

Кисло-сладкие озера, полные чудес

Е.Д.Краснова,

кандидат биологических наук,
научный сотрудник ББС им.Н.А.Перцова

А.Н.Пантюлин,

кандидат географических наук,
доцент кафедры океанологии географического факультета МГУ им.М.В.Ломоносова

В чаще из древних — под три миллиарда лет — архейских пород качается, плещется Белое море. Его возраст всего 11 тыс. лет, в геологических масштабах — одно мгновение. Все, кроме ложа, в нем молодо: и воды, и берега, и экосистемы. Беломорская вода находится в постоянном движении, прилив сменяется отливом; сток Северной Двины — одной из самых крупных рек России — приводит в движение горизонтальные течения, а поступление соленой воды из Баренцева моря создает вертикальную циркуляцию, из-за чего беломорские воды за год обновляются наполовину, а глубинные — полностью. Берег тоже динамичный: 12 тыс. лет назад, после схода ледника, твердые породы, придавленные ледяной горой трехкилометровой высоты, начали распрямляться, и их поднятие продолжается до сих пор с огромной для геологических процессов скоростью — около 4 мм в год. За 10 лет и дно, и берег поднимаются на 4 см, на 40 — за столетие, а самая старая деревня под названием Черная Речка, что неподалеку от Беломорской биостанции, за 500 лет своего существования поднялась на 2 м. Из исторических документов мы знаем, что к ее причалам некогда подходили груженные рыбой суда, и удивляемся, ведь сегодня в эстуарий реки невозможно войти даже на плоскодонной гребной лодке! Все объясняется просто: сотни лет назад он был гораздо глубже, а теперь обмелел из-за поднятия берега. Чтобы это заметить, необязательно ждать сотни лет, достаточно внимательно присмотреться к береговой линии. Беломорский пейзаж своей красо-



Древняя литораль оз.Мероламбуна недалеко от Сонострова, поднявшаяся над уровнем моря не слишком давно, и потому из наземных растений ее пока освоили только травы.

Здесь и далее фото Е.Д.Красновой

той обязан ее многочисленным изгибам, шхерам — россыпям островков с узкими проливами между ними, мысам, разрезающим водную гладь, уютным округлым заливам. Вот мысок, поросший лесом, с узким луговым перешейком — что это, как не приросший к материку остров? А это озерко посреди травяного марша в вершине губы — в нем легко угадывается бывший морской залив. Некоторые такие заливы задержались на промежуточной стадии отделения от моря: сверху вода опреснена, а возле дна еще соленая. На побережье Кандалакшского залива таких много, причем на разных стадиях перехода из власти морской стихии под влияние суши.

Странные это водоемы. Всякий раз, когда гидрологи и морские биологи сталкивались с такими объектами, не могли пройти мимо. Беломорские



Мелководный залив, отделившийся от моря и постепенно превращающийся в соленый марш.

отделяющиеся водоемы — далеко не первые из оказавшихся в фокусе научных исследований.

Первое, но не единственное: Могильное озеро

Самый известный и наиболее изученный отделяющийся от моря водоем — оз.Могильное на о.Кильдин в Баренцевом море. Точнее, не отделяющийся, а давно уже отделившийся. От моря его отгораживает валунная перемычка (возникшая, по разным оценкам, от тысячи до 3,5 тыс. лет назад), сквозь которую фильтруется морская вода. Известное с XVI в., оз.Могильное всегда привлекало исследователей своей необычностью. Возле поверхности оно почти пресное — соленостью не более 3‰. На вкус это заметно, но для питья вода еще годится. Летом 1887 г. молодой сотрудник Зоологического музея Академии наук С.М.Герценштейн в ходе экспедиции на Мурман выловил в озере треску, что вызвало величайшее удивление в научных кругах. Химический анализ воды из озера, выполненный профессором Дерптского (ныне Тартуского) университета К.Шмидтом, показал, что она состоит из 13 частей пресной воды и одной части океанской. Из этого был сделан вывод о способности кильдинской трески жить в пресной воде — качестве, обретенном в ходе постепенного опреснения водоема. Однако уже через два года петербургский зоолог В.А.Фаусек, посетивший озеро «по совету и поручению С.М.Герценштейна», раскрыл главную тайну: под слоем пресной воды, на глубине около 5 м, находится полноценная морская.

Слоистую гидрологическую структуру, в которой соседствуют пресные и соленые воды, ученые тогда встретили впервые. Позднее они обнаружили, что в озере есть еще и третий слой: ниже 9 м и до максимальной, 17-метровой, глубины вода лишена кислорода и насыщена сероводородом. Так что главный персонаж интриги, кильдинская треска, и вправду обитает в необычном месте — в узком промежуточном слое, без контакта с поверхностью (куда ее не пускает пресная вода) и с дном (где концентрируется ядовитый сероводород). Треска — далеко не единственный обитатель оз.Могильного. В каждом из слоев есть своя флора и фауна, в озере соседствуют три экологических сообщества: пресноводное возле поверхности, морские орга-

низмы в соленом слое и богатая бактериальная флора в придонном анаэробном.

Особенности этого водоема уже более 100 лет привлекают внимание исследователей, ему посвящено несколько монографий [1–3], множество статей и подробных отчетов об экспедициях с участием исследователей из разных научных учреждений* [4]. Могильное объявлено гидрологическим памятником природы, во многих справочниках его указывают как единственный в своем роде водоем на территории нашей страны, аналог которого есть лишь в Канаде, Исландии и Гренландии.

Слоистые озера на Новой Земле

На самом деле не единственный. На территории нашей страны есть и другие подобные водоемы, и они тоже привлекали внимание классиков океанологии. Сотрудник Мурманской биологической станции, а в будущем профессор Ленинградского университета, физиолог Е.М.Крепс в начале XX в. нашел несколько осолоненных береговых озер, сообщающихся с морем, на Южном острове Новой Земли, в губе Черной [5]. Выполнив измерения температуры, солености воды и содержания кислорода, он обнаружил существенные различия

* Это Мурманский морской биологический институт, Полярный научно-исследовательский институт морского рыбного хозяйства и океанографии (ПИНРО), Санкт-Петербургский государственный университет, Мурманский государственный технический университет, Зоологический институт РАН, Институт океанологии РАН, Институт микробиологии РАН и др.

в этих показателях между поверхностным и придонным слоями. Последний характеризовался повышенной температурой и соленостью, значительно превышающей нормальную для моря, а также чрезвычайно высоким содержанием кислорода. По сути Крепс столкнулся с тем же явлением, которое наблюдали в Могильном озере — со слоистой структурой водоема, отделяющегося или недавно отделившегося от моря. Известно, что в Могильном эта слоистость очень устойчива: она не нарушается ни в течение смены сезонов, ни в череде лет. Отсутствие перемешивания между слоями с разной минерализацией позволяет отнести его к числу меромиктических водоемов. Этот термин, введенный в 1935 г. И.Финденеггом, означает «частично перемешиваемый». Ветра и зимнее охлаждение поверхностного слоя, которые в обычных водоемах обеспечивают полное перемешивание, в меромиктических затрагивают только верхний слой и не влияют на более плотный подстилающий. Их пристально изучают, за рубежом о них собирают данные. Теперь всеми признано, что меромиктические водоемы заслуживают специальной охраны.

Озера-убийцы и теплые озера Антарктиды

Среди слоистых водоемов есть весьма знаменитые. Печальную известность обрело африканское оз. Ниос — «озеро-убийца» в вулканическом кратере Камеруна. В августе 1986 г. в Ниосе произошла лимнологическая катастрофа (ее причины не до конца ясны): донные воды, насыщенные вулканическими газами, неожиданно вырвались на поверхность. Котловина озера и долины двух вытекающих из него рек почти на 30 км от водоема оказались «залиты» углекислым газом. От удущья погибли более 1700 человек, 3,5 тыс. голов скота, дикие животные. Подобная катастрофа, но с меньшими жертвами, произошла в 1984 г. на оз. Манун, тоже в Камеруне. В Африке есть еще несколько высокогорных озер со столь же высоким содержанием углекислоты в придонных водах. Во избежание повторения катастрофы в Ниосе и Мануне установлены вертикальные трубы, через которые газы из нижних водных слоев постоянно отводятся в атмосферу. Гидрологи, гидрохимии, геологи стараются понять причины происшедшего, чтобы прогнозировать неожиданные нарушения вертикальной структуры меромиктических водоемов, обычно очень устойчивой. Отсутствие вертикального перемешивания играет отрицательную роль и в самом большом меромиктическом водоеме мира — Черном море, где 5/6 водной толщи содержит сероводород и непригодно для жизни организмов, которые дышат кислородом. Для антарктического оз. Ванда в долине Райта меромиктический характер, наоборот, — благо: хотя оно круглый год покрыто льдом, у его дна темпе-

ратура достигает +26°C. Это озеро состоит из двух слоев: верхние 50 м пресные, а ниже, под пикноклином (узкой переходной зоной с высокими химическими и температурными градиентами), до максимальной глубины (66 м) находится прогретая хлоридно-кальциево-натриевая вода с соленостью у дна 10% — всего в три раза меньше, чем в Мертвом море. Столь высокой температурой придонный слой обязан прозрачности воды и льда, отполированного постоянными антарктическими ветрами. Летом солнечные лучи проникают ниже хемоклина и нагревают дно, а поскольку конвекции между этой и вышележащей холодной водной массой нет, все накопленное солнечное тепло возле дна и остается.

Реликтовые озера беломорского побережья

Другое название озер, которые образуются отделением от моря, — реликтовые. Это означает, что они сохранились как остатки с древних эпох. В 1930-х годах, когда была организована Беломорская методическая станция Государственного гидрологического института (ГГИ), изучение таких водоемов стало там одной из главных научных тем. Методику исследований отработывали в небольшой двойной лагуне под названием Малая Пирь-губа (близ с. Умба), на берегу которой базировалась станция. Затем была организована экспедиция на более значимый объект — в Бабье море. Через несколько лет после начала исследований на Беломорской методической станции ГГИ уже набралось достаточно данных для организации представительной сети станций долгосрочного мониторинга в Белом море. Тогда стало понятно, что реликтовые водоемы — важная составляющая беломорской гидрологической системы и без наблюдений за ними представления о режиме всего моря будут неполны. В том числе и поэтомучка в Малой Пирь-губе была включена в число трех станций для ежемесячных стационарных работ.

Из всех беломорских отделяющихся водоемов наибольшее внимание всегда привлекало Бабье море — большая, почти изолированная лагуна, соединенная с морем лишь двумя узкими мелководными проливами, которые существенно ограничивают действие приливов внутри водоема. Эта лагуна — уменьшенная копия Белого моря, сжатая по вертикали: при максимальной глубине около 40 м температура становится отрицательной с 15 м, тогда как в 350-метровой котловине Белого моря — с горизонтов 70—100 м. Первые данные о его биоте опубликовал еще в 1909 г. К.К. Сент-Илер; в начале 1930-х годов Беломорской станцией ГГИ в Бабье море были организованы две экспедиции, увенчавшиеся подробными отчетами о его гидрологии и фауне. В 1959 г. дон-

ную фауну Бабьего моря исследовала Беломорская биостанция МГУ, а в 1987-м по инициативе Кандалакшского заповедника была организована водолазная экспедиция, выполнившая подводную съемку дна и бентоса.

И еще один отделяющийся беломорский залив стал объектом долговременных наблюдений — губа Долгая (Глубокая) на Соловецком острове. Ее изучение начато одним из основоположников российской океанологии Н.М.Книповичем в конце XIX в., затем продолжено зоологами Н.А.Ливановым из Казанского Императорского университета (1911) и К.П.Чудновым, узником Соловецкого лагеря. В конце XX в. исследование блестяще подытожил Е.А.Нинбург [6]: он и его воспитанники из лаборатории экологии морского бентоса, что при Дворце творчества юных в Санкт-Петербурге, в течение пяти лет детально изучали бентос. Долгая — обширная губа ковшовой типа с глубинами до 20 м и отрицательной температурой уже на 15–17 м (так же, как и в Бабьем море) и арктической фауной, необычно близкой к поверхности.

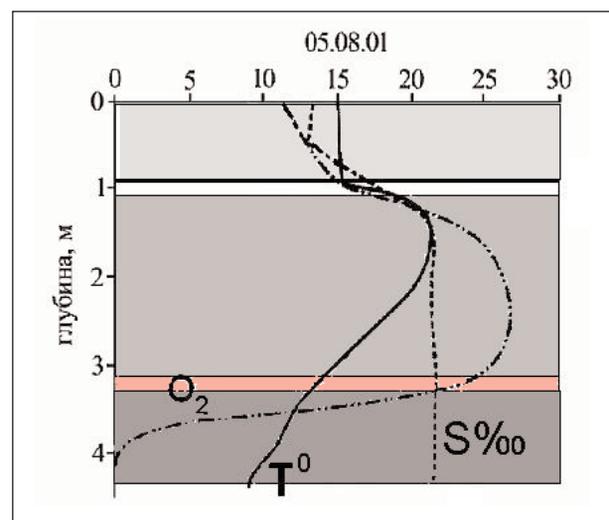
Рукотворные реликты

Тема отделяющихся водоемов стала особенно актуальной в связи с появлением приливных электростанций (ПЭС). Одна из них построена в 1968 г. в России — на Баренцевом море в районе Кислой губы. В 1980-х годах по инициативе Гидропроекта — организации, проектировавшей Кислогубскую ПЭС (и другие на территории России), для оценки ее воздействия на окружающую среду были развернуты комплексные исследования с участием нескольких институтов, специализирующихся на изучении морских экосистем. Результаты этой работы обобщены в коллективной монографии 1995 г. [7]. Водоводы Кислогубской приливной электростанции были устроены так, что препятствовали стоку вод из поверхностного слоя. В результате в губе увеличилось опреснение на поверхности, что затруднило вертикальное конвективное перемешивание и ухудшило кислородный режим глубинных вод. Обитаемый слой воды стал тоньше, уменьшилось количество зоопланктона, и ухудшилась кормовая база для рыб. Заиление дна в сочетании с ослаблением водообмена привело к сероводородному заражению глубоководной области и гибели обитающих там животных. Из-за ослабления приливных колебаний уровня воды литоральная зона стала уже, фауна ее обеднела, биомасса и продуктивность всех сообществ уменьшились. Произойшла полная перестройка всех компонентов экологического сообщества. Изменения в гидрологической системе губы, в составе и распределении морских организмов имеют те же тенденции, что и в водоемах, которые отделяются естественным путем.

То же самое происходит при строительстве других гидросооружений — дамб, мостов, волнорезов, которые расчлняют морскую акваторию. Поэтому так важно изучать ответ морской экосистемы на ослабление водообмена с морем при разных сочетаниях глубины, рельефа дна, мощности источников пресной воды и др. Это остается актуальным также и для прогнозирования последствий гидростроительства и развития альтернативной энергетики.

«Кисло-сладкие» чудеса

Но вернемся к Белому морю. Рядом с Беломорской биостанцией МГУ есть небольшая лагуна, которая в последние годы стала полигоном для изучения закономерностей смены сообществ при отделении водоемов от моря. На некоторых картах она именуется Полупресной (или Полусоленой) лагуной, а на ББС МГУ ее называют Кисло-Сладким озером. Расположенный всего в 1.5 км от ББС, этот водоем долго оставался вне науки. Маленькая опресненная лагуна с обедненной морской фауной казалась неинтересной на фоне морских просторов, куда были устремлены все помыслы исследователей с биостанции. Внимание на нее обратили в конце 1980-х, когда вдруг заметили, что за годы существования ББС этот водоем изменился. Первыми бросились в глаза перемены на берегу: до островка, отделяющего лагуну от моря, уже можно добраться без резиновых сапог. (А какие на островке подосиновики! Впрочем, грибы к теме нашего сообщения отношения не имеют.) Последниковый подъем берега приподнял перемычку, а шторма, набросав гальку и песок, достроили ее. Облик самого водоема тоже сделался другим: на дне стало больше ила, поверхность затянулась «тиной» из нитчатых водорослей, купаться



Вертикальная стратификация озера Кисло-Сладкого.

в нем больше не хотелось. Систематические исследования начались с 1994 г., когда в Кисло-Сладком озере была выполнена первая гидрологическая съемка. В 2001—2003 годах этот водоем, а заодно и еще один, на Зеленом мысу, исследовала комплексная экспедиция с участием представителей Института географии РАН, о чем его сотрудник С.И.Шапоренко рассказал на страницах «Природы» [8]. С его подачи название кисло-сладкое стало нарицательным и закрепилось за водоемами такого типа.

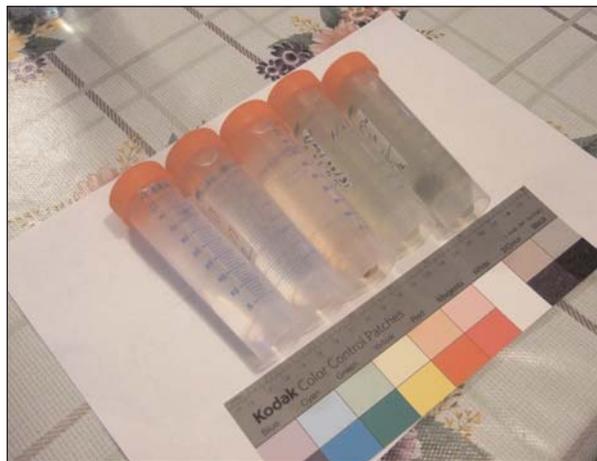
Что в них необычного? В летнее время Кисло-Сладкое озеро состоит из трех слоев: поверхностного опресненного, среднего соленого и соленого придонного с высоким содержанием сероводорода. Удивляет, во-первых, устойчивость расслоения, которой не ожидали от мелкого, всего четырехметровой глубины, водоема. Сложившуюся стратификацию не нарушают ни ветер, ни осеннее охлаждение. Во-вторых, самым теплым из слоев оказался не поверхностный, как это бывает в обычных озерах, а средний слой. Прогревом он обязан черному илу, поглощающему солнечные лучи, и тому, что преобладающие мелководья приходятся именно на этот слой. Из-за «парниковой крыши», роль которой исполняет опресненный верхний слой, тепло аккумулируется. В проведенных позднее гидрохимических исследованиях установили, что в среднем слое также необычайно высоко содержание кислорода. Его так много, что измерить первое время не удавалось: проба воды, едва оказавшись на поверхности, моментально вскипала, будто шампанское, безвозвратно теряя растворенный кислород. Его концентрация в среднем слое Кисло-Сладкого может достигать 200—300% насыщения; это результат «работы» той самой «тины»: слагающие ее водоросли производят кислород в ходе фотосинтеза. Еще одна особенность, отличающая этот водоем от обычных морских заливов, — высокие градиенты: всего на двухметровой глубине температура может падать на 10°, из-за чего возле дна она всегда остается ниже +10°C, даже если лежащий выше слой прогрелся до +25°C. Но самый впечатляющий градиент — электрохимический: средний слой, пересыщенный кислородом, резко граничит с нижним, где очень высоко содержание сероводорода. Между ними всего 5—15 см, а они не только не перемешиваются, но и создают специфическую среду обитания.

С этой зоной связано еще одно «чудо» Кисло-Сладкого озера — узкая прослойка красной воды на границе окисленного и сероводородного слоев. Ее яркий цвет впечатляет, особенно подводников, когда им приходится опускаться за пробами со дна. Подобный слой обнаружен и в озере Могильном, правда, очевидцы называют его розовым. Классик полевой микробиологии Б.Л.Исаченко обнаружил в нем большое количество пурпурных серобактерий *Chromatium* и пришел к вы-

воду, что именно они окрашивают воду. Эти бактерии живут за счет бескислородного фотосинтеза и используют энергию света для окисления сероводорода. Тем самым они выполняют очень важную роль — препятствуют его распространению вверх. 50 лет спустя микробиологи снова исследовали розовую воду из Могильного озера и были удивлены: бактерий этого вида там оказалось очень мало, значит, цвет воды зависит от каких-то других окрашенных форм. В XXI в. эти исследования продолжили сотрудники Института микробиологии РАН. Что цвет придает бактерии, ни у кого сомнений не вызывало. Красный слой, как оказалось, есть во многих стратифицированных водоемах, и всегда возле границы кислородной и бескислородной зон.

Есть он и в модельном меромиктическом оз.Шира в Хакасии, где специально для изучения соленых озер создан научный стационар Института биофизики СО РАН*, и в оз.Шунет, по-соседству. Красный слой там очень тонкий — всего 5 см, и создан серобактериями: в зоне контакта окисленного и восстановленного слоев обнаружено массовое развитие пурпурных, а сразу под ними — зеленых серных бактерий [9]. Такие бактерии живут и в Кисло-Сладком, однако есть сомнения, что именно они отвечают за окраску. Осенью 2012 г. мы отобрали пробы красной воды в двух озерах — Кисло-Сладком и на Зеленом мысу — и передали их на кафедру биофизики биологического факультета МГУ, где ее сотрудник Е.П.Лукашов любезно согласился определить спектры поглощения света. У пурпурных бактерий бактериохлорофилл поглощает свет в длинноволновой области — более 800 нм, у зеленых серобактерий — между 700 и 800 нм, а хлорофилл водорослей — от 600 до 700 нм. Поэтому, зная спектр поглощения воды, можно определить,

* http://www.ibp.ru/field_station/index_rus.php



Пробы из разных слоев озера на Зеленом мысу. Слева направо: поверхностный бесцветный, красный и придонный зеленый.

какая группа фотосинтезирующих организмов в ней преобладает. У спектра поглощения красной воды из пробы с Зеленого мыса оказалось два пика: один соответствовал хлорофиллу водорослей, а второй — бактериохлорофиллу зеленых серобактерий. Высокое содержание пигментов в красных слоях обоих озер подтвердил по интенсивности флуоресценции Д.Н.Маторин. Она оказалась весьма значительной, а полученная им величина относительного выхода переменной флуоресценции — близкой к максимально возможной. Это свидетельствует о том, что фотосинтез в этом слое идет очень эффективно. Значит, за цвет воды отвечают не только бактерии, но и какие-то водоросли. И мы их увидели: под микроскопом мы обнаружили в ней подвижных жгутиконосцев малинового цвета, в капле красной воды их были сотни, а может, и тысячи. Т.А.Белевич, фитопланктонолог с кафедры гидробиологии, определила их как криптофитофлагеллат, вероятно — из рода *Rhodomonas*, а И.А.Милютин из НИИ физико-химической биологии им.А.Н.Белозерского МГУ по последовательности нуклеотидов во фрагменте 18S РНК подтвердила это определение. Кстати сказать, криптозоиды обнаруживали и в других меромиктических водоемах. Например, в модельных озерах Ширы и Шунет в пикноклине в массе развиваются криптофитовые водоросли из рода *Guillardia*. Оба вида жгутиконосцев для фотосинтеза используют пигмент фикоэритрин, который позволяет им осуществлять фотосинтез на глубине, куда доходит только зеленая часть солнечного спектра. Кроме того, они способны к миксотрофному питанию — усваивают органические вещества из воды и могут поедать бактерий. Неудивительно, что именно эти водоросли развиваются в меромиктических водоемах возле границы сероводородного слоя.

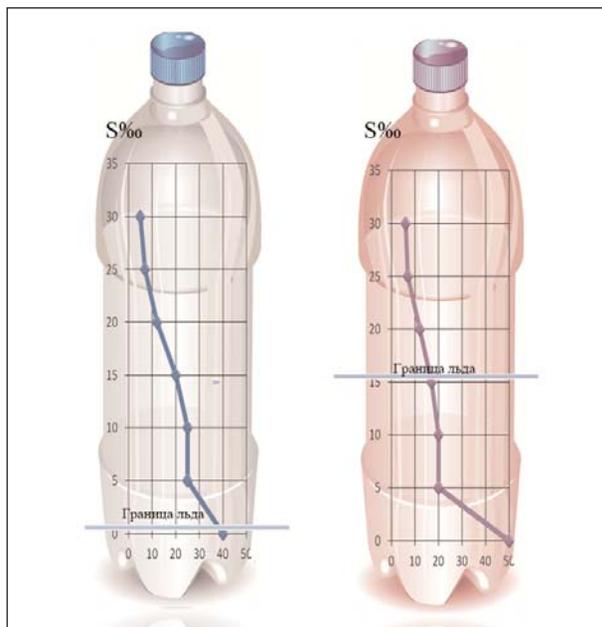
Повышенное содержание растворенных веществ, из-за которого придонные слои меромиктических водоемов обладают повышенной плотностью, бывает обусловлено разными причинами. Соли могут поступать из подстилающих горных пород, из подземных минерализованных источников. Меромиктическим способно стать соленое озеро в степной зоне (таковы озера Ширы и Шунет в Хакасии). Случается, что плотность раствора определена не солями, а органическими веществами, в том числе химическими и бытовыми стоками. И наконец, через меромиктическую стадию проходят прибрежные водоемы при отделении их от моря. Менее плотный верхний слой в них возникает из-за опреснения от осадков, болотной и ручьевой подпитки, а соленый нижний состоит из морской воды. В отличие от эстуариев, где тоже смешивается пресная вода с морской, градиент солености в отделяющихся от моря водоемах направлен не по горизонтали, а по вертикали. Кроме того, их гидрологическая структура может довольно долгое время существовать даже после прекращения связи с морем. Мало того, она

не исчерпывается контактом вод разного происхождения. В таких водоемах нередко возникают слои с совершенно новыми свойствами: с соленостью выше, чем в море; с неожиданно высокой температурой, как в антарктическом озере Ванда; с содержанием кислорода в несколько раз выше насыщения. Появляются также слои ярких цветов — зеленые, желтые, красные.

Все-таки это удивительно: вода, заполнявшая водоем до отделения от моря была точно такой же, как в море, но по прошествии времени солевой раствор не просто разбавляется или в силу испарения концентрируется, а происходит вертикальное расслоение! И при этом возле дна скапливается рассол такой высокой концентрации, какой сама морская вода не бывает ни в какое время года. Одна из возможных причин этого явления — осолонение воды при образовании льда.

Такую гипотезу высказывали сотрудники Мурманской биостанции Е.М.Крепс и П.В.Ушаков. Ведь соленость льда гораздо меньше, чем морской воды, из которой он образовался. Кристаллизуется только вода, а соль концентрируется в ячейках между кристаллами в виде крепкого рассола. По мере нарастания льда рассол стекает вниз, а лед частично сублимируется, и концентрация солевого раствора возрастает. Л.А.Зенкевич, будущий академик, тоже заинтригованный этим феноменом, предложил другое объяснение. По его мнению, концентрирование раствора может происходить и летом: капельки воды, которые ветер срывает с поверхности волн, высыхают на лету и падают на берег в более концентрированном виде или даже кристаллами [10]. Зимой кристаллы соли, называемые «солевыми цветами», образуются в результате вымораживания морской воды, поступающей на поверхность льда через приливные трещины. Бродя на лыжах возле нашей биостанции, мы тоже сталкиваемся с этим явлением: соленая пыль делает лед подобным наждачной бумаге.

Мы решили проверить, возникает ли расслоение при замораживании морской воды, и во время зимней экспедиции на Белое море поручили поставить несколько экспериментов старшекласснице из биологического класса школы №192 Ане Вороновой. Заполнив пластиковые бутылки морской водой, она выставляла их на мороз, а потом давала льду оттаять и измеряла соленость на разных уровнях. Как и ожидалось, вода расслоилась: верхняя часть, которая превратилась в лед, оказалась опресненной, а ниже уровня замерзания концентрация морской соли повысилась. Две недели, что мы провели на биостанции, расслоение сохранялось. Но главное — и это стало неожиданным — слоев в сосуде образовалось не два, а три. Возле самого дна бутылок с размороженной водой Аня обнаружила тонкий слой с крепким рассолом, в два и более раз концентрированнее исходной морской воды. Как мы поняли, этот рассол образовался в порах льда, но в силу высокой плот-



Результаты экспериментального расслоения морской воды при замораживании с разной глубиной промерзания. Под границей льда, независимо от ее глубины, после его оттаивания соленость воды была выше, чем у поверхности, и в обоих случаях на дне возник тонкий слой концентрированного рассола.

ности не перемешался с окружающей водой по пути на дно, а скопился в виде тонкого пересоленного слоя. Падал ли рассол каплями, словно подводный дождь, или стекал по стенкам сосуда, еще предстоит выяснить. Нечто подобное было обнаружено в Антарктике и снято операторами BBC: в толстом антарктическом льду, где образуется много концентрированного переохлажденного рассола, он может изливаться на дно мощной подводной струей. Самое впечатляющее — это последствия мгновенного фазового перехода при соприкосновении струи с чем-нибудь твердым: все, к чему она прикоснется на своем пути (к грунту, например, морским звездам) мгновенно леденеет. Струю переохлажденного рассола называли «пальцем смерти» («Brinicle» ice finger of the Death). В Белом море их пока не находили, но, как показали опыты Ани, по крайней мере дождь из крутого рассола вполне возможен, и он может быть одной из причин возникновения придонного слоя с повышенной соленостью в отделяющихся от моря водоемах.

На пути от моря к суше

Пока мы знали об одном только Кисло-Сладком озере, оно казалось нам уникальным, но когда было обнаружено второе — на Зеленом мысу, — стало понятно, что это явление закономерное. После

внимательного изучения карты побережья в окрестностях биостанции было найдено еще два. Одно из них — оз.Еловое, что недалеко от о.Костьян, излюбленного места экскурсий. Второе — безымянное озеро в Пеккелинской губе, которое мы назвали Трехцветным за три по-разному окрашенных слоя: поверхностный бурый (от гуминовых веществ), средний изумрудно-зеленый и нижний лимонно-желтый. Трехцветное озеро преподнесло сюрприз: оказалось, что солёный меромиктический водоем может маскироваться под обычный пресноводный. Глядя на его поверхность с беззаботно скачущими водомерками, на улиток прудовиков под водой и на береговую сплаvinу из сабельника, ни за что не догадаешься, что под двумя метрами пресной воды лежит еще шесть метров соленой. После этого внимательнее пригляделись к другим пресным прибрежным водоемам — и не ошиблись: проточное Нижнее Ершовское озеро, мимо которого каждую неделю проходят группы экскурсантов, тоже оказалось с соленой «начинкой».

В ближайших окрестностях Беломорской биостанции найдено пять водоемов со слоистой гидрологической структурой. А как в других местах? Летом 2010 г. Всемирный фонд дикой природы спонсировал морскую экспедицию вдоль Карельского побережья Белого моря для обследования побережья под будущий Северо-Карельский природный парк. Спортивная яхта «Белая ночь» Чупинского морского яхтклуба с тремя школьниками-матросами и научной группой из трех человек на борту отправилась на поиски новых соленых озер. Капитан яхты, руководитель яхтклуба Ю.Н.Рыбаков, хорошо зная местность, отметил на карте два десятка лагун и озер, которые, по его мнению, могли оказаться подходящими. Перспек-



Три слоя воды в оз.Трехцветном, давно вышедшем из-под влияния приливов и отливов. Слева направо: поверхностный, желтоватый от гуминовых веществ; зеленый из среднего слоя и мутно-желтый — глубинный. Зеленый и желтый цвета обусловлены, вероятно, обитающими в них бактериями.



Озера Кисло-Сладкое и на о.Тонисоар. (сверху вниз). Сходство панорам этих отделяющихся водоемов выдает общность происхождения из заливов, у каждого на входе — небольшой остров.

тива вдохновляла. За две недели путешествий и приключений, без которых на море не обходится, мы действительно нашли несколько соленых озер и существенно расширили свои представления о разнообразии отделяющихся водоемов. Три из них мы нашли возле Сонострова: это губа Глубокая, оз.Меролабина и оз.Вонючка (на о.Тониосар) и один в Чупинской губе (залив Вонючка). В каждом были проведены гидрологические измерения, отобраны пробы зоопланктона и мейобентоса. Материалы, собранные в этом рейсе, вошли в дипломную работу студентки кафедры зоологии беспозвоночных Т.А.Рогатых. Успех окрыляет, и, вернувшись из рейса, мы продолжили поиски таких озер. С помощью школьной биостанции в с.Ковда мы обследовали Большие Хрусломены —

частично изолированный от моря водоем на о.Оленьем. Об этом озере в своем отчете писал основатель одного из первых беломорских биологических стационаров (и тоже в Ковде), профессор Дерптского университета К.К.Сент-Илер. Подобные водоемы найдены и в Кандалакшском заповеднике.

Важный результат этого рекогносцировочного исследования таков: во всех отделяющихся водоемах, независимо от стадии отделения, мейобентос и зоопланктон представлены морскими формами. Даже при крайне низкой солёности и тот и другой были обедненными, но морскими. Другое открытие — ландшафтное сходство. Подбирая фотографии для отчетной презентации, Е.Д.Краснова, один из авторов этой статьи, по ошибке по-



Здесь и далее фото Е.Д.Красновой, Д.А.Воронова, И.Соловья

меняла местами панорамы двух озер, а когда заметила свой промах, осознала: эти снимки — словно близнецы! У каждой губы на выходе к морю есть остров, «приросший» к одному или двум ее берегам, и мелкий порог, преграждающий дорогу приливам. Видимо, и механизм отделения от моря одинаков. Только стадии изоляции разные. В одних еще в полную силу царствуют приливы, в других они ослаблены приподнявшимся порогом. В третьих порог уже поднялся выше уровня моря, и обмен водой между озером и морем происходит только за счет фильтрации через каменистый порог. А четвертые давно позабыли о приливах и хранят в своих недрах реликтовую соленую воду, захваченную сотни лет назад, до отделения от моря. Возле поверхности вода может быть прес-

ной, чуть солоноватой (1—4‰), что делает присутствие морской соли заметным на вкус, и даже «пересоленной» — с концентрацией выше, чем в море. В каждом из этих озер нижняя соленая водная масса оказалась зоной климатической стабильности, где почти не меняется ни соленость, ни температура. Влияние атмосферы с ее сменой сезонов ограничивается верхними тремя метрами, а глубже — и теплым летом, и морозной зимой — всегда около +5°C, и на соленость не влияют ни летняя засуха, ни весеннее половодье.

Каждый водоем — индивидуальность, а все вместе они выстраиваются в гомологический ряд, в котором можно, не тратя столетий, проследить эволюцию гидрологической и экологической систем, от морских к пресноводным.



Еремеевская губа. Пока она не изолирована от моря, но по прошествии времени, по-видимому, отделится.

Ведь в морских заливах живут морские виды, из которых далеко не все способны переносить опреснение, даже временное. Обитатели же континентальных водоемов нуждаются в пресной воде, и соленая для них смертельна. В каждой экосистеме — и морской, и пресноводной — есть все необходимые звенья пищевой сети: производители первичной продукции, ее потребители, хищники и деструкторы. В процессе отделения водоема от моря виды, исполняющие эти роли, сменяются на другие. Как, в какой последовательности? Постепенно или через катастрофические события? Последовательная и закономерная смена одного сообщества другим на определенном участке среды во времени называется сукцессией. Примеры экологических сукцессий — зарастание пресного водоема и образование на его месте сначала болота, а потом сухопутного сообщества; заселение растениями застывшей лавы после извержения вулкана; восстановление леса после пожара или вырубki. Зная стадии сукцессии, можно прогнозировать события. Для отделяющихся за-

ливов это особенно важно. Если подъем морского дна не прекратится, а пока это очень далеко, все нынешние заливы рано или поздно окажутся на суше. Перед этим они будут проходить через закономерные стадии сукцессии, и людям, чья жизнь связана с побережьем, придется с этим считаться. Экологический прогноз необходим в случаях, когда люди отделяют часть акватории искусственно. Да и само Белое море с его узким мелководным горлом тоже представляет собой водоем, постепенно отделяющийся от Баренцева, и ход событий, хотя и в более крупном масштабе, возможно, будет таким же.

Несмотря на повышение интереса к беломорским отделяющимся водоемам, их изучение находится еще в самом начале. Беломорская биостанция в качестве постоянной полевой базы и возможности современных приборов могут обеспечить исследования целого ряда водоемов, находящихся на разных стадиях отделения от моря. Тогда и появятся результаты, по которым можно будет судить обо всех этапах эволюции водоема. ■

Исследования выполнены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 12-04-10056-к.

Литература

1. Дерюгин К.М. Реликтовое озеро Могильное (остров Кильдин в Баренцевом море). Л., 1925.
2. Гуревич В.И. Реликтовое озеро Могильное. Л., 1975.
3. Реликтовое озеро Могильное (исследования 1997—2000 гг.). Мурманск, 2002.
4. Стрелков П.П., Фокин М.В., Шунатова Н.Н. и др. Реликтовое озеро Могильное (остров Кильдин в Баренцевом море): 80 лет после Дерюгина // Чтения памяти К.М.Дерюгина. СПб, 2005. С.44—59.
5. Крекс Е.М. Гидрологический очерк Черной губы на Новой Земле и реликтовых озер, к ней примыкающих // Исследования морей СССР. Л., 1927. Вып.5. С.10—80.
6. Нинбург Е.А. Долгая губа: изоляция естественная и искусственная // Природа. 1990. №7. С.44—49.
7. Марфенин Н.Н., Малютин О.И., Пантюлин А.Н. и др. // Влияние приливных электростанций на окружающую среду. М., 1995.
8. Шапоренко С.И. Кисло-сладкие озера у полярного круга // Природа. 2004. №11. С.23—30.
9. Лунина О.Н., Брянцева И.А., Акимов В.Н. и др. Сообщество аноксигенных фототрофных бактерий озера Ши́ра (Хакассия) // Микробиология. 2007. Т.76. №4. С.533—544.
10. Зенкевич Л.А. К режиму осолоненных береговых озер Южного острова Новой Земли // Русский гидробиологический журн. 1928. Т.7. №8/9. С.183—187.