

Как морской залив превращается в озеро

Е.Д.Краснова¹, М.В.Мардашова¹

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова (Москва, Россия)



Что произойдет, если морской залив отделится от моря? Останется маленьким морем или станет пресным озером? Или превратится во что-то совсем другое? А что будет с его обитателями? Прибрежные водоемы, находящиеся на разных стадиях изоляции от моря, изучают на Беломорской биологической станции МГУ. На пути от морского залива к озеру отделившийся водоем становится меромиктическим. В нем соседствуют слои с разной соленостью, и в каждом живет свое биологическое сообщество. Исследователям удалось реконструировать ход событий в каждом из слоев и во всей экосистеме.

Ключевые слова: отделяющиеся водоемы, меромиктические водоемы, Белое море, гидрологическая эволюция, экологическая сукцессия, бентос.



Елена Дмитриевна Краснова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Беломорской биологической станции биологического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Занимается исследованием прибрежных меромиктических водоемов, отделяющихся от Белого моря.
e-mail: e_d_krasnova@mail.ru



Мария Валерьевна Мардашова, младший научный сотрудник Центра морских исследований того же университета. Область научных интересов — исследование бентоса арктических морей.

У Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова есть северное представительство — Беломорская биологическая станция (ББС), где студенты-биологи знакомятся с морем и его обитателями. И есть на побережье Белого моря один феномен, пока очень слабо изученный. Это соленые озера, отделяющиеся от моря. Они возникли в результате поднятия берега, которое началось после схода ледника и до сих пор не закончилось. Озера продолжают эволюционировать, а среди нынешних морских заливов немало таких, которым предстоит встать на тот же путь. Да и само Белое море — не что иное, как водоем, частично изолированный от Баренцева моря.

Изучение отделяющихся от моря водоемов началось на ББС в конце XX в., а с 2010 г. эти озера оказались в фокусе пристального внимания. О первых результатах исследований было рассказано в журнале «Природа» в 2013 г. [1]. С тех пор состоялось множество комплексных экспедиций с участием гидрологов, гидробиологов, гидрохимиков и физиков, включая студентов и аспирантов несколь-

Озеро Могильное на острове Кильдин.
Фото А.А.Сазонова



Озеро Кисло-Сладкое — один из отделяющихся от Белого моря водоемов.

Фото Д.А.Воронова

ких факультетов МГУ. Найдено более двух десятков водоемов, в разной степени отделившихся от моря. Рассматривая их как последовательные стадии изоляции, можно реконструировать ход гидрологической и экологической эволюции водоема.

Главное, что отличает эти озера, — многослойная структура водной толщи: сверху находится пресный слой (или еще не совсем пресный, если водоем только начинает изолироваться), под ним соленый, а возле дна — застойная зона, где нет кислорода, но очень много сероводорода. Как из равномерно перемешанного соленого морского залива образуется озеро с такой слоистостью? Что при этом происходит с обитателями водной толщи и дна? Как и с какой скоростью меняются их сообщества? Попробуем разобраться.

О скорости эволюции водоемов в районе ББС мы пока можем судить только по судьбе их аналогов на Соловецких о-вах, где этим вопросом занимались палеогеографы из Петрозаводска и Санкт-Петербурга под руководством доктора географических наук Д.А.Субетто. На заре истории Белого моря Соловецкие о-ва были полностью покрыты водой. Вместе со всем дном они постепенно поднимались над морем. Многочисленные озера на архипелаге, прежде чем стать пресными, прошли через те же стадии, какие мы сейчас наблюдаем у наших отделяющихся водоемов. Пока водоем соединялся с морем, на дне накапливались осадки, характерные для моря. Когда связь стала нерегулярной, осадки сделались «полосатыми». Во время пресноводной стадии на дне откладывался озерный сапропель. Палеогеографы датировали раз-

ные слои в донных осадках соловецких озер и выяснили, что превращение морского залива в пресное озеро занимает несколько столетий [2]. Продолжительность отдельных стадий изоляции сопоставима со временем жизни человека, и у исследователей, которые следят за отделением озер, есть шанс увидеть изменения своими глазами.

Как же отделяется водоем? По мере подъема берега залив с углублением посередине и отмелями по краям превращается в лагуну*. Это может происходить по-разному. Есть три самых распространенных сценария. В первом случае лагуна образуется из залива, на выходе из которого расположен остров. Отмели по его краям соединяются с берегом и замыкают водоем. Во втором случае в цепочку остаточных озер превращается пролив между двумя большими участками суши. И наконец, третий путь — отчленение фрагмента эстуария ручья или небольшой реки.

Изоляция может быть искусственной или ускоренной из-за строительных работ, производимых человеком. Так случилось с губой Канда, которую отсекали от основной акватории Кандалакшского залива двумя дамбами: одна из них была сооружена в 1916 г. при строительстве первой железной дороги на Мурман, а вторая — в 1968 г. для автодороги «Кола» (Санкт-Петербург—Мурманск). Люди также поспособствовали изоляции озер Большие

* Если залив мелкий и в нем нет серьезного углубления, то по мере подъема берега он обсохнет и превратится в марш, приморский луг, а потом зарастет лесом. В таком случае интересующий нас водоем не получится.



Способы образования прибрежных меромиктических водоемов: *a* — водоем, отделенный от моря островом (оз.Кисло-Сладкое), *б* — цепь остаточных озер на месте древнего пролива (Ермолинская губа, Ершовские озера, кут губы Кислой), *в* — лагуна эстуарного типа.

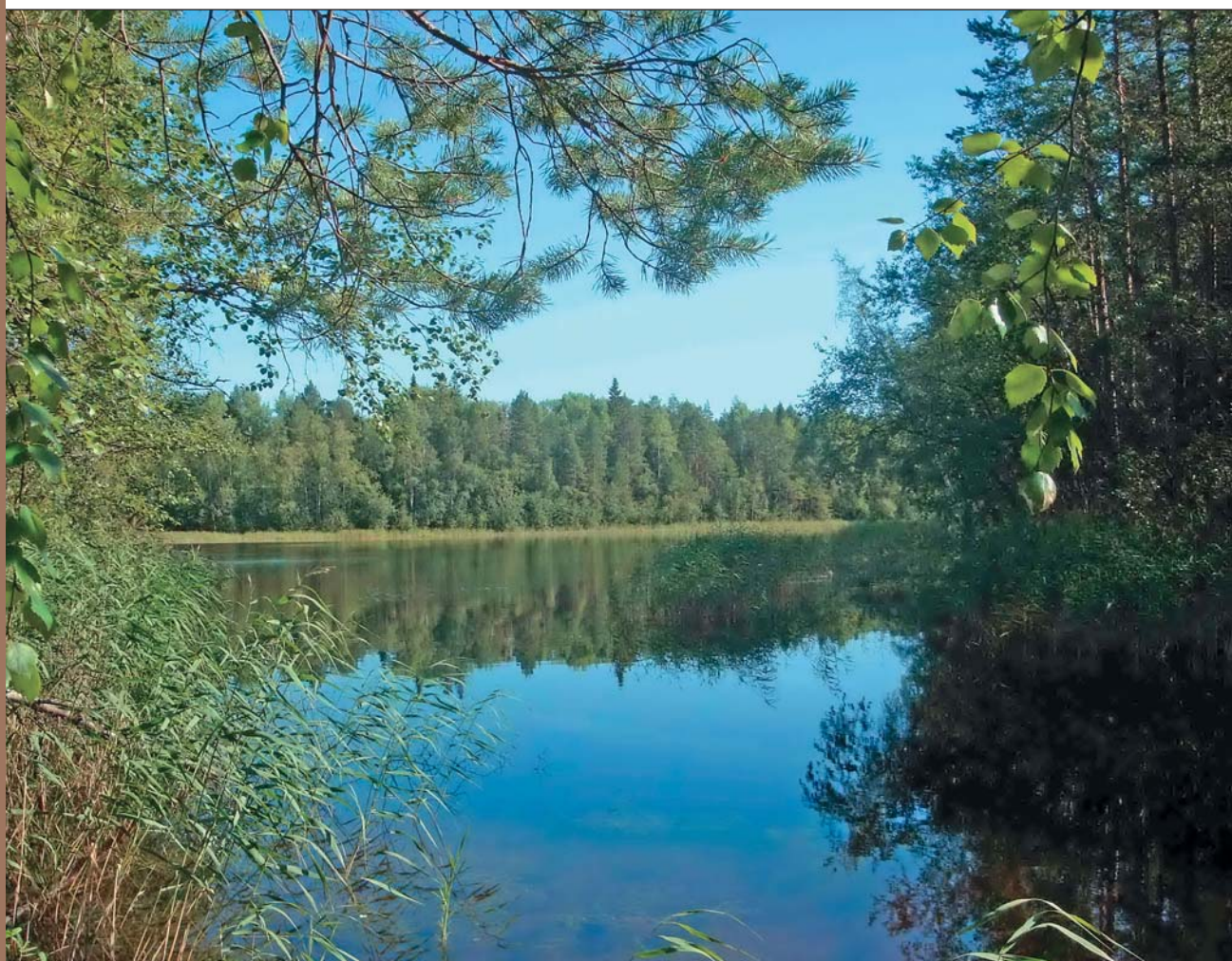
и Малые Хрусломены на о.Оленьем в Ковденской губе. В конце XIX в. для паровых машин лесозавода понадобилось много пресной воды, и оба озера, тогда еще соленые, отгородили от моря порогами из валунов. Мы знаем еще несколько озер, отделенных от моря порогами, созданными людьми. И сегодня время от времени возникают планы отгородить от моря какую-нибудь акваторию для разных хозяйственных целей — для разведения рыбы, для устройства дельфинария под открытым небом, для дорожной насыпи... Кроме того, северные моря с их высокими приливами считаются перспективными для приливной энергетики, и для того чтобы течение

вращало вмонтированные в плотину турбины, опять-таки требуется отгораживать заливы. Экологические последствия искусственной изоляции очень похожи на те, что мы наблюдаем в озерах, отделившихся от моря естественным путем. Поэтому исследования нашего коллектива имеют еще и прикладное значение: они помогают прогнозировать, как изменится водоем и что случится с его обитателями.

Итак, по мере поднятия берега отмель, отгораживающая залив от моря, постепенно поднимается над уровнем малой воды. Приливно-отливные колебания в водоеме ослабевают и становятся асим-



Стадии отделения водоема. При подъеме порога, отделяющего залив от моря, уменьшается частота забросов морской воды и меняется гидрологическая структура.



Меромиктическое озеро Трехцветное.

Фото С.В.Пацаевой

метричными, с коротким приливом и долгим отливом. В дальнейшем, когда порог поднимется выше среднего уровня полной воды, ежедневные приливы прекратятся. На этом этапе забросы морской воды смогут происходить лишь в сизигию — время, когда Земля, Луна и Солнце оказываются на одной линии и приливы становятся очень высокими, особенно при новолунии. При дальнейшем подъеме порога морская вода попадает в залив еще реже, только при осенних высоких приливах и штормовых нагонах, и случается это один-два раза в год. Среди хорошо изученных нами озер есть такое, в котором забросы происходят с многолетними интервалами — это оз.Трехцветное. Оно получило свое название за разную окраску слоев водной толщи: торфянисто-коричневый верхний, изумрудно-зеленый средний и лимонно-желтый нижний. Порог, отделяющий это озеро, поднят над уровнем моря почти на метр, и для заплеска нужно

совпадение высокого прилива, фазы сизигии и сильного ветрового нагона, что случается раз в несколько десятилетий. А в южной части губы Канда есть плес под названием Федосеевский, морская вода перестала поступать в него в 1916 г., после того как построили железнодорожную дамбу. На дне плеса теперь хранится реликтовая морская вода, попавшая туда 100 лет назад [3].

Кроме подъема берега важную роль в отделении водоема от моря играет перенос течением мелких фракций грунта вдоль берега, а также работа льда. Они могут ускорить события на 150–250 лет [4].

Изоляция проявляется не только в ослаблении связи с морем. Когда береговая линия замыкается, водоем становится ловушкой для пресного стока, а также для органики — автохтонной (образующейся в озере при развитии водорослей) и аллохтонной (принесенной с водосбора). Органические вещества накапливаются в озерной котловине, это

создает условия для развития бактериальных процессов, и по мере изоляции озера от моря они играют все большую роль в жизни экосистемы.

Из-за задержки пресной воды поверхностный слой озера разбавляется в пределах зоны ветрового перемешивания, глубина которой в небольших водоемах ограничена 0.5–1 м, а в крупных — 1.5–2 м. В лагунах эстуарного типа пресный сток «скатывается» по поверхности, почти не смешиваясь с нижней соленой водой, которая при каждом приливе поступает в озеро [5]. Появление опресненного слоя — важный этап развития экосистемы. Он экранирует толщу водоема от атмосферы, способствует застою в нижележащих слоях. Постепенно озеро становится меромиктическим: разница в плотности слоев препятствует их перемешиванию, и слоистая структура вод сохраняется подолгу. Этим меромиктические озера отличаются от пресных, вода в большинстве из которых полностью перемешивается два раза в год, весной и осенью, при температуре поверхностной воды +4°C (температура максимальной плотности). В меромиктических озерах перемешиванием охвачен только верхний опресненный слой, а циркуляция между слоями отсутствует.

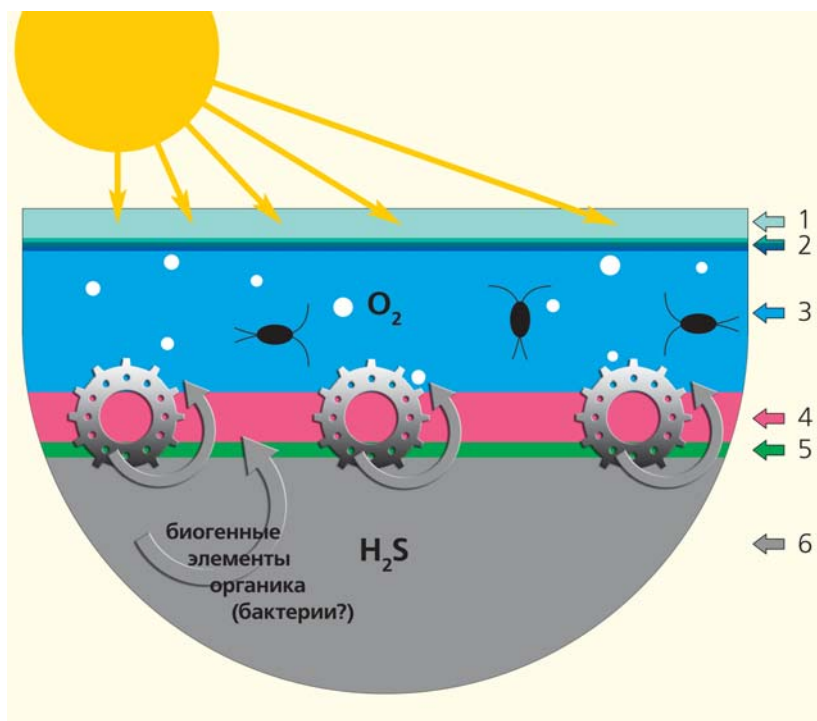
Меромиктические озера — интересный для науки феномен. Их немного, они распространены по всему миру и служат объектом усиленного изучения. Разница в плотности между верхним и нижним слоями может возникать из-за притока минерализованных подземных вод, растворения солей из подстилающих пород или из-за поступления в озера более плотных бытовых и промышленных стоков. В прибрежных меромиктических озерах причиной плотностной разницы служит поступление соленой воды из моря, если у озера еще осталась с ним связь, или сохранение реликтовой морской воды, попавшей туда до изоляции.

Вертикальную структуру водоема, отделяющегося от Белого моря, в обобщенном виде можно представить так. Водная толща состоит из пяти слоев: верхнего опресненного, слоя скачка плотности (пикноклина) и соленого слоя, который подразделен на верхний кислородный (аэроб-

ный), нижний анаэробный и хемоклин между ними. В каждом слое свои характеристики воды, и каждый населен своим сообществом живых организмов. Закономерности их изменений при усилении изоляции тоже различаются.

Для знакомства с водными слоями меромиктического озера будем двигаться сверху вниз, т.е. начнем с поверхностного. По мере усиления изоляции он становится все более пресным, и состав биоты в нем меняется соответственно солености. Пока этот слой соленый, состав планктона и бентоса похож на морской. Когда совсем пресный, планктон и бентос — такие же, как в пресных озерах этого региона. А что на промежуточных этапах?

Изменения в донном населении поверхностного слоя начинаются еще на стадии соленого водоема [6]. Морская фауна с богатым видовым разнообразием постепенно беднеет. На смену приходит сообщество с численным превосходством одного вида — брюхоногих моллюсков гидробий (*Hydrobia ulvae*). В Белом море они живут в приливно-отливной зоне, но у озера этой зоны практически нет, и моллюски населяют не совсем обычный для них биотоп. Постепенно в водоеме становится все больше личинок насекомых. Сначала преобладают виды, личинки которых устойчивы к соли, но по мере опреснения на смену им приходят пресноводные



Строение водной толщи отделяющегося водоема. 1 — опресненный верхний слой; 2 — пикноклин; 3 — соленый аэробный слой; 4 — слой родомонасов; 5 — хемоклин (слой аноксигенного фотосинтеза); 6 — соленый анаэробный слой.

виды. В гидробиологии есть понятие критической солености — это такая концентрация солей, при которой плохо как морским видам (для них соленость недостаточна), так и пресноводным (для них соли слишком много). Критическая соленость находится в диапазоне 5–8 ‰ [7]. Когда поверхностный слой опресняется до этого уровня, разнообразие бентоса сильно сокращается. При дальнейшем опреснении оно снова возрастает, главным образом за счет пресноводных личинок насекомых. Состав личиночной фауны может меняться год от года, он зависит от того, какие насекомые прилетели и облюбовали водоем. Впоследствии к личинкам насекомых добавляются пресноводные брюхоногие и двустворчатые моллюски, характерные для водоемов этого региона. Из морских видов последним озеро покидают бокоплавы-гаммарусы (*Gammarus duebeni*), способные выдерживать опреснение (у них даже бывают пресноводные популяции). Гаммарусы подвижны, они могут попадать в озеро с потоком морской воды, заплывать против течения ручья, оставаться в озере, если найдут для себя условия подходящими, или уплыть прочь. Потом на смену этому морскому бокоплаву приходит его пресноводный собрат гаммарус озерный (*Gammarus lacustris*), причем какое-то время эти два вида могут существовать одновременно.

В нижележащем соленом слое донные сообщества несколько иные, и по мере изоляции водоема они меняются. Для характеристики начальной стадии изоляции мы выбрали углубление в виде ковша в куте губы Кислой, отделенное от основной морской акватории мелководным порогом, который, однако, пока не препятствует приливному течению. Глубина ковша 10 м, в нем нет стагнации, течение перемешивает воду до дна, и фауна такая же, как в морской сублиторали — зоне, которая расположена ниже литорали и никогда не осушается. Характерные обитатели сублиторали в куте губы Кислой — бокоплавы *Pontoporeia femorata*, полухордовые *Saccoglossus mereschkowskii* и многощетинковые черви (полихеты) *Terebellides stroemi*. Здесь многочисленны асцидии рода *Molgula*, и, хотя водоем не очень глубокий, на дне его в массе встречаются холодолюбивые арктические формы, например многощетинковые черви *Micronephthys minuta* и двустворчатые моллюски *Nicania montagui*, которые в Белом море обычно обитают на больших глубинах и при низких температурах. По численности здесь преобладают полихеты, а по биомассе — двустворчатые моллюски, но ни один вид не занимает доминирующих позиций.

Следующая стадия изоляции — лагунные водоемы с ежедневными, но очень ослабленными при-

ливами, высота которых не превышает 20 см. В нашем озерном арсенале таких водоемов три, причем один из них отделился от кута Кислой губы. В соленой зоне водоемов лагунного типа фауна становится беднее. Одними из первых исчезают холодолюбивые двустворчатые моллюски из семейства *Astartidae*, они уступают место бореальным и эврибионтным двустворкам *Mya arenaria*, *Macoma balthica* и *Mytilus edulis*. Эти три вида составляют основу биомассы лагунных водоемов. Резко сокращается число фильтраторов и крупных организмов, которые живут в толще грунта. В то же время часто развиваются локальные скопления мелких роющих форм, которые населяют поверхностные донные слои: полихет семейства *Capitellidae*, олигохет, бокоплавов корофид.

При дальнейшей изоляции, когда приливы прекращаются, а забросы свежей морской воды происходят только в сизигию, число видов донных животных сокращается до 10–20, на первые роли выходят улитки-гидробии и красные личинки комаров-звонцов *Chironomus gr. salinarius*, приспособленные к широкому диапазону солености.

В верхнем, кислородном (аэробном), слое соленой зоны, как в парнике, накапливается тепло и кислород, выработанный фитопланктоном (вплоть до 300% пересыщения). Эта зона характеризуется наибольшей биомассой бентоса. Однако чем реже забросы морской воды, тем тоньше этот слой и тем меньше зона обитания морского бентоса. По мере изоляции озера его биомасса снижается, число видов существенно уменьшается. При этом количество бентосных организмов может и возрасти из-за развития мелких форм, способных существовать в широком диапазоне условий. Но потом фауна критически беднеет, и в конечном итоге соленый аэробный слой исчезает вместе со своими обитателями, а придонная сероводородная зона распространяется так высоко, что захватывает весь соленый слой. Водоем становится похож на континентальные меромиктические озера.

В глубоководной части водоема развивается застой воды. Там вспыхивает бактериальная сульфатредукция — процесс восстановления растворенных в морской воде сульфатов до сульфидов — и накапливается сероводород. Чем сильнее изоляция, тем больше в воде сероводорода. Измерения концентрации иона сульфида показали, что оз.Трехцветное — самое продвинутое на пути изоляции — чемпион по содержанию сероводорода среди природных водоемов морского происхождения, и за шесть лет наблюдений его количество в озерной воде неуклонно возрастало. В марте 2018 г. оно до-

стигло 957 мг/л. Для сравнения: в сероводородной зоне Черного моря его концентрация не превышает 10–12 мг/л. Одновременно с накоплением сероводорода меняется анионный состав воды: сульфатно-хлоридное отношение смещается в сторону хлоридов, поскольку сульфаты расходуется на бактериальную сульфатредукцию. Аналогичным образом сдвигается и сульфатно-карбонатное соотношение. Такие изменения зарегистрированы в озерах Трехцветном и Большие Хрусломены, а также в губе Канда, в соленой линзе столетней давности, изрядно переработанной бактериями.

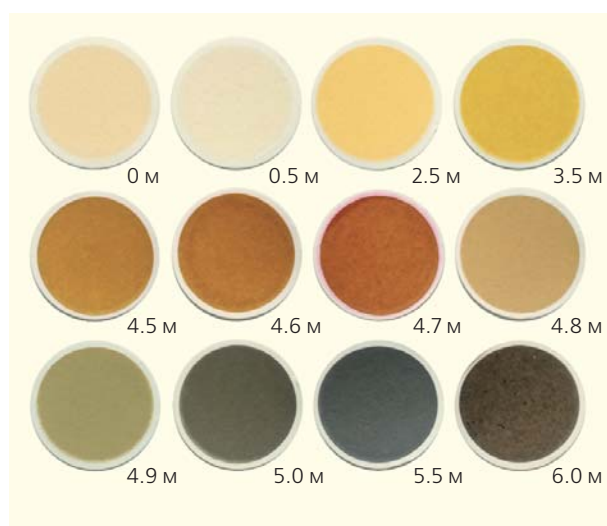
Но самые впечатляющие изменения происходят в соленом слое на границе между сероводородной и кислородной зонами, где расположен переходный слой — хемоклин. На ранних стадиях изоляции он широкий, а переход плавный. Но потом в хемоклине возникают цветные прослойки — мутно-зеленые, коричневатые, красноватые. Окраску им придают аноксигенные фототрофные бактерии, которые окисляют сероводород, используя его при фотосинтезе вместо молекулы воды, и выделяют не кислород, а серу. В беломорских полуизолированных водоемах в цветном бактериальном слое живут зеленые серные бактерии *Chlorobium phaeovibrioides*. Бактериальный слой будет зеленого цвета, если в нем доминирует зеленая форма *Ch.phaeovibrioides*, или красноватого, если преобладает коричневая форма. Эти две формы отличаются набором пигментов, участвующих в фотосинтезе, и поэтому их можно отдельно определять в смеси. Исследовательская группа с кафедры общей физики физического факультета МГУ под руководством доцента С.В.Пацаевой разработала методику оценки вклада каждой из этих форм в сообщество аноксигенных фототрофов по спектру поглощения света в экстрактах, по спектру флуоресценции, а также методику измерения концентрации хлоросомного бактериохлорофилла по спектрам поглощения необработанных проб воды [8]. Такой экспресс-анализ поможет легко и быстро определять состав фотосинтезирующих бактерий, что необходимо для наблюдений за уже известными водоемами, поиска новых и определения их места в типологическом ряду.



Отбор проб на озере Большие Хрусломены.

Фото Д.А.Воронова

Световые условия, от которых зависит жизнь фотосинтезирующих организмов, в ходе изоляции меняются. На начальных стадиях поверхностный слой воды соленый и прозрачный, и свет достигает большей глубины, чем в водоемах с пресным верхним слоем, окрашенным в коричневатый цвет от растворенных гуминовых веществ. Поэтому неудивительно, что в озерах с регулярными приливами цветной слой расположен глубже, в нем преобладают коричнево-окрашенные формы, которые выдерживают большее затенение, а на финальных стадиях изоляции — зелено-окрашенные.



Фильтрат из разноцветных слоев воды из лагуны на Зеленом мысе. 12 августа 2016 г.



Зимние исследования на беломорских отделяющихся озерах.

Фото Д.А.Воронова

Бактериальный слой существует в течение всего года, а летом вплотную к нему могут образовываться еще несколько слоев с сообществами микроорганизмов, связанными с ним функционально, и нередко другого цвета [9]. Сверху к бактериальному слою прилегает слой простейших с миксотрофным типом питания, которые могут переключаться с фотосинтеза на потребление готовых органических веществ. Они населяют микроаэробную часть хемоклина, где есть немного кислорода, и выдерживают небольшие концентрации сероводорода. На начальных стадиях изоляции это обычно криптофитовые жгутиконосцы родомонас (*Rhodomonas* sp.), которых там может быть так много, что они окрашивают свою прослойку в свекольно-красный цвет, и это квалифицируется как гиперцветение. В водоемах с пресным верхним слоем над бактериальной зоной обитают крупные зеленые жгутиконосцы эвглены (*Euglena* sp.). Еще выше, где кислорода много, нередко располагается зеленоватый слой с высокой численностью мелких кокков или жгутиконосцев, которые там активно фотосинтезируют и насыщают воду кислородом. На самой границе окислительных и восстановительных условий и чуть ниже нее обитают инфузории, причем у каждого водоема свой набор видов. Среди инфузорий тоже есть миксотрофные — с фотосинтезирующими симбиотическими микроводорослями внутри, а некоторые содержат внутри своих клеток пластиды захваченных родомонасов в активном состоянии.

Хемоклин — самая продуктивная зона в отделяющихся водоемах. Особенно активно в нем идет бактериальный аноксигенный фотосинтез,

скорость которого в несколько раз выше, чем у обычного фотосинтеза, осуществляемого фитопланктоном в вышележащей зоне [10, 11]. В производстве органических веществ в таких водоемах главенствующую роль играют зеленые серные бактерии. Созданную ими биомассу могут использовать миксотрофы из слоя, лежащего сверху, а они, в свою очередь, служат пищей для более крупных простейших, зоопланктона, и через них продукция передается на более высокие трофические уровни (рыбам, беспозвоночным) в сообществе вышележащих слоев водоема. К хемоклину нередко приурочены скопления зоопланктона. В соленых лагунах

возле него концентрируются копеподы из рода *Acartia*, которые откармливаются на криптофитовых жгутиконосцах. В оз.Трехцветном вблизи хемоклина обнаружено скопление ветвистоусых рачков *Bosmina longirostris*. Спектральный анализ экстракта из этих рачков показал, что они потребляют не только фитопланктон, который концентрируется над хемоклином, но и зеленых серных бактерий из бескислородной зоны.

Чем дальше продвинулся водоем на пути изоляции, тем выше плотность бактериального сообщества, и она может достигать значений, невиданных для природных вод. При такой высокой плотности в бактериальном сообществе должны активно действовать бактериофаги, контролирующие численность бактерий. Вирусных частиц там действительно много, однако мы никогда не замечали признаков «болезни». Есть предположение, что своей устойчивостью к фагам зеленые серные бактерии оз.Трехцветного обязаны плазмиде, встроенной в их геном [12]. У нее есть гены, связанные с репликацией и разделением плазмид, и два токсин-антитоксиновых комплекса — своего рода суицидальные системы, обеспечивающие смерть инфицированной клетки до продукции вирусного потомства. Похоже, клетки хлоробий спасают остальное сообщество от вирусов ценой собственной жизни.

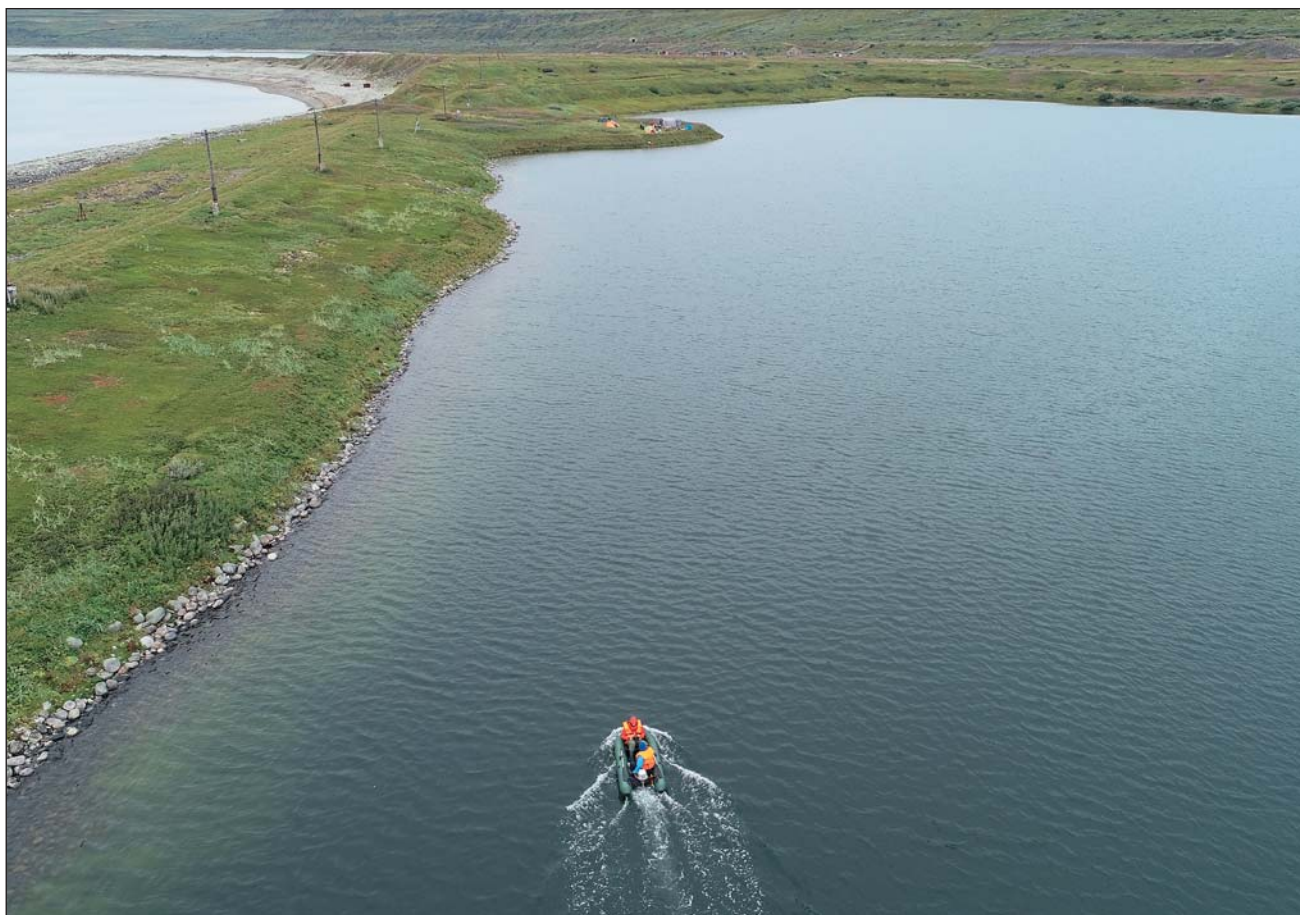
Не будет преувеличением утверждать, что с появлением сероводородной зоны в отделяющемся от моря водоеме возникает совсем другая жизнь. На начальных этапах эта зона возникает в теплое время года и размывается зимой. Потом она стано-

вится постоянной; зимой граница распространения сероводорода поднимается, летом опускается. В озерах с самой долгой историей изоляции эта граница располагается выше, чем в тех, что недавно ступили на этот путь. Бактериальный слой добавляет контрастности: зеленые серные бактерии усваивают сероводород, не пропускают его вверх и тем самым усиливают окислительно-восстановительный градиент. Разность потенциалов между кислородной и сероводородной частями хемоклина на расстоянии 20 см может составлять до 0.5 В. Густая суспензия из бактерий не пропускает вниз свет, что препятствует прогреву нижележащей водной массы. Из-за этого плотность воды в анаэробной зоне оказывается больше, чем в случае отсутствия бактерий, а стратификация — еще более устойчивой.

Знание закономерностей эволюции водоемов, частично изолированных от Белого моря, позволило нам сделать прогноз для меромиктического озера Могильного, расположенного на о.Кильдин в Баренцевом море. Это озеро — классический при-

мер реликтового водоема, который отделился от моря 1.5–1.0 тыс. лет назад, после образования каменной перемычки, сквозь которую озеро продолжает обмениваться водой с морем. История изучения оз.Могильного насчитывает полтора столетия. По гидрологической структуре оно очень похоже на беломорские отделяющиеся озера. В нем те же основные слои: поверхностный, который некогда был пресным, средний соленый, населенный морской фауной, и нижний сероводородный. В течение XX в. вертикальная структура озера постепенно менялась: поверхностный слой стал солоноватым и сделался на 2 м тоньше, исчезло пресноводное сообщество, граница распространения сероводорода поднялась на 3 м [13]. В последние 10 лет эти изменения ускорились, что вызвало беспокойство о будущей судьбе изолированной популяции кильдинской трески — подвида атлантической трески, который обитает только в этом озере и занесен в Красную книгу Российской Федерации.

В результате экспедиционных исследований выяснилось, что, во-первых, озеро испытывает дефи-



Работы на озере Могильном.

Фото А.А.Сазонова



Мальки кильдинской трески в оз. Могильном.

Фото М.Л.Федюка

цит пресной воды. Некогда питавшие его родники пересохли, и теперь в озеро не впадает ни один ручей. Неудивительно, что поверхностный слой осолонился. Во-вторых, сквозь дамбу, которая отделяет озеро от моря, в озеро фильтруется вода с соленостью меньшей, чем в море, из-за смешения морской и озерной воды в теле дамбы. Плотность разбавленной воды, поступающей в озеро, недостаточна, чтобы она опускалась вниз, и в результате нижние го-

ризонты озера не вентилируются. При сохранении климатической тенденции к летнему потеплению соленость поверхностного слоя может возрасти настолько, что слои перемешаются. История изучения меромиктических озер знает случаи, когда в силу климатических причин меромиксия нарушалась и вся толща полностью перемешивалась [14]. Не исключен такой вариант и для Могильного. Если такое случится, то, скорее всего, перед ледоставом. Какие будут последствия? Возможно, сероводород на время распространится по всей толще озера, это вызовет замор и гибель большей части популяции трески. Не исключено, что подобное уже случалось в прошлом, и обнаруженные у кильдинской трески генетические следы прохождения через несколько «бутылочных горлышек», которые проявились в уменьшении генетического разнообразия, связаны с прежними заморами при нарушении меромиксии и сокращением поголовья трески всего до нескольких производителей. Нам очень хочется, чтобы такой прогноз не оправдался. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 16-05-00548 и 19-05-00377); полевые работы на оз. Могильном выполнены при частичной поддержке Русского географического общества (грант 13/2018-Р «Колыбельная трескового озера. Документация экосистемы озера Могильного (о. Кильдин, Баренцево море)»).

Литература / References

1. Краснова Е.Д., Пантюлин А.Н. Кисло-сладкие озера, полные чудес. Природа. 2013; 2: 39–48. [Krasnova E.D., Pantyulin A.N. Sweet-sour lakes full of wonders. Priroda. 2013; 2: 39–48. (In Russ.)]
2. Субетто Д.А., Шевченко В.П., Лудикова А.В. и др. Хронология изоляции озер Соловецкого архипелага и скорости современного озерного осадконакопления. Доклады Академии наук. Серия геологическая. 2012; 446(2): 183–190. DOI:10.1134/S1028334X12090140. [Subetto D.A., Shevchenko V.P., Ludikova A.V. et al. Chronology of isolation of the Solovetskii archipelago lakes and current rates of lake sedimentation. Doklady Earth Sciences. Geological series. 2012; 446(1): 1042–1048. (In Russ.)]
3. Саввичев А.С., Демиденко Н.А., Краснова Е.Д. и др. Микробные процессы в губе Канда — меромиктическом водоеме, искусственно отделенном от Белого моря. Доклады Академии наук. 2017; 474(5): 637–641. DOI:10.7868/S0869565217050243. [Savvichev A.S., Demidenko N.A., Krasnova E.D. et al. Microbial processes in the Kanda Bay — micromictic water reservoir, artificially separated from the White Sea. Doklady Akademii nauk. 2017; 474(5): 637–641. (In Russ.)]
4. Репкина Т.Ю., Ефимова Л.Е., Косевич Н.И. и др. Динамики фиардово-шхерных берегов по результатам мониторинга на ББС МГУ в 2009–2016 гг. (губа Ругозерская Кандалакшского залива Белого моря). Поздне- и постгляциальная история Белого моря: геология, тектоника, седиментационные обстановки, хронология. Материалы Всероссийской научной конференции. М., 2018; 115–121. [Repkina T.Yu., Efimova L.E., Kosevich N.I. et al. Dynamics of fjard-skerry shores according to monitoring results at BBS MSU in 2009–2016 (Rugozerskaya Bay, Kandalaksha Bay, White Sea). The Late-and Postglacial History of the White Sea: Geology, Tectonics, Sedimentation Environments, Chronology. Proceedings of the All-Russian Scientific Conference. Moscow, 2018; 115–121. (In Russ.)]
5. Мироненко А.А., Беляев Б.М., Василенко А.Н., Ефимов В.А. Озера Сонострова — гидролого-гидрохимические характеристики меромиктических озер на ранней стадии отделения от моря. Поздне- и постгляциальная история Белого моря: геология,

- тектоника, седиментационные обстановки, хронология: Материалы Всероссийской научной конференции. М., 2018; 109–114. [Mironenko A.A., Belyaev B.M., Vasilenko A.N., Efimov V.A. Sonostrova Lakes — hydrological and hydrochemical characteristics of meromictic lakes at an early stage of separation from the sea. The Late-and Postglacial History of the White Sea: Geology, Tectonics, Sedimentation Environments, Chronology: Proceedings of the All-Russian Scientific Conference. Moscow, 2018; 109–114. (In Russ.)]
6. Столяров А.П., Мардашова М.В. Особенности структуры и разнообразие сообществ макробентоса в прибрежных лагунных экосистемах (Кандалакшский залив, Белое море). Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический. 2017; 122(3): 18–27. [Stolyarov A.P., Mardashova M.V. Some features of the structure and species diversity of the macrobenthos community in the coastal lagoon ecosystems (Kandalaksha Bay, White Sea). Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Biological series. 2017; 122(3): 18–27. (In Russ.)]
 7. Хлебович В.В. Критическая соленость биологических процессов. Л., 1974. [Khlebovich V.V. The Critical Salinity of Biological Processes. Leningrad, 1974. (In Russ.)]
 8. Жильцова А.А., Харчева А.В., Краснова Е.Д. и др. Спектральное исследование зеленых серных бактерий в стратифицированных водоемах Кандалакшского залива Белого моря. Оптика атмосферы и океана. 2018. 31(3): 233–239. [Zhiltsova A.A., Kharcheva A.V., Krasnova E.D. et al. Spectroscopic study of green sulfur bacteria in stratified water bodies of the Kandalaksha Gulf of the White Sea. Atmospheric and Oceanic Optics. 2018. 31(3): 233–239.]
 9. Краснова Е., Маторин Д., Белевич Т. et al. The characteristic pattern of multiple colored layers in coastal stratified lakes in the process of separation from the White Sea. Chinese Journal of Oceanology and Limnology. 2018; 6: 1–16. DOI:10.1007/s00343-018-7323-2.
 10. Лунина О.Н., Саввичев А.С., Кузнецов Б.Б. и др. Аноксигенные фототрофные бактерии оз. Кисло-Сладкое (Кандалакшский залив Белого моря). Микробиология. 2014; 83(1): 90–108. DOI:10.7868/S002636561401008X. [Lunina O.N., Savvichev A.S., Kuznetsov B.B. et al. Anoxygenic phototrophic bacteria of the Kislo-Sladkoe stratified lake (White Sea, Kandalaksha Bay). Microbiology. 2014; 83(1): 90–108. (In Russ.)]
 11. Саввичев А.С., Лунина О.Н., Русанов И.И. и др. Микробиологические и изотопно-геохимические исследования озера Кисло-Сладкое — меромиктического водоема в Кандалакшском заливе Белого моря. Микробиология. 2014; 83(2): 191–203. DOI:10.7868/S002636561401011X. [Savvichev A.S., Lunina O.N., Rusanov I.I. et al. Microbiological and isotopic geochemical investigation of Lake Kislo-Sladkoe, a meromictic water body at the Kandalaksha Bay shore (White Sea). Microbiology. 2014; 83(2): 191–203. (In Russ.)]
 12. Savvichev A.S., Babenko V.V., Lunina O.N. et al. Sharp water column stratification with an extremely dense microbial population in a small meromictic lake, Trekhtzvetnoe. Environmental Microbiology. 2018; 20(10): 3784–3797. DOI:10.1111/1462-2920.14384.
 13. Strelkov P., Shunatova N., Fokin M. et al. Marine Lake Mogilnoe (Kildin Island, the Barents Sea): one hundred years of solitude. Polar Biology. 2014; 37(3): 297–310. DOI:10.1007/s00300-013-1431-4.
 14. Belolipetskii V.M., Degermendzhi A.G., Genova S.N., Rogozin D.Y. Change in the circulation regime in the stratified saline Lake Shira (Siberia, Republic of Khakassia). Doklady Earth Sciences. 2017; 474(2): 649–652. DOI:10.1134/S1028334X17060010.

How a Sea Bay Turns into a Lake

E.D.Krasnova¹, M.V.Mardashova¹

¹Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)

What will happen if a sea bay separates from the sea? Will it remain a small sea or become a fresh lake? Or will it turn into something completely different? And what will happen to its inhabitants? Sea bays and lagoons at different stages of isolation from the sea are studied at the White Sea Biological Station of Lomonosov Moscow State University. On the way from the sea bay to a fresh lake, the separated water body becomes meromictic — layers with different salinity adjoin each other in it, and each of them has its own biological community. Researchers managed to reconstruct the current of events in each of the layers and in the entire ecosystem.

Keywords: isolation from the sea, meromictic lakes, White Sea, hydrological evolution, ecological succession, benthos.