



**VII Международная конференция
«Морские исследования и образование»**

Москва, 19-22 ноября 2018 г.

**VII International conference
"Marine Research and Education"**

Moscow, 19-22 November 2018

MARESEDU-2018

ТРУДЫ КОНФЕРЕНЦИИ / CONFERENCE PROCEEDINGS

Том / Volume IV (IV)

УДК [551.46+574.5](063)

ББК 26.221я431+26.38я431+28.082.40я431

T78

Труды VII Международной научно-практической конференции “Морские исследования и образование (MARESEDU-2018)” Том IV (IV): [сборник]. Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2019, 350 с.: ISBN 978-5-6041943-5-5.

Сборник «Труды VII Международной научно-практической конференции “Морские исследования и образование (MARESEDU-2018)”» представляет собой книгу тезисов докладов участников конференции, состоящую из четырех томов. Сборник включает в себя главы, соответствующие основным секциям технической программы конференции: океанология, геолого-геофизические исследования на акваториях, морская геология и геофизика, рациональное природопользование, гидрология и др. Специальным событием в программе этого года стало проведение дополнительной юбилейной конференции, организованной в честь 80-летия ББС имени Н.А. Перцова, – «Морская биология, геология и океанология – междисциплинарные исследования на морских стационарах». В четвертом томе сборника представлены тезисы докладов по направлениям: таксономия и филогения, биология развития, биология морских животных, морская микробиология, альгология и микробиология, физиология.

Все тезисы представлены в редакции авторов.

В рамках конференции участники обсудили состояние и перспективы развития комплексных исследований Мирового океана, шельфовых морей и крупнейших озер, актуальные проблемы рационального природопользования и сохранения биоразнообразия в водных пространствах, проблемы освоения ресурсов континентального шельфа, достижения науки в области морской геологии, современные подходы к исследованиям обширных акваторий дистанционными методами, проблемы устойчивого развития экосистем моря и прибрежной зоны, организацию и проведение комплексных экспедиционных исследований, преподавание «морских дисциплин», вопросы организации полевых практик студентов.

Подготовлено к выпуску издательством ООО «ПолиПРЕСС» по заказу ООО «Центр морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова».

ООО «ПолиПРЕСС»

170041, Россия, г. Тверь, Комсомольский пр-т,
д. 7, пом. II polypress@yandex.ru

ООО «Центр морских исследований МГУ
имени М.В. Ломоносова».
РФ, 119234, г. Москва, ул. Ленинские Горы, д.
1, стр. 77
(495) 648-65-58/ 930-80-58

Все права на издание принадлежат ООО
«Центр морских исследований МГУ имени
М.В. Ломоносова».

© ООО «Центр морских исследований МГУ
имени М.В. Ломоносова», 2019
© ООО «ПолиПРЕСС»

Новые данные об озере Могильном (о. Кильдин, Баренцево море): результаты экспедиций 2018 года

Краснова Е.Д.¹, Василенко А.Н.², Воронов Д.А.^{3,4}, Ефимов В.А.², Кокрятская Н.М.⁵,
Косенков А.В.⁶, Пацаева С.В.⁷, Федюк М.Л.⁷, Фролова Н.Л.², Стрелков П.П.⁸

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, биологический факультет

²МГУ им. М.В. Ломоносова, географический факультет

³Институт проблем передачи информации РАН, Москва

⁴НИИ физ-хим. биологии им. Белозерского МГУ им. М.В. Ломоносова

⁵Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. акад. Н.П. Лаверова РАН, Архангельск

⁶МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет

⁷СПбГУ, биологический факультет

Аннотация

В июле и августе 2018 г. состоялось две экспедиции на реликтовое озеро Могильное (Баренцево море, о. Кильдин) для изучения его нынешнего состояния. Действительно ли исчез пресный верхний слой воды? Изменилось ли положение границы распространения сероводорода? Почему это могло произойти? Есть ли розовый бактериальный слой, который защищал аэробную зону от ядовитого сероводорода, и какие фототрофные микроорганизмы отвечают за его цвет сегодня? Доклад посвящен результатам исследований, выполненных совместной экспедицией Московского и Санкт-Петербургского государственных университетов.

Summary

In July and August 2018, two expeditions were organized to the relict lake Mogilnoye (Barents Sea, island Kildin) to study its current condition. Has the top fresh water layer really disappeared? Has the position of the hydrogen sulfide distribution boundary changed? Why could this happen? Is there a pink bacterial layer that protected the aerobic zone from toxic hydrogen sulphide, and what kind of phototrophic microorganisms are responsible for its color today? The report is devoted to the results of research carried out by a joint expeditions of Moscow and St. Petersburg State Universities. Petersburg State Universities.

Введение

В июле и августе 2018 г. состоялись две экспедиции на остров Кильдин к озеру Могильному – меромиктическому водоёму, отделившемуся от Баренцева моря около 1-1,5 тысяч лет назад после образования каменистой перемычки. В озеро поступает пресная вода из водосборного бассейна, а сквозь перемычку при каждом приливе в озеро поступает вода из моря, благодаря чему поддерживается многослойная вертикальная структура из верхнего опресненного и нижележащего соленого слоя, который, в свою очередь, делится на верхнюю аэробную часть, нижнюю анаэробную и промежуточный слой с водой розового цвета, обусловленного массовым развитием анаэробных фототрофных бактерий.

Из меромиктических озёр России Могильное имеет самую большую историю изучения (Широкова, 2004). Она восходит к 1887 г., когда в ходе зоологических исследований в Баренцевом море С.М. Герценштейн выловил в этом пресноводном, как тогда считалось, озере треску. Анализ привезенной им воды показал, что «озерная вода представляла собой смесь одной части океанской и приблизительно 13 частей снеговой, дождевой и ключевой воды», то есть чуть более 2%. При повторном посещении выяснилось, что под пресным слоем находится соленый, где и обитает треска, и озеро было признано реликтовым. В 1893-1899 гг. на оз. Могильном проводили

исследования Н.М.Книпович, Б.Л.Риппас; в 1899, 1909 и 1921 гг. оно было подробно изучено экспедицией К.М.Дерюгина, завершившейся выпуском первой монографии об этом озере (Дерюгин, 1925). Эта работа заложила точку отсчета для последующего мониторинга озера. Повторные подробные исследования были выполнены во второй половине XX века Мурманским морским биологическим институтом и Полярным научно-исследовательским институтом морского рыбного хозяйства и океанографии им. Н. М. Книповича, что дало материал для еще двух монографий под одинаковыми названиями – «Реликтовое озеро Могильное», вышедших в 1975 г. и 2002 г.

Еще в 1960-х годах заметили, что сероводородный слой стал больше; в конце 1990-х это подтвердили и связали с загрязнением водоема бытовыми стоками. Последующие наблюдения за этим водоемом, организованные Санкт-Петербургским университетом в 2003-2007 гг. (Strelkov et al., 2014), показали, что граница распространения сероводорода продолжает подниматься, тогда как любая хозяйственная деятельность в той части острова, где находится озеро, прекращена, и его окрестности безлюдны. Кроме того, озеро осолоняется, оттого что поверхностный олигогалинный слой всё тоньше. Если в конце XIX века Книпович отмечал, что пресная зона распространяется до глубины 5,5-6,5 м, то сто лет спустя ее толщина уменьшилась до 2-3 м. Розовый слой, который находился на глубине 13 м (Исаченко, 1906), поднялся к отметке 10 м.

Повышение минерализации миксолимниона в меромиктических водоемах может приводить к исчезновению плотностного градиента, который поддерживает их структуру и, как следствие, к исчезновению меромиксии, как это только что случилось с озером Ши́ра в Хакассии (Rogozin et al., 2017). Этому предшествовала малоснежная зима, из-за чего весной в озеро поступило мало пресного стока. К следующей осени плотностная стратификация была настолько слабой, что при зимнем охлаждении поверхностного слоя конвекция смогла проникнуть на большую глубину и разрушила анаэробный слой.

Применительно к оз. Могильному это опасно по следующим причинам. В момент смешения аэробной и анаэробной вод сероводород на некоторое время распространится по всему объему водоема, и возможен замор гидробионтов, в том числе занесенной в Красную Книгу кильдинской трески, которая не встречается больше нигде в мире). Это означает безвозвратную потерю уникальных генофондов, сформировавшихся в специфических условиях озера за 1000 лет изоляции. На их восстановление потребуются века. Озеро утратит свою гидрологическую уникальность, закрепленную статусом гидрологического памятника природы федерального значения.

Для выяснения причин наблюдаемых изменений Русское географическое общество выделило грант на проект «Колыбельная трескового озера. Документация экосистемы озера Могильного (о. Кильдин, Баренцево море)», в котором приняли участие представители трех вузов: МГУ им. М.В. Ломоносова, Санкт-Петербургского университета и Мурманского арктического государственного университета. Проект предусматривает четыре экспедиции, которые должны исследовать озеро в разные сезоны.

Результаты

Первые два экспедиции подтвердили существование негативной тенденции. Соленость поверхностного слоя до глубины 2 м в июле 2018 г. была 5,4‰, в августе – 7,1‰ (рис. 1). Во время предыдущих исследований 2003-2007 гг. соленость в том же слое составляла 3-5‰, следовательно, за прошедшие 14 лет она увеличилась на две единицы. При этом мощность опресненного миксолимниона уменьшилась: в 2004 г. скачок солености начинался под глубиной 3 м, а в 2018 – под 2 м.

Отмечены некоторые изменения в стратификации оз. Могильного между июлем и августом. За прошедший месяц, кроме солености, которая увеличилась на две единицы, изменилось положение границы сероводорода и розовой прослойки: они опустились на 30 см. Параллельно вниз отступил сероводород, который в верхнем слое хемоклина мог быть был окислен анокси-

генными фототрофными бактериями или за счёт поступления кислорода с притоком аэрированной воды из моря. Измерения освещенности на разной глубине озера показали, что вода в озере очень прозрачная, но взвесь из бактерий в розовом слое полностью поглощает свет, и ниже него условия афотические. В связи с опусканием розового слоя, в августе свет проникал на большую глубину, хотя из-за низкого стояния солнца общая освещенность уменьшилась.

Измерения концентрации растворенного кислорода показали наличие слоя с его пересыщением до 133% (14 мг/л) на глубине 4,5-5 м. В этом же слое отмечено локальное повышение рН до 8,5, которое свидетельствует о падении концентрации иона карбоната при активном фотосинтезе.

В профилях солености обращают на себя внимание два скачка: один крутой и широкий между 3 м и 7 м, где соленость возрастает более, чем на 20 единиц, и второй небольшой между 10 м и 12 м с увеличением солености на 1,5 единицы. Второй скачок позволяет выделить еще одну водную массу, придонную, с максимальной для озера соленостью 29,9. Интересно, что по всему столбу воды, включая придонный слой, соленость меньше, чем в море (33‰). В аналогичных Могильному меромиктических водоемах, частично изолированных от Белого моря, соленость придонного слоя часто равна или даже превышает соленость прилегающей морской акватории (Краснова и др., 2014).

Наблюдаемые различия могут быть объяснены тем, что, в беломорские водоемы вода из моря поступает не через фильтрующую дамбу, а переливается через порог поверху и попадает в озеро неизменной. Фильтрующая дамба озера Могильного служит своего рода смесителем, где свежая морская вода смешивается с той, что уже есть в теле дамбы, и поступает в озеро разбавленной. Подтверждением служит результат определения солености воды из струй между камнями дамбы, поступающих в озеро во время прилива. Это исследование было выполнено с помощью водолазного метода. Соленость в струе оказалась 14,4-19‰, вместо ожидаемых 33‰. Из внешней стороны дамбы во время отлива вытекает вода с соленостью 16-28,5‰, что говорит как о существовании градиента солености внутри тела дамбы, так и о смешении в ней вод с разной соленостью.

Химический анализ проб воды с разной глубины показал, что сероводород в небольших количествах появился на глубине 7,7 м, и его концентрация постепенно возрастала. Наибольшие значения концентрации иона сульфида 104-136 мг/л зарегистрированы в придонной воде с наибольшей соленостью на глубине 11-15 м. По сравнению с 1999-2001 гг. (Реликтовое озеро..., 2002) его уровень остался прежним.

Мы также задались вопросом, какие бактерии придают окраску розовому слою. Первый микробиолог, который исследовал бактериальное сообщество оз. Могильного, Б.Л.Исаченко, обнаружил в этом слое, который тогда находился на глубине 13 м, подвижных пурпурных серных бактерий (Исаченко, 1914). Это представление закрепилось в научной среде. Однако в ходе исследований Института микробиологии им. С.Н. Виноградского (Горленко и др., 1975) было показано, что в хемоклине оз. Могильного в массовом количестве развиваются коричнево-окрашенные зеленые серные бактерии, среди которых доминировали *Chl. phaeovibrioides*, с максимальной численностью до 10^6 кл./мл на глубине 8,75 м. Пурпурных серобактерий *Thiocystis violacea* и *Thiocapsa roseopersicina* там было на два порядка меньше. Исследования 1999 и 2001 гг. подтвердили доминирование в хемоклине озера Могильное коричнево-окрашенных зеленых серных бактерий, а пурпурные встречались лишь в виде единичных клеток (Лунина и др., 2005). Таким образом, за прошедшие сто лет произошла смена доминантов. Как пурпурные, так и зеленые серные бактерии играют в водоеме одну и ту же роль: они используют сероводород для фотосинтеза, окисляют его, и тем самым защищают вышележащую аэробную экосистему от диффузии этого ядовитого агента. Важные экологические различия между ними состоят в том, что: 1) пурпурным бактериям нужно больше света (50-300 люкс), тогда как зеленые могут довольствоваться считанными люксами; 2) пурпурные могут выдерживать присутствие кислорода в

небольших количествах, тогда как зеленые – строгие анаэробы. Вопрос о том, какие именно бактерии придают розовому слою окраску сейчас, не только таксономический, но и экологический: бактерии служат индикаторами конкретных абиотических условий.

Мы выполнили экспресс-анализ методом спектрофлуориметрии, отработанном прежде на беломорских меромиктических водоемах (Krasnova et al., 2015; Zhiltsova et al., 2018). При возбуждении флуоресценции светом с длиной волны 440 или 525 нм, первый максимум полосы испускания флуоресценции бактериохлорофила (Бхл) приходился на диапазон 740-750 нм, что однозначно указывает на присутствие коричнево-окрашенных зеленых серных бактерий. В спектрах поглощения проб воды наблюдали пик поглощения с максимумом 726 нм, что типично для хлоросомного Бхл зеленых серных бактерий. При этом полос поглощения Бхл *a* с длинами волн более 830-890 нм, характерной для пурпурных бактерий, мы не зарегистрировали. Концентрации фототрофных бактерий в пробе выше и ниже хемоклина (глубина 7,8 и 8,0 м) различаются на порядок – выше хемоклина количество бактерий существенно снижается.

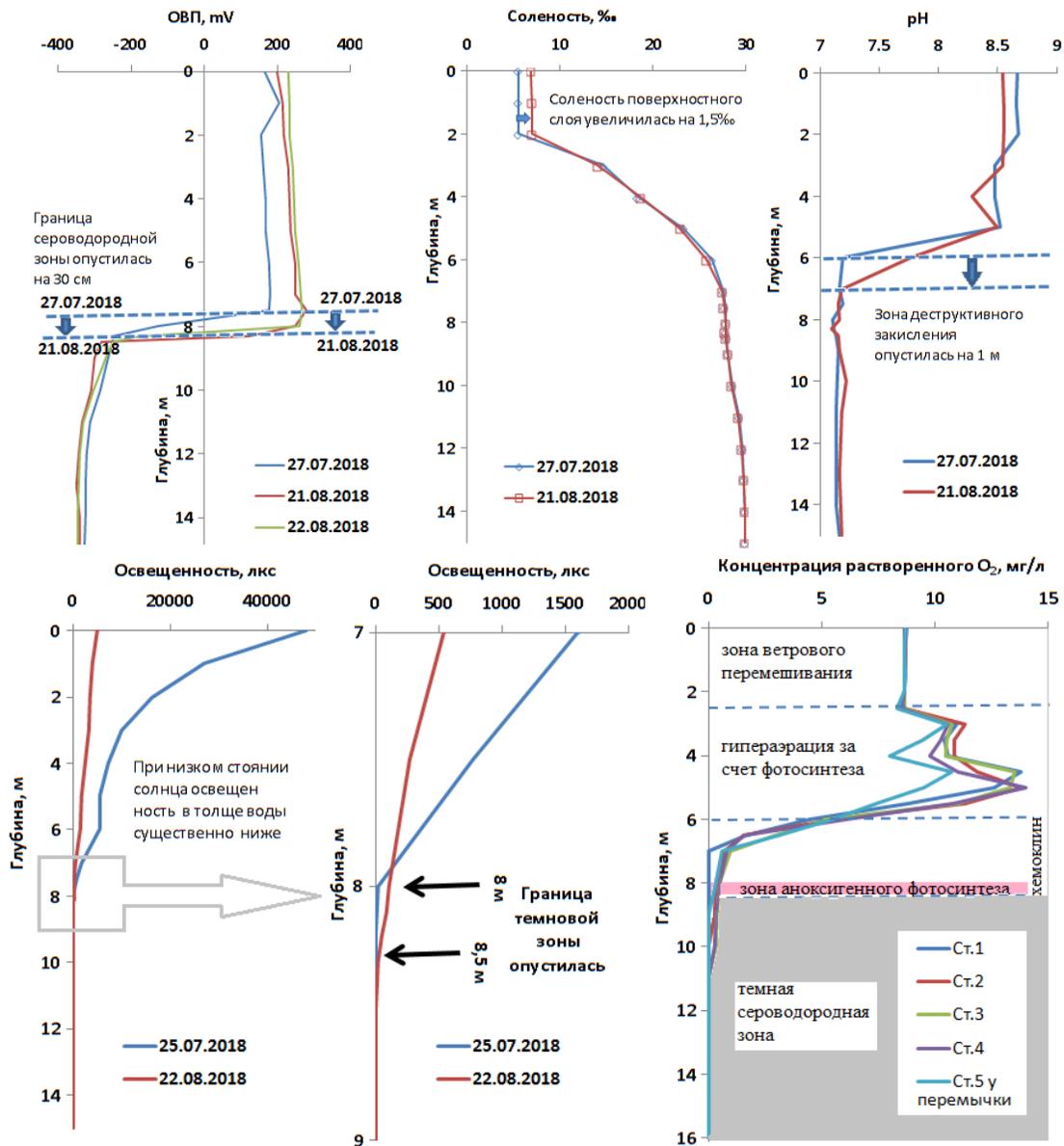


Рис. 1. Сравнение вертикальных профилей физико-химических параметров в июле и августе 2018 г.

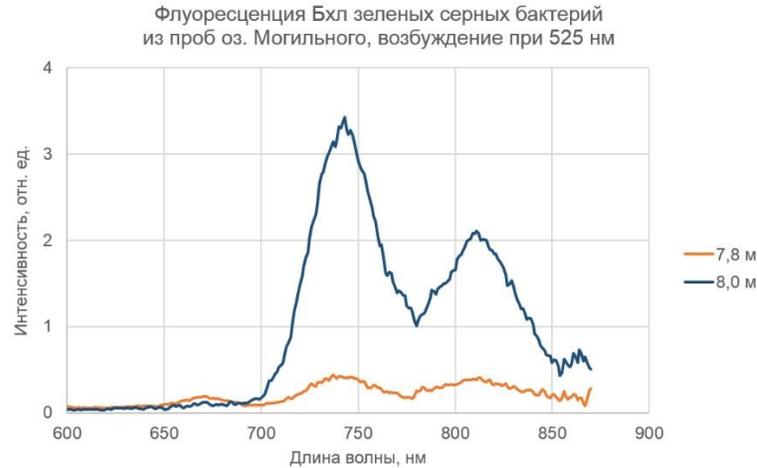


Рис. 2. Спектры флуоресценции в области свечения бактериохлорофилла (Бхл) для проб из оз. Могильного с глубины 7,8 м и 8 м.

Обсуждение

Устойчивость многослойной структуры прибрежных меромиктических озер обеспечивается балансом между пресным стоком с водосборного бассейна и поступлением воды из моря. Если последний источник, определяемый приливами и отливами, действует единообразно в течение года, то распределение верхнего слоя в основном приурочено к весеннему сезону за счёт вешних вод и таяния льда (в отличие от Баренцева моря озеро зимой покрывается толстым слоем льда). Летом солёность поверхностного слоя воды постепенно увеличивается («Реликтовое озеро Могильное...», 1975). Лето 2018 г. выдалось особенно засушливым, ручьи и родники пересохли, поэтому солёность поверхностного слоя возросла по сравнению с другими годами, когда проводились наблюдения. Участникам экспедиции не удалось найти ни одного водотока, который бы питал бы озеро пресной водой. Более того, некоторые ручьи, вытекающие из другого озера, пресного, расположенного на водоразделе, не формируют русла, а прямиком уходят в грунтовые воды. При такой ситуации озеро явно испытывает дефицит пресной воды.

Существенную роль также могут играть ветра: усиление ветровой активности может привести к увеличению зоны перемешивания. И, наконец, штормовая активность, усиление которой в последнее регистрируют во всех морях, в том числе в арктических, может влиять на проницаемость отгораживающей озеро перемычки. Во всем этом еще предстоит разобраться.

Благодарности

Работа поддержана Русским Географическим обществом (проект «Колыбельная трескового озера. Документация экосистемы озера Могильного (о. Кильдин, Баренцево море)», № 13/2018-Р) и РФФИ (гранты № 16-05-00548 и 16-04-00723).

Список литературы

- Дерюгин К.М.* Реликтовое озеро Могильное (остров Кильдин в Баренцовом море) // Труды Петергофского естественно-научного института. – №2. – Л.: 1925.
- Горленко В.М., Вайнштейн М.Б., Качалкин В.И.* Микробиологические процессы // Реликтовое озеро Могильное/ Под ред. Гуревича В.И., Цеев Р.Я. – Л.: Наука, 1975. – С. 188-197.
- Исаченко Б.Л.* Исследование над бактериями Северного Ледовитого океана // Тр. Мурманской научной промысловой экспедиции 1906 г. – СПб., 1914.
- Краснова Е.Д., Демиденко Н.А., Пантюлин А.Н., Фролова Н.Л., Ефимова Л.Е., Широкова В.А.* Термический и ледовый режим реликтовых водоемов, отделяющихся от Белого моря // Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей. VIII Международная

научно-практическая конференция (Москва, РУДН, 24-27 ноября 2014 г. – Т. 1. –М.: 2014. – С. 430-443.

Лунина О.Н. Биоразнообразие аноксигенных фототрофных бактерий и их роль в продукции органического вещества в меромиктических водоемах: автореферат дис. кандидата биологических наук: Ин-т микробиологии РАН. – М., 2008. – 26 с.

Лунина О.Н., Горленко В.М., Попова О.А., Акимов В.Н., Русанов И.И., Пименов Н.В. Сезонные изменения структуры сообщества аноксигенных фототрофных бактерий реликтового озера Могильное (о. Кильдин, Баренцево море). // *Микробиология*. – 2005. – Т. 74, №5. – С. 677-686.

Реликтовое озеро Могильное (исследования 1997–2000 гг.). – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2002. –163 с.

Реликтовое озеро Могильное. – Л.: Наука, 1975. – 250 с.

Широкова В.А. Карл Шмидт и загадка озера Могильного (гидробиологический аспект) // Современная биогеография. Материалы Второй всероссийской научной телеконференции / Под ред. А.А.Лиховида, В.К.Рахилина. – М.–Ставрополь: ИИЕТ РАН; Изд-во СГУ, 2004. – С. 24-29.

Krasnova E.D., Kharcheva A.V., Milyutina I.A., Voronov D.A., Patsaeva S.V. Study of microbial communities in redox zone of meromictic lakes isolated from the White Sea using spectral and molecular methods // *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*. – 2015. – Vol. 95, No. 8. – P. 1579-1590.

Rogozin D.Y., Tarnovsky M.O., Belolipetskii V.M., Degermendzhi A. Disturbance of meromixis in saline Lake Shira (Siberia, Russia): Possible reasons and ecosystem response // *Limnologica – Ecology and Management of Inland Waters*. –2017. – Vol. 66. – P. 12-23.

Strelkov P., Shumatova N., Fokin M., Usov N., Fedyuk M., Malavenda S., Korsun S. (). Marine Lake Mogilnoe (Kildin Island, the Barents Sea): one hundred years of solitude // *Polar Biology*. – 2014. – Vol. 37, No. 3. – P. 297-310.

Zhiltsova A.A., Kharcheva A.V., Krasnova E.D., Lunina O.N., Voronov D.A., Savvichev A.S., Gorshkova O.M., Patsaeva S.V. Spectroscopic study of green sulfur bacteria in stratified water bodies of the Kandalaksha gulf of the White Sea // *Atmospheric and Oceanic Optics*. – 2018. – Vol. 31, No. 4. – P. 390-396.