

*Природное и культурное наследие Белого моря:
перспективы сохранения и развития*



**МАТЕРИАЛЫ III МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

ЧУПА

2016

Природное и культурное наследие Белого моря: перспективы сохранения и развития

Материалы III международной
научно-практической конференции

15-16-17 июля 2016

П-ов Вершинный, Чупа,
Республика Карелия, Россия

ЧУПА

2016

Как морские заливы превращаются в пресные озера

*Елена Дмитриевна Краснова,
кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Беломорской
биологической станции им. Н.А. Перцова МГУ им. М.В. Ломоносова
e_d_krasnova@mail.ru*

На побережье Белого моря существует множество водоемов, постепенно отделяющихся от моря из-за быстрого послеледникового подъема берега, который продолжается и в наши дни. На пути эволюции из морского залива в пресноводное озеро эти водоемы проходят через меромиктическую стадию и обретают ряд интересных гидрологических и экологических особенностей. Особенно важная роль в них принадлежит микроорганизмам, они определяют особенности их вертикальной стратификации, источник первичной продукции и свойства водоемов, важные с хозяйственной точки зрения.

На побережье Белого моря земная твердь лишь кажется незыблемой. Берег Кандалакшского залива поднимается, и довольно быстро. В районе Беломорской биостанции МГУ, где береговая линия пересекается с Полярным кругом, геоморфологи определили скорость воздымания: за последние 100 лет берег поднялся на 40 см (Олюнина, Романенко, Головина, 2005; Олюнина, Романенко, 2007). Это определили с помощью радиоуглеродного анализа, но и без него каждый может увидеть, как далеко от уреза воды оказались бревна от лесосплава середины XX века, покрытые мхом и обросшие травами. По той же причине некоторые старинные деревни на побережье, куда в XVI-XVII вв. заходили большие поморские суда, в наши дни доступны с моря лишь для лодок. Причина этого поднятия – послеледниковое распрямление земной коры (постгляциальное изостатическое поднятие), которая во время последнего оледенения прогнулась под тяжестью трехкилометровой ледяной горы. Белое море образовалось 12 тысяч лет назад после таяния этого ледника, в геологическом масштабе оно совсем молодое, а берег находится в постоянной динамике. Скорость поднятия достаточно велика, чтобы серьезные изменения очертаний берега были заметны даже на протяжении жизни одного человека. Можно увидеть, как прирастают к берегу острова, как обсыхают мелководья и превращаются в приморские луга, а морские заливы отделяются от моря и преобразуются в озера. Этому способствует извилистая береговая линия, которая отличает беломорский берег от побережья многих других морей, и волнистый донный рельеф, где глубокие участки чередуются с песчаными и каменистыми отмелями, осложняющими судоходство.

Представим себе типичный для Белого моря залив с углублением в середине и отмелью на выходе. По мере подъема дна эта отмель окажется препятствием для приливно-отливных течений, из-за чего в углублении может возникнуть стагнация. Когда отмель поднимется над уровнем малой воды, она ограничит амплитуду колебаний, приливная волна ослабнет и станет асимметричной – с быстрым приливом и долгим отливом. Дальнейшее воздымание отмели превратит ее в фильтрационную дамбу, подобную той, что отделяет от Баренцева моря знаменитое озеро Могильное на острове Кильдин. Когда промежутки между камнями забьются песком и илом, а сама перемычка поднимется настолько, что полностью отсечет приливы и нагоны, бывший залив станет озером, пресным у поверхности и соленым внутри. Такие водоемы называют меромиктическими, что означает «перемешиваемыми частично», они состоят из слоев с разной плотностью воды. Ветровому перемешиванию и тепловой конвекции в них подвержен только поверхностный слой, а более тяжелая нижняя водная масса никогда не перемешивается с верхней. По данным изотопного датирования озерных осадков на Соловецких островах, на меромиктической стадии водоем пребывает несколько столетий (Субетто и др., 2012). Финальная стадия эволюции водоема, отделяющегося от моря, – обычное пресное озеро, у которого сложная история его взаимоотношений с морем записана в донных осадках. Под коричневым озерным сапропелем залегает слой черного грунта, чей цвет обусловлен сульфидами, в которые бактерии-сульфатредукторы переводят сульфаты морской воды. А еще ниже – светлый песок с раковинами морских моллюсков, свидетелями морского прошлого этого водоема. В это может быть трудно поверить, но все пресные озера беломорского бассейна, даже те, что сейчас расположены на высоте ста и более метров, когда-то были морскими заливами (Колька, Корсакова, 2013; Колька и др., 2015). И каждое проходило через меромиктическую стадию.

По всему миру меромиктических водоемов очень мало, они столь необычны, что каждый представляет большой интерес для науки. В тех странах, где есть меромиктические озера, их изучают и охраняют. Существует программа по инвентаризации таких водоемов и их каталог. В России самым известным меромиктическим озером до недавнего времени было озеро Могильное на острове

Кильдин, которое состоит из трех слоев: пресного поверхностного, среднего солёного и нижнего, тоже солёного, но насыщенного сероводородом. Каждому из слоев соответствует свое сообщество живых организмов: верхнему – пресноводное, среднему – морское, а нижнее представляет собой бактериальный котел, в котором разные бактерии осуществляют множество химических процессов: одни восстанавливают серу сульфидов до сероводорода, другие окисляют эти сульфиды до чистой серы, археи вырабатывают метан, другие прокариоты, метанотрофы, его используют, есть микроорганизмы, которые производят водород, и те, которые его употребляют, и т.д. В среднем морском слое озера Могильного обитает особый подвид трески – кильдинская (*Gadus morhua kildinensis*), она попала в это озеро до того, как оно отделилось от моря, с тех пор живет в изоляции и приобрела существенные отличия от материнской популяции. Кильдинская треска занесена в Красную книгу России (<http://biodat.ru/db/rb/rb.php?src=1&vid=205>).

Озеро Могильное столь необычно, что его объявили памятником природы. Долгое время оно представлялось уникальным, пока не выяснилось, что на побережье Белого моря находится множество аналогичных водоемов (Краснова, Пантюлин, 2008). В последние 6 лет их изучением занимается большой коллектив исследователей из разных научных учреждений, а координировать эти работы от лица Беломорской биостанции им. Н.А. Перцова выпало мне. В ближайших окрестностях биостанции мы обнаружили пять озер с соленой или солоноватой водой на дне, которые оказались меромиктическими (Krasnova et al., 2015 a).

Одно из самых замечательных следствий многослойной структуры беломорских меромиктических водоемов — парниковый эффект, или эффект «солнечного пруда». Он проявляется в том, что средний соленый слой воды прогревается гораздо сильнее, чем верхний пресный. Вода достаточно прозрачна, чтобы солнце нагревало темный донный грунт, он отдает тепло воде, которая с ним контактирует, но в атмосферу тепло не уходит, поскольку его изолирует пресный верхний слой: тепловой диффузии препятствует градиент плотности. Аналогичным образом в стратифицированных водоемах накапливается кислород, образующийся в результате фотосинтеза фитопланктона, его содержание в среднем слое озера может достигать до 200-250% насыщения.

Еще одно необычное явление, которое для отделяющихся водоемов, наоборот, типично – цветные слои воды. На границе аэробной и анаэробной зон нередко возникают тонкие, всего 10-50 см толщиной, слои с яркой окраской. В водоемах, еще не полностью изолированных от моря, они имеют красный цвет из-за криптофитовых водорослей *Rhodomonas* sp. (Краснова и др., 2014). Этим жгутиконосцев может быть так много, что их биомасса достигает почти 200 мг/л, и характеризуется не просто как цветение, а гиперцветение (Калмацкая и др., 2014). В тех водоемах, где поверхностная водная масса уже стала пресной, аналогичный слой обычно имеет густо-изумрудный цвет из-за массового развития зеленых серобактерий, осуществляющих аноксигенный фотосинтез (то есть фотосинтез, в ходе которого не выделяется кислород) (Krasnova et al., 2015 b). Особенность этого фотосинтеза заключается в том, что он проходит в анаэробных условиях в присутствии сероводорода, который для «традиционного» оксигенного фотосинтеза – страшный яд. В отличие от зеленых растений, серобактерии для фотосинтеза в качестве источника водорода используют молекулы не воды, а сероводорода, и в результате выделяется не кислород, а сера. В несколько меньшей концентрации зеленые серобактерии встречаются и в водоемах с криптофитовым слоем, непосредственно под ним. Криптофитовые водоросли относятся к миксотрофам, то есть организмам со смешанным питанием: в зависимости от условий, они могут не только сами синтезировать органические вещества, но и поглощать готовые, в том числе – в виде оформленных частиц и бактерий. По всей вероятности, их соседство с бактериальным слоем не случайно. В то же время, сами криптофитовые водоросли – хорошая пища для

следующих звеньев пищевой цепи: инфузорий, многоклеточного зоопланктона, которым, в свою очередь, кормятся крупные беспозвоночные и рыбы. Таким образом, сообщество водоемов, отделяющихся от моря, базируется на первичной продукции аноксигенного фотосинтеза, что фундаментальным образом отличает их от других водных экосистем, включая исходную морскую и финальную пресноводную.

В других меромиктических водоемах бактериальный слой на границе кислородной и бескислородной зон бывает не только зеленым, но и розовым или бурым. Все зависит от того, какие именно бактерии в нем обитают – зеленые, пурпурные или коричневые. Но все они в экосистеме выполняют одну и ту же роль. Аноксигенные фототрофные бактерии, усваивая сероводород, основной источник которого находится в нижней водной массе, препятствуют его диффузии в обитаемые верхние слои. Тем самым бактерии, с одной стороны, поддерживают (а возможно и создают) градиенты хемоклина, а с другой – защищают вышележащие сообщества от ядовитого сероводорода. Кроме того, густая суспензия бактерий не пропускает свет, поэтому ниже цветного слоя круглый год царят темнота и холод, что тоже способствует устойчивости вертикальной стратификации.

Таким образом, при изоляции от моря водоем оказывается в качественно новом состоянии, которое с точки зрения гидрологии характеризуется как меромиксия, а в плане экологии – как сложная система сообществ, в которой определяющая роль принадлежит микроорганизмам.

Поскольку на беломорском побережье таких водоемов много, на разных стадиях отшнуровывания от моря, то, выстроив их в ряд, можно реконструировать события прошлого и дать прогноз будущего. Например, предсказать, что произойдет с морским заливом, если отделить его искусственно, что случается при дорожном строительстве, конструировании приливных электростанций, а иногда и в целях разведения рыбы. Если гидротехническое сооружение создает существенное препятствие для приливного течения, водоем неминуемо перейдет в меромиктическую стадию, большая часть водной толщи станет непригодной для жизни аэробной фауны и флоры, а, в случае поступления большого количества органических веществ, например – в виде бытовых стоков, или, при садковом разведении рыбы, рыбных фекалий или неусвоенного корма, граница сероводородного заражения может подняться настолько высоко, что водоем утратит всякую привлекательность. Есть и хорошие новости: благодаря плотностному барьеру, который неизбежно возникает в стратифицированных водоемах, и вышеупомянутым бактериям отравление атмосферы сероводородом маловероятно. А черный сероводородный ил, который накапливается в таких водоемах – не что иное, как лечебная грязь, которую можно использовать в бальнеотерапии.

Но разве за это мы ценим беломорское побережье?

Благодарности:

Работа поддержана РФФИ (гранты 16-05-00548а и 16-05-00502а).

Литература

Калмацкая О. А., Лаптинский К. А., Медвецкая И. Ю., Краснова Е. Д., 2014. Первая оценка биомассы водорослей в красном слое реликтового Кисло-сладкого озера (Белое море, ББС МГУ) // В: сб. «Мат-лы III Междунар. молодежной науч.-практич. конф. "Морские исследования и образование" (Москва, 22-24 октября 2014 г.)» — М., 2014. С. 173–177.

Колька В.В., О.П. Корсакова, 2013. Перемещение береговой линии и палеогеография Белого моря в позднеледниковье и голоцене // В сб.: «Мат-лы науч. конф. «Морская

биология, геология, океанология – междисциплинарные исследования на морских стационарах», посвященной 75-летию Беломорской биологической станции МГУ (Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, 27 февраля — 1 марта 2013 г.)». — М.: Товарищество научных изданий КМК, 2013. С. 126-131.

Колька В.В., О.П. Корсакова, Т.С. Шелехова, А.Н. Толстоброва, 2015. Восстановление относительного положения уровня Белого моря в позднеледниковье и голоцене по данным литологического, диатомового анализов и радиоуглеродного датирования донных отложений малых озер в районе пос. Чупа (северная Карелия) // Вестник МГТУ, 2015, т. 18, № 2. С. 255-268.

Краснова Е.Д., Пантюлин А.Н., 2013. Кисло-сладкие озера, полные чудес // Природа, 2013, № 2. С. 39-48.

Краснова Е.Д., Пантюлин А.Н., Маторин Д.Н., Тодоренко Д.А., Белевич Т.А., Милютин И.А., Воронов Д.А., 2014. Цветение криптофитовой водоросли *Rhodomonas* sp. (Cryptophyta, Rhodomonadaceae) в редокс-зоне водоемов, отделяющихся от Белого моря // Микробиология, 2014, т. 83, № 3. С. 346-354.

Олюнина О.С., Ф.А. Романенко, 2007. Поднятие Карельского берега Белого моря в голоцене по результатам изучения торфяников // Мат-лы V всерос. совещ. по изучению четвертичного периода: «Фундаментальные проблемы квартера: итоги изучения и основные направления дальнейших исследований» (7-9 ноября 2007 г., Москва, Геологический институт РАН). М.: ГЕОС, 2007. С. 312–315.

Олюнина О.С., Ф.А. Романенко, Е.А. Головина, 2005. Постледниковое поднятие Карельского берега Белого моря: предварительные результаты изучения береговых торфяников // Геология морей и океанов: тез. докл. XVI межд. школы по морской геологии, т. I, М., 2005, с. 91–92.

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., 2012. Хронология изоляции озер Соловецкого архипелага и скорости современного озерного осадконакопления // Доклады Академии наук. Серия Геологическая. М.: Наука, 2012, т. 446, № 2, с. 183-190.

Krasnova E.D., Kharcheva A.V., Milyutina I.A., Voronov D.A., Patsaeva S.V., 2015 b. 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, v. 95, №8. Pp. 1579-1590.

Krasnova E., Voronov D., Frolova N., Pantyulin A., Samsonov T., 2015 a. Salt lakes separated from the White Sea // EARSel eProceedings, v.14, № S1. Pp. 8-22.