

ЖИВЫЕ РЕЛИКТЫ: ПРИБРЕЖНЫЕ ОЗЁРА, ОТДЕЛЯЮЩИЕСЯ ОТ БЕЛОГО МОРЯ

Е.Д. Краснова*, Д.А. Воронов**, С.В. Пацаева***, Н.Л. Фролова****

*Биологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, krasnova@mail.ru

** ИППИ РАН и Ин-т физ.-хим. биологии им. Белозерского МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, da_voronov@mail.ru

*** Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, spatsaeva@mail.ru

**** Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, frolova_nl@mail.ru

LIVING RELICTS: COASTAL LAKES SEPARATED FROM THE WHITE SEA

E.D. Krasnova*, D.A. Voronov**, S.V. Patsaeva*, N.L. Frolova*

*Biological Faculty of M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow

**Institute for Information Transmission Problems Russian Academy of Science and M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow

*** Faculty of Physics of M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow

**** Faculty of Geography of M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow

Аннотация. Работа посвящена исследованию прибрежных стратифицированных водоёмов, находящихся на разных стадиях изоляции от Белого моря. По данным многолетнего мониторинга описаны особенности их гидрологических циклов, отслежены сезонные и многолетние изменения в вертикальной структуре.

Ключевые слова: отделяющиеся от моря водоёмы, стратификация, меромиксия, Белое море, биота, микроорганизмы, хемоклин.

Введение

Исследование меромиктических водоёмов – одна из актуальных задач науки. Они, в некотором смысле – модель тех условий, при которых в доисторическом прошлом происходила глобальная смена древней анаэробной биоты Земли на аэробную, вызванная деятельностью фотосинтезирующих организмов.

Объекты и методы

На побережье Белого моря в результате быстрого постгляциального поднятия берега образовалось множество меромиктических водоёмов, в разной степени изолированных от моря. На базе Беломорской биостанции МГУ с 2010 г. проводятся их комплексные исследования с участием гидрологов, гидробиологов, гидрохимиков и физиков, а также студентов и аспирантов нескольких факультетов МГУ [1, 2]. В общей сложности выявлено более двух десятков таких водоёмов. Рассматривая их как последовательные стадии изоляции, можно реконструировать ход гидрологической и экологической эволюции водоёма. Через эти стадии проходили все водоёмы, которые некогда имели связь с морем, а потом превратились в пресные озёра. Этот этап их прошлого записан в донных осадках в виде слоя из тонких чередующихся полос, светлых и темных, сформированных в летнее и зимнее время. Прибрежные стратифицированные водоёмы, частично изолированные от моря – это современное воплощение той стадии, когда формировались подобные слоистые осадки.

Нами составлена база данных с гидрологическими, гидрохимическими, гидробиологическими, геодезическими и картографическими материалами о 37 водоёмах, находящихся на разных стадиях изоляции от моря. По данным

многолетнего мониторинга описаны особенности их гидрологических циклов, последовательность в типологическом ряду по степени изоляции, отслежены сезонные и многолетние изменения в вертикальной структуре, распределение планктона и состав бентоса.

Обсуждение результатов

Превращение морского залива в пресное озеро занимает несколько столетий [5]. Перенос мелких фракций грунта вдоль берега и работа льда могут ускорить отделение водоёма на 150-250 лет [3]. Есть три распространенных варианта образования прибрежных озёр: 1) если у залива на выходе в море есть остров, то отмели по сторонам острова по мере поднятия дна соединяются с берегом и замыкают водоём (из известных нам водоемов так образовались, например, озёра Кисло-Сладкое и Трёхцветное); 2) цепь остаточных озёр формируется на месте пролива между двумя большими участками суши, который при поднятии дробится на несколько водоёмов (лагуна на Зелёном мысе, оз. Нижнее Ершовское); 3) отчленение фрагмента эстуария (озера Еловое, Мероламбина, Вонючее в губе Чупа). Кроме того, изоляция может быть искусственной или ускоренной из-за строительных работ (губа Канда, озера Б. Хрусломены, Савино-Канозеро, отчасти Мероламбина).

Порог, отгораживающий лагуну от моря, постепенно поднимается выше уровня малой воды. Приливо-отливные колебания в водоёме ослабевают и становятся асимметричными, с коротким приливом и долгим отливом. В дальнейшем, когда порог поднимется выше среднего уровня полной воды, ежедневные приливы станут невозможными. На этом этапе забросы морской воды могут происходить в сизигию, когда приливы особенно большие, что случается каждый лунный месяц. В таком режиме существует озеро Кисло-Сладкое. При дальнейшем подъеме порога поступление морской воды может случаться при осенних высоких приливах и штормовых нагонах (как в оз. Н. Ершовском), что случается в среднем один-два раза в год. Среди хорошо изученных нами озёр есть такое, в котором забросы случаются с многолетними интервалами – это озеро Трёхцветное. Отделяющий его порог поднят над уровнем моря почти на метр, и для заплеска нужно совпадение высокого прилива, фазы сизигии и сильного ветрового нагона, которое случается раз в несколько десятилетий. В южной части губы Канда есть плёс под названием Федосеевский, в котором хранится реликтовая морская вода, попавшая туда до строительства железнодорожной дамбы в 1916 г.

Усиление изоляции проявляется не только в ослаблении связи с морем. Водоём становится ловушкой для пресного стока, поверхностный слой разбавляется в пределах зоны ветрового перемешивания, которая в небольших водоёмах ограничена глубиной 1 м (озера Кисло-Сладкое, Еловое, Тонисоар, лагуна на Зелёном мысе), в больших – 1,5-2 м (оз. Н. Ершовское и Б. Хрусломены). В лагунах эстуарного типа (оз. Мероламбина) пресный сток «скачивается» по поверхности воды, практически не смешиваясь с нижней солёной водой, которая при каждом приливе поступает в озеро.

Опреснённый верхний и солёный нижний слои воды разделены галоклином, который в изучаемых нами водоемах не совпадает с хемоклином, под которым мы понимаем redox interface – границу раздела аэробной и анаэробной зон. Важная особенность прибрежных меромиктических водоёмов – галоклин находится выше хемоклина, и между ними есть солёный аэробный слой воды, который обеспечивает зону обитания морского планктона и бентоса. Своим существованием он обязан забросам морской воды. Верхний слой изолирует основную толщу водоёма от атмосферы, благодаря чему под пикноклином в теплое время года возникает парниковый эффект: там может накапливаться тепло и появляется погружённый максимум температуры. Там же накапливается кислород, выработанный фитопланктоном, вплоть до 300% пересыщения. Фитопланктон здесь обильный и совершенно другой по составу, чем в поверхностном слое [7].

Застой воды в донном углублении водоема благоприятствует накоплению органики и бактериальным процессам, которые, по мере изоляции, играют всё большую роль в экосистеме водоёма. Один из определяющих бактериальных процессов – восстановление серы из сульфатов морской воды до сульфида, в результате чего накапливается сероводород. Чем сильнее изоляция, тем больше в водоёме концентрация сероводорода. Кроме того, поскольку сульфаты расходуются на бактериальную сульфатредукцию, меняется анионный состав воды: сульфатно-хлоридное отношение смещается в сторону хлоридов. Аналогичным образом меняется сульфатно-карбонатное соотношение. Такие изменения в ионном составе зарегистрированы в оз. Трёхцветном, Б. Хрусломены и в губе Канда, где под пресной водой на дне хранится соленая линза столетней давности, переработанная бактериями.

Между анаэробной и аэробной зонами расположен хемоклин. На ранних стадиях изоляции (в озерах Савино-Канозеро, Мероламбина, Тонисоар) он широкий, и переход плавный. На следующем этапе эволюции озера в хемоклине возникает цветной слой, главный компонент которого – аноксигенные фототрофные бактерии (АФБ), которые окисляют сероводород, используя его при фотосинтезе вместо молекулы воды, и выделяют не кислород, а серу. Во всех беломорских водоёмах в цветном бактериальном слое доминируют зелёные серные бактерии *Chlorobium phaeovibrioides*, тогда как пурпурные бактерии, которые во многих континентальных водоёмах отвечают за розовый цвет хемоклина, здесь – минорная группа [8].

Бактериальный слой может быть зелёного цвета, если в нем доминирует зелёно-окрашенная форма *Ch. phaeovibrioides*, или красноватого, если преобладает коричнево-окрашенная форма этого же вида. Эти две формы отличаются набором пигментов, участвующих в фотосинтезе, и поэтому их можно отдельно определять в смеси.

В экологической структуре меромиктических водоемов хемоклину принадлежит важная роль. Это самая продуктивная зона, к которой приурочены скопления микроорганизмов и некоторых планктонных беспозвоночных. Первичная продукция аноксигенного фотосинтеза в таких водоёмах

превышает таковую от кислородного, выполняемого фитопланктоном в аэробной зоне [4].

Для экспресс-оценки состава автотрофных организмов мы разработали новые методы, включая метод определения вклада разных форм АФБ в общий пул бактериохлорофилла по спектрам флуоресценции и метод определения концентрации хлоросомного бактериохлорофилла по спектрам поглощения клеток зелёных серобактерий в пробах природной воды без экстрагирования пигментов [6].

Отбор проб воды в зоне с резкими градиентами физико-химических параметров требует особых приспособлений, которые можно очень точно позиционировать по глубине и очень избирательно отбирать конкретный слой воды в пределах одного или нескольких см. Мы сконструировали оригинальное устройство для отбора проб воды с шагом 2,5 см, которое отличается от аналогов большей дробностью, меньшим объёмом каждой пробы и иным механизмом подачи усилия для раскрытия шприцов. Благодаря нему мы смогли описать последовательность из нескольких сообществ микроорганизмов по вертикали в пределах 10-сантиметрового слоя в хемоклине.

Выше редокс-интерфейса в микроаэробной части хемоклина в массе развиваются миксотрофные эукариотные микроорганизмы (7). В одних водоёмах это криптофитовые жгутиконосцы, в других – эвгленовые, в роли миксотрофных организмов могут выступать инфузории с фотосинтезирующими эндосимбионтами внутри. В гетеротрофной фазе питания миксотрофы могут использовать первичную продукцию АФБ и передавать ее вверх по трофической цепи к зоопланктону вышележащего аэробного сообщества, который тоже концентрируется вблизи хемоклина, сверху от него.

Выводы

Беломорские прибрежные солёные озёра – уникальный объект для изучения взаимодействия биотических и абиотических компонентов экосистемы, поскольку основные химические агенты, определяющие остроту градиента, имеют биологическое происхождение, в отличие, например, от Чёрного моря или альпийских меромиктических озёр, где кроме биогенного возможен и приток сероводорода из земных недр. Созданный бактериями сероводород используется АФБ – основными производителями первичной продукции в беломорских отделяющихся водоёмах. Зелёные серные бактерии не пропускают сероводород вверх и защищают вышележащее сообщество от этого яда, а кроме того, заостряют окислительно-восстановительный градиент. Бактериальная суспензия не пропускает вниз свет, что препятствует прогреву нижележащей водной массы. Из-за этого плотность воды в анаэробной зоне оказывается больше, а стратификация – более устойчивой.

Благодарности

Работа поддержана РФФИ (грант №19-05-00377).

Литература

- [1] Краснова Е.Д., Демиденко Н.А., Пантюлин А.Н., Фролова Н.Л., Ефимова Л.Е., Широкова В.А. Термический и ледовый режимы реликтовых водоемов, отделяющихся от Белого моря. / Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей (Труды VIII Междунар. науч.-практ. конф.). М.: Российский университет дружбы народов, 2014, с. 430-443.
- [2] Краснова Е.Д., Пантюлин А.Н., Белевич Т.А., Воронов Д.А., Демиденко Н.А., Житина Л.С., Ильяш Л.В., Н.М. Кокрятская, О.Н. Лунина, М.В. Мардашова, Прудковский А.А., Саввичев А.С., Филиппов А.С., Шевченко В.П. Комплексные исследования отделяющихся водоемов на разных стадиях изоляции от Белого моря в марте 2012 г. / Океанология, 2013. Т. 53, №5. С. 714-717.
- [3] Репкина Т.Ю., Ефимова Л.Е., Косевич Н.И., Шиловцева О.А., Шевченко Н.В. Динамики фиардово-шхерных берегов по результатам мониторинга на ББС МГУ в 2009-2016 гг. (губа Ругозерская Кандалакшского залива Белого моря). / Мат-лы всерос. науч. конф. «Поздне- и постгляциальная история Белого моря: геология, тектоника, седиментационные обстановки, хронология». – М.: КДУ, Университетская книга, 2018. С. 115-121.
- [4] Саввичев А.С., Лунина О.Н., Русанов И.И., Захарова Е.Е., Веслополова Е.Ф., Иванов М.В. Микробиологические и изотопно-геохимические исследования озера Кисло-Сладкое – меромиктического водоема в Кандалакшском заливе Белого моря. / Микробиология, 2014. 83(2). С. 191-203.
- [5] Субетто Д.А., Шевченко В.П., Лудикова А.В., Кузнецов Д.Д., Сапелко Т.В., Лисицын А.П., Ван-Биек П., Суот М., Субетто Г.Д. Хронология изоляции озер Соловецкого архипелага и скорости современного озерного осадконакопления / Докл. Акад. наук. Сер. геол. М.: Наука, 2012. Т. 446, № 2. С. 183-190.
- [6] Харчева А.В., Жильцова А.А., Лунина О.Н., Краснова Е.Д., Воронов Д.А., Саввичев А.С., Пацаева С.В. Флуоресценция бактериохлорофиллов зеленых серных бактерий в анаэробной зоне двух природных водоемов. / Вестник Московского университета. Сер. 3: Физика, астрономия, 2018, (4). С. 40-45.
- [7] Krasnova E.D., Kharcheva A.V., Milutina 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 in special issue – EMBS European Marine Biology Symposium, 2015, 95 (8). Pp. 1579-1590.
- [8] Savvichev A.S., Babenko V.V., Lunina O.N., Letarova M.A., Boldyreva D.I., Veslopolova E.F., Demidenko N.A., Kokryatskaya N.M., Krasnova E.D., Gaisin V.A., Kostryukova E.S., Gorlenko V.M., Letarov A.V. Sharp water column stratification with an extremely dense microbial population in a small meromictic lake, Trekhtzvetnoe / Environmental Microbiology, 2018, 20(10). Pp. 3784-3797.

S u m m a r y. The work is devoted to the study of coastal stratified water bodies at different stages of isolation from the White Sea. According to the long-term monitoring, the features of their hydrological cycles, the sequence in the typological series by the degree of isolation, seasonal and perennial changes in the vertical structure are traced.

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. А. И. ГЕРЦЕНА
ФАКУЛЬТЕТ ГЕОГРАФИИ
НОЦ «ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ»
ИНСТИТУТ ОЗЕРОВЕДЕНИЯ РАН
РУССКОЕ ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО

RUSSIAN STATE PEDAGOGICAL UNIVERSITY OF A.I. HERZEN
FACULTY OF GEOGRAPHY
REC «ECOLOGY AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT»
LIMNOLOGY INSTITUTE OF RAS
RUSSIAN GEOGRAPHIC SOCIETY

География: развитие науки и образования

Geography: Development of Science and Education

I

Коллективная монография
по материалам Всероссийской, с международным участием,
научно-практической конференции LXXII Герценовские чтения
18-21 апреля 2019 года,
посвященной 150-летию со дня рождения В.Л. Комарова,
135-летию со дня рождения П.В. Гуревича,
90 -летию со дня рождения В.С. Жекулина

Collective monograph
on the materials of annual All-Russian with the international participation,
Scientific-Practical Conference LXXII Herzen readings 18-21 April 2019,
devoted to the 150 anniversary since the birth of V.L. Komarov,
to the 135 anniversary since the birth of P.V. Gurevich,
to the 90 anniversary since the birth of V.S. Zhekulin

Санкт-Петербург
2019

Рецензенты:

Д.В. Севастьянов, Ал.А. Григорьев

Ответственные редакторы:

С.И. Богданов, Д.А. Субетто, А.Н. Паранина

Редакционная коллегия:

*Л.Б. Вампилова, Д.А. Гдалин, Ю.Н. Гладкий, С.В. Ильинский, Е.Д. Краснова, В.Ф. Куликов,
С.И. Махов, Л.Г. Мачавариани, В.Г. Мосин, Е.М. Нестеров, Л.А. Пестрякова, В.Д. Сухоруков*

Техническое редактирование:

*А.С. Баранов, М.А. Бахир, В.В. Брылкин, Л.Б. Вампилова, Р.В. Паранин, А.Н. Паранина,
Е.Д. Краснова, В.Ф. Толкачева*

География: развитие науки и образования. Том I. Коллективная монография по материалам ежегодной Всероссийской с международным участием научно-практической конференции LXXII Герценовские чтения, посвященной 150-летию со дня рождения В.Л. Комарова, 135-летию со дня рождения П.В. Гуревича, 90-летию со дня рождения В.С. Жекулина, Санкт-Петербург, РГПУ им. А.И. Герцена, 18-21 апреля 2019 года / Отв. ред. С.И. Богданов, Д.А. Субетто, А.Н. Паранина. – СПб.: Изд-во Астерион, 2019. – с. 547.

Geography: development of science and education. Part I. Collective monograph on materials of the annual All-Russian with the international participation, scientific and practical conference LXXII Gertsenovskiy readings, devoted to the 150 anniversary since the birth of V.L. Komarov, to the 135 anniversary since the birth of P.V. Gurevich, to the 90 anniversary since the birth of V.S. Zhekulin. St. Petersburg, RSPU of A.I. Herzen, on April 18-21, 2019 / by edition S.I. Bogdanov, D.A. Subetto, A.N. Paranina. – St. Petersburg: Asterion, 2019. – с. 547.

Коллективная монография «География: развитие науки и образования» представляет новые результаты развития географии и географического образования в России и других странах. Монография отражает основные направления работы ежегодной научно-практической конференции Герценовские чтения, проведенной на факультете географии РГПУ им. А.И. Герцена 18-21 апреля 2019 г. Монография адресуется представителям географической науки и образования, специалистам в области географии, смежных естественных и гуманитарных наук. Материалы сгруппированы в два тома. Том I включает вступительную главу и разделы: 1. физическая география: направления, методы и междисциплинарные исследования; 2. полярные исследования и пути освоения Арктики; 3. исследования меромиктических озёр России; 4. современные проблемы теоретической и прикладной лимнологии и гидрологии; 5. эволюционная и историческая география, ритмика процессов и явлений. Том II включает разделы: 1. геоэкология, природопользование и охрана окружающей среды; 2. социально-экономические системы и географические аспекты глобализации; 3. развитие географического образования; 4. регионоведение, краеведение, туризм, природное и культурное наследие.

Материалы публикуются в авторской редакции

978-5-00045-696-5

978-5-00045-697-2

© Издательство РГПУ им. А. И. Герцена, 2019

© Институт озероведения РАН, 2019

© РГО, 2019

© Авторы статей, 2019