eva T. Ya., Moreva O. Yu. Osobennosti formirovaniya termicheskoi struktury ozer Rotkovetskoj gruppy [Features of thermal structure formation of Rotkovets lakes]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya [Modern Problems of Sci. and Educ.]*. 2008. No. 3. P. 9–14.

Kokryatskaya N. M., Zabelina S. A., Savichev A. S., Moreva O. Yu., Vorob'eva T. Ya. Sezonnye biogeokhimicheskie i mikrobiologicheskie issledovaniya malyx ozer taezhnoi zony Severo-Zapada Rossii (Arkhangelskaya oblast') [Seasonal biogeochemical and microbiological studies of small lakes in the taiga zone of the northwestern Russia (Arkhangelsk Oblast)]. *Vodnye resursy [Water Resources]*. 2012. Vol. 39, no. 1. P. 78–91.

Kuznetsov S. I. Rol' mikroorganizmov v krugovorote veshchestv v ozerakh [The role of microorganisms in circulation of substances in lakes]. Moscow: Akademiya nauk SSSR, 1952. 300 p.

Metody issledovaniya organicheskogo veshchestva v okeane [Methods for studying organic matter in the ocean]. Moscow: Nauka, 1980. 343 p.

Namsaraev B. B., Dulov L. E., Zemskaya T. I., Karabanov E. B. Geokhimicheskaya deyatel'nost' sul'fatredutsiruyushchikh bakterii v donnykh osadkakh ozera Baikal [Geochemical activity of sulfate-reducing bacteria in bottom sediments of Lake Baikal]. *Mikrobiologiya [Microbiology]*. 1995. Vol. 64, no. 3. P. 405–410.

Ostroumov E. A. O formakh soedinenii sery v otlozheniyakh Chernogo morya [On the forms of sulfur compounds in the sediments of the Black Sea]. *Tr. In-ta okeanologii AN SSSR [Proceed. of the Inst. of Oceanology, Acad. of Sci. of the USSR]*. 1953. Vol. 7. P. 70–90.

PND F 14. 1:2:4. 132–98. Metodika vypolneniya izmerenii massovoi kontsentratsii anionov: nitrita, nitrata, khlorida, fluorida, sul'fata i fosfata v probakh prirodnoi pit'evoi i stochnoi vody metodom ionnoi khromatografii [A procedure for measuring mass concentration of anions: nitrite, nitrate, chloride, fluoride, sulfate, and phosphate in samples of natural drinking and waste water using the method of ion chromatography]. Moscow, 2008. 21 p.

RD 52.24.450–2010. Massovaya kontsentratsiya serovodoroda i sul'fidov v vodakh. Metodika vypolneniya izmerenii fotometricheskim metodom s N,N'-dimetil-n-fenilendiaminom [Mass concentration of hydrogen sulphide and sulphide in water. A measuring procedure using the photometric method with N, N-dimethyl-n-phenylenediamine]. Rostov-na-Donu: Rosgidromet, 2010. 50 p.

Titova K. V., Kokryatskaya N. M. Soedineniya sery v vode i donnykh osadkakh malykh ozer yugo-zapada Arkhangel'skoi oblasti [Sulfur compounds in water and bottom sediments of the small lakes in the southwest of Arkhangel'sk Oblast]. *Vestnik Moskovskogo gos. oblast. univ. [Bull. of the MSRU]*. 2013. No. 2. P. 101–105.

Titova K. V., Kokryatskaya N. M. Sul'fatreduktsiya v donnykh otlozheniyakh ozera Svyatoye (yug Arkhangel'skoi oblasti) [Sulfate reduction in bottom sediments of Lake Svyatoye (the south of Arkhangel'sk Oblast)]. *Vestnik Irkutskogo gos. tekhn. univ. [Bull. of the Irkutsk St. Tech. Univ.]*. 2014. No. 1 (84). P. 52–56.

Shirokova L. S., Dobrodeeva L. K. Rol' bakterio-planktona v protsessakh samoochishcheniya Rotkovetskikh ozer (Konoshskii raion) [The role of bacterial plankton in self-purification processes of Rotkovets lakes (Konoshsky district)]. *Vestnik Pomorskogo univ. [Bull. of the Pomor St. Univ.]*. 2006. No. 1 (9). P. 115–122.

Shirokova L. S., Vorob'eva T. Ya., Zabelina S. A., Moreva O. Yu., Klimov S. I. Kharakteristika produktsionno-destruktsionnykh protsessov malykh ozer Arkhangel'skoi oblasti [Description of production/destruction processes in small lakes of Arkhangel'sk Oblast]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya [Modern Problems of Science and Education]*. 2008. No. 5. P. 11–17.

Volkov I. I. Geokhimiya sery v osadkakh okeana [Sulfur geochemistry in ocean sediments]. Moscow: Nauka, 1984. 272 p.

Volkov I. I., Zhabina N. N. Metody opredeleniya razlichnykh soedineniy sery v morskikh osadkakh [Methods for determining various sulfur compounds in marine sediments]. *Khimicheskii analiz morskikh osadkov [Chemical Analysis of Marine Sediments]*. Moscow: Nauka, 1980. P. 5–27.

Zabelina S. A., Kokryatskaya N. M., Shirokova L. S., Pokrovskii O. S., Savvichev A. S., Vorob'eva T. Ya., Chupakov A. V., Klimov S. I. Anaerobnye protsessy destruktivnoy organicheskogo veshchestva v ozerakh Arkhangel'skoi oblasti [Anaerobic processes of organic substance destruction in the lakes of Arkhangel'sk Oblast]. Materialy vseros. simpoziuma s mezhdunarodnym uchastiem "Organicheskoe veshchestvo i biogennye elementy vo vnutrennikh vodoemakh i morskikh vodakh" (Petrozavodsk, 10–14 sentyabrya 2012 g.) [Proceed. of the All-Russian Symposium with the Int. Part. "Organic Substance and Biogenic Elements in Inland Waters and Seas" (Petrozavodsk, September 10–14, 2012)]. Petrozavodsk, 2012. P. 193–196.

Heiri O., Lotter A., Lemeke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology*. 2001. Vol. 25. P. 101–110.

Holmer M., Storkholm P. Sulphate reduction and sulphur cycling in lake sediments: a review. *Freshwater Biology*. 2001. Vol. 46, iss. 4. P. 431–451.

Li J. H., Takii S., Kotakemori R., Hayashi H. Sulfate reduction in profundal sediments in Lake Kizaki, Japan. *Hydrobiologia*. 1996. Vol. 33. P. 201–208.

Shirokova L. S., Pokrovskiy O. S., Moreva O. Yu., Chupakov A. V., Zabelina S. A., Klimov S. I., Shorina N. V., Vorobieva T. Ya. Decrease of concentration and colloidal fraction of organic carbon and trace elements in response to the anomalously hot summer 2010 in a humic boreal lake. *Science of the Total Environment*. 2013. Vol. 463–464. P. 78–90.

Urban N. R., Brezonik P. L., Baker L. A., Sherman L. A. Sulfate reduction and diffusion in sediments of Little Rock Lake, Wisconsin. *Limnol. Oceanogr.* 1994. Vol. 39 (4). P. 797–815.

Received October 13, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Титова Ксения Владимировна

научный сотрудник лаб. экоаналитических исследований
Федеральный исследовательский центр комплексного
изучения Арктики им. Н. П. Лаверова РАН
наб. Северной Двины, 23, Архангельск, Россия, 163000
эл. почта: ksyu_sev@mail.ru

Кокрятская Наталья Михайловна

заведующая лаб. экоаналитических исследований
Федеральный исследовательский центр комплексного
изучения Арктики им. Н. П. Лаверова РАН
наб. Северной Двины, 23, Архангельск, Россия, 163000
эл. почта: nkokr@yandex.ru

CONTRIBUTORS:

Titova, Ksenia

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research,
Russian Academy of Sciences
23 Severnaya Dvina Emb., 163000 Arkhangel'sk, Russia
e-mail: ksyu_sev@mail.ru

Kokryatskaya, Natalya

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research,
Russian Academy of Sciences
23 Severnaya Dvina Emb., 163000 Arkhangel'sk, Russia
e-mail: nkokr@yandex.ru

Жибарева Татьяна Александровна

младший научный сотрудник лаб. экоаналитических исследований

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. Н. П. Лаверова РАН
наб. Северной Двины, 23, Архангельск, Россия, 163000
эл. почта: ostrivok.vi_nt@mail.ru

Вахрамеева Елена Анатольевна

научный сотрудник лаб. экоаналитических исследований
Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. Н. П. Лаверова РАН
наб. Северной Двины, 23, Архангельск, Россия, 163000
эл. почта: vakhr-elena@yandex.ru

Zhibareva, Tatyana

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research,
Russian Academy of Sciences
23 Severnaya Dvina Emb., 163000 Arkhangelsk, Russia
e-mail: ostrivok.vi_nt@mail.ru

Vakhrameeva, Elena

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research,
Russian Academy of Sciences
23 Severnaya Dvina Emb., 163000 Arkhangelsk, Russia
e-mail: vakhr-elena@yandex.ru