

УДК 627.42:627.8:504.4(063)

ББК 26.222.5/6+26.221

Д46

Утверждено

РИС Ученого совета

Российского университета

дружбы народов

Редакционная коллегия:

д.т.н. В.К. Дебольский, д.т.н. Е.И. Дебольская, к.т.н. И.И. Грицук,
к.т.н. Е.Н. Долгополова, к.г.н. М.В. Исупова, к.т.н. О.Я. Масликова

Д46 Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей : труды VIII Международной научно-практической конференции : в 2 т. Москва, РУДН, 24–27 ноября 2014 г. – Москва : РУДН, 2014.

ISBN 978-5-209-06191-5

Т. 1. – 596 с. : ил.

ISBN 978-5-209-06192-2 (т. 1)

В издание включены доклады VIII Международной научно-практической конференции «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей». Основная задача конференции – представление и обсуждение наиболее важных и значимых результатов исследований в области динамики и термики водных объектов, полученных в последние пять лет, определение приоритетных направлений исследований в ближайшие годы и их координация.

Все публикуемые доклады представлены в авторской редакции.

Труды подготовлены к печати сотрудниками лаборатории динамики русловых потоков и ледотермики ИВП РАН и изданы при финансовой поддержке Российской академии наук, ОАО «Русгидро», Федерального агентства водных ресурсов РФ.

ISBN 978-5-209-06192-2 (т. 1)

ISBN 978-5-209-06191-5

© Коллектив авторов, 2014

© Российский университет дружбы народов,
Издательство, 2014

странах с районами с суровыми климатическими условиями, прежде всего в США и Канаде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бузин В.А. Опасные гидрологические явления на реках. – СПб, изд-во РГГМУ, 2008, 228 с. – ISBN 978-5-86813-220-9.
2. Донченко Р. В. Ледовый режим рек СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. -247 с.
3. Козлов Д.В. Лед пресноводных водоемов и водотоков. – М.: МГУП, 2000. – 263 с. – ISBN 5-89231-043-4.

ТЕРМИЧЕСКИЙ И ЛЕДОВЫЙ РЕЖИМЫ РЕЛИКТОВЫХ ВОДОЕМОВ, ОТДЕЛЯЮЩИХСЯ ОТ БЕЛОГО МОРЯ⁴

Е.Д. Краснова*, **Н.А. Демиденко****, **А.Н. Пантюлин*****,
Н.Л. Фролова***, **Л.Е. Ефимова*****, **В.А. Широкова******

**МГУ имени М.В. Ломоносова, Беломорская биологическая станция им. Н.А.Перцова, биологический факультет, Москва, Россия*

*** Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Москва, Россия*

**** МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия*

***** Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН, Москва, Россия*

e-mail: e_d_krasnova@wsbs-msu.ru

⁴ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 14-17-00155)

ВВЕДЕНИЕ

В последние несколько лет на Беломорской биостанции МГУ активно развиваются междисциплинарные исследования отделяющихся от моря водоемов. Интерес к этим водным объектам связан с их своеобразием. По экологической структуре они, с одной стороны, резко отличаются от других участков беломорской акватории, а с другой – представляют собой типичное для беломорского побережья явление. Небольшие размеры, четкость гидрологической структуры и ограниченный видовой состав биоты делают их удобным объектом для построения моделей, применимых к более крупным участкам акваторий, включая все Белое море, которое тоже представляет собой частично изолированный водоем, но более сложный для моделирования.

На Беломорской биостанции (ББС) МГУ отделяющиеся от моря водоемы стали объектом пристального внимания в конце 1990-х годов. Первым было исследовано озеро Кисло-Сладкое (полупресная лагуна) в 1,5 км от ББС МГУ [2], удивившее океанологов необычной трехслойной структурой водной толщи, устойчивой к ветровому перемешиванию. Несколькими годами позже в окрестностях биостанции было обнаружено еще одно подобное озеро – лагуна на Зеленом мысу. В общей сложности в этом районе сейчас известно о 15 водоемах на разных стадиях отделения от моря, включая четыре меромиктические водоема, три проточных лагуны и два залива с совсем еще неизменным приливным режимом. Кроме них еще четыре прибрежных водоема при натурном обследовании оказались пресными, совершенно утратившими связь с морем. В данной статье использованы материалы полевых исследований, выполненных на базе Беломорской биологической станции им. Н.А.Перцова в 2010-2014 гг. В январе 2014 г. озера были обследованы силами студентов географического и физического факультетов МГУ в ходе совместной научной студенческой

экспедиции, в июне 2014 г. – студентами-гидрологами во время производственной практики (рис. 1). Во время этих экспедиций были получены абсолютные высотные отметки большинства озер. Температура и соленость определялись с помощью YSI Pro30.

ОЗЕРА, НЕ УТРАТИВШИЕ СВЯЗЬ С МОРЕМ (БУДУЩИЕ «ВОДОЕМЫ-ИЗГОИ»)

Оз. Кисло-Сладкое (Полупресная лагуна) находится в 1,5 км к востоку от Беломорской биостанции МГУ. Координаты: 66° 32,87', N, 33° 08,14' E. Длина озера - 196 м; ширина - 147 м; площадь — 16200 м²; площадь водосборного бассейна 157000 м²; соотношение площади бассейна к площади озера — 9,7; средняя глубина — 1-1,5 м, максимальная — 4,5 м. Абсолютная отметка поверхности льда в начале февраля 2014 г. — 0,4 метра, водной поверхности — 0,01 метра. Регулярных приливных колебаний в озере нет.

Озеро образовалось в результате отделения морского залива, отгороженного от основной акватории островом с двумя каменистыми отмелями по сторонам. Одна из отмелей из-за подъема суши поднялась над поверхностью воды и превратилась в сухую перемычку, в настоящее время покрытую травянистой растительностью. Вторая перемычка представляет собой каменистый порог, через который большую часть времени течение направлено из озера в море, и лишь во время сизигийных приливов и высоких нагонов морская вода поступает в озеро. Пополнение озера пресной водой осуществляется преимущественно во время таяния снега, а дебит стока пресного ручья в летнее время не превышает 1,5 м³ сут⁻¹. Так, по сравнению с зимним периодом 2014 г. уровень воды в озере за счет притока пресной воды увеличился примерно на 30 см.

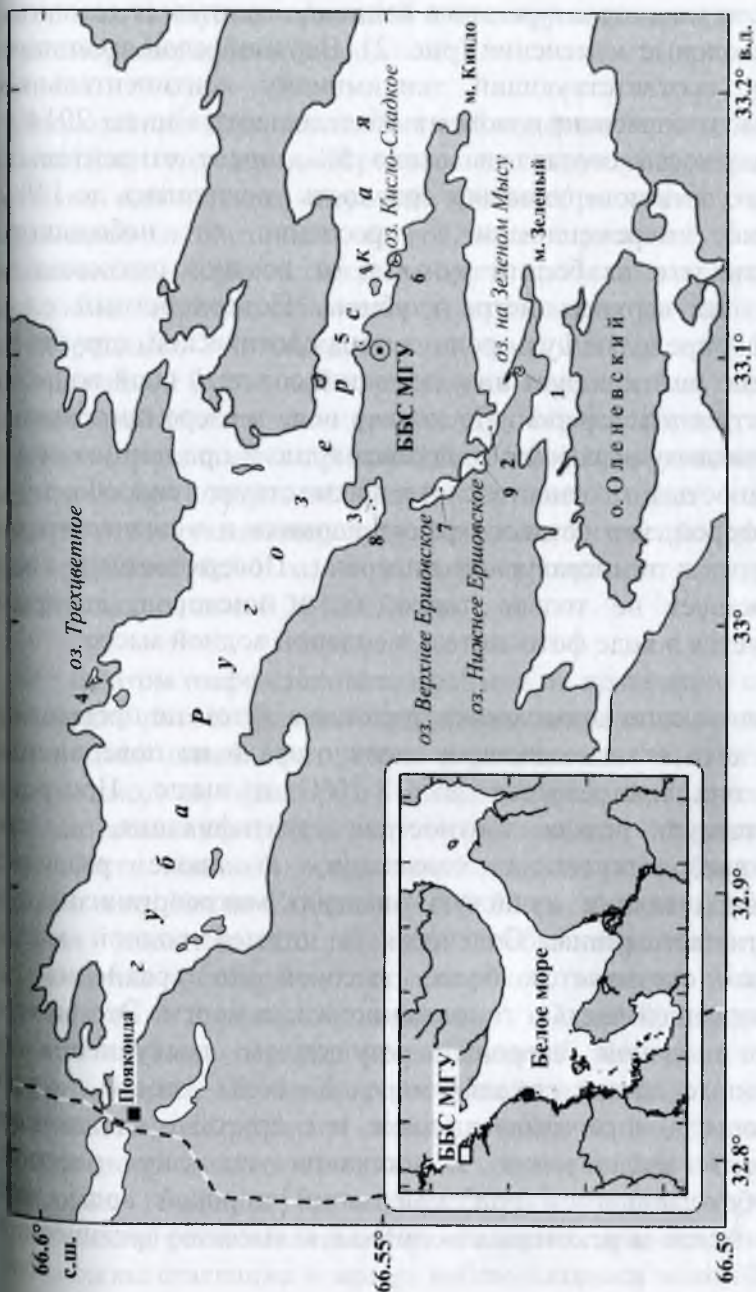


Рис. 1. Район исследований

Вертикальная структура этого водоема испытывает сезонные и межгодовые изменения (рис. 2). Верхний слой толщиной 0,5 м, соответствующий эпилимниону континентальных водоемов, опреснен; в момент обследования в июне 2014 г. его соленость составляла около 5‰, после относительно жаркого лета поверхностная соленость увеличилась до 11‰. Ветровое перемешивание, опреснение от небольшого вытекающего из болота ручья и от осадков сказываются только на верхнем метре глубины. Поверхностный слой играет определяющую роль в гидрологической структуре водоема: он изолирует нижележащий соленый слой воды от контакта с атмосферой. Поскольку вода в озере прозрачная, солнечные лучи хорошо прогревают дно и придонную воду, но разность в плотности слоев препятствует теплообмену с атмосферой, что создает эффект парника и в летнее время приводит к температурной инверсии. Поверхностный слой задерживает не только тепло, но и кислород, который образуется в ходе фотосинтеза в соленой водной массе.

В нижнем слое воды температура даже летом не превышает 11°C, хотя в вышележащих слоях озера и на поверхности моря она прогревается до 18-20°C и выше. Прогреву препятствует резкая плотностная стратификация, и, как следствие, отсутствие конвекции, а также развитие перехватывающих лучистую энергию микроорганизмов в области хемоклина. Соленость в нижней водной массе нередко оказывается более высокой по сравнению с вышележающей частью гиполимниона и с морем. Это может быть, с одной стороны, результатом поступления в придонные слои свежей морской воды зимой, когда соленость в море самая высокая, а с другой – следствием ледового высаливания и стекания ко дну рассола, высвобождающегося при замерзании морской воды, что имеет место в некоторых водоемах в высоких арктических

широтах и служит причиной повышения солености воды в беломорских водоемах.

Многолетние круглогодичные наблюдения на этом водоеме показали, что такая вертикальная структура, характерна только для летнего периода. Осенью, в случае высоких приливов и нагонных ветров и поступления большого количества морской воды, может происходить промывка водоема, в результате чего он становится по всей толще однородным. Это наблюдалось в зимы 2011/12 и 2013/14 гг. После такой промывки характерная вертикальная структура восстанавливается не сразу. Другой сценарий зимних событий развивается при слабой осенней промывке или если ее нет: при ледоставе водоем по всей толще сохраняет положительную температуру, сероводород распространяется до глубины 0,5-1 м, и в озере происходит замор. Это наблюдалось зимой 2012/13 года.

Лед на этом озере становится раньше по сравнению с морем и сходит позже. Ледовый покров служит для этого водоема не только одной из причин опреснения поверхности, но, возможно, и фактором сезонной изоляции, создавая дополнительную преграду приливам. Максимальной мощности ледовый покров достигает во второй половине зимы: в оз. Кисло-Сладком — 40- 50 см, в море — 60-70 см. Такая толщина достаточна, чтобы нарастить порог, полностью перекрыть путь морской воде и обеспечить сезонную изоляцию водоема. Однако вопрос о существовании периода полной зимней изоляции от моря пока открыт. В пользу сезонной изоляции в период максимального развития ледового покрова свидетельствуют целостность ледового покрова на озере – на нем нет трещин, которые говорили бы о колебаниях уровня, торосов и признаков разлива воды. Без изоляции вряд ли были бы возможны стагнация и замор, наблюдавшиеся зимой 2012/13

гг. Однако в некоторые зимы связь с морем, по всей вероятности, все же сохраняется. Возможно, с таким поступлением воды связаны загадочные фонтаны из соленой воды, зарегистрированные в начале февраля 2010 года, когда во льду озера возникло несколько промоин круглой формы, над которыми возвышались купола из воды, поступающей под напором снизу, с такой же соленостью, как в озере и в море. За все годы наблюдений, такое явление было отмечено только один раз.

Лагуна на Зеленом мысу расположена у основания полуострова Зеленый мыс и связана с кутом губы Кислой. Координаты: $66^{\circ} 31,80' \text{ N}$, $33^{\circ} 05,55' \text{ E}$. Лагуна имеет округлую форму с шириной и длиной по 120 м, площадь — 12840 м^2 ; средняя глубина — 2 м, максимальная — 6,5 м. Абсолютная отметка поверхности льда в начале февраля 2014 г. — $-0,05 \text{ м}$, водной поверхности — $-0,4 \text{ метра}$ (ниже соответствующих отметок моря). Озеро образовалось на месте древнего пролива, который некогда отделял от материка остров, ставший впоследствии полуостровом Зеленый мыс. Лагуну от залива отделяет каменистый порог, через который во время каждого прилива морская вода поступает в озеро. Приливный цикл в озере асимметричный, продолжительность прилива меньше, чем отлива, то есть большую часть времени течение направлено из озера в море. Амплитуда приливных колебаний около 10 см.

Лагуна на Зеленом мысу — второй из отделяющихся водоемов, у которого была обнаружена трехслойная гидрологическая структура, аналогичная таковой в оз. Кисло-Сладком. В ней также есть три слоя, но, поскольку озеро глубже, слои шире и несколько отличаются значениями гидрологических параметров. Одно из отличий — более резкие градиенты. Придонная вода в лагуне более холодная, чем в нижнем слое оз. Кисло-Сладкого, и более соленая.

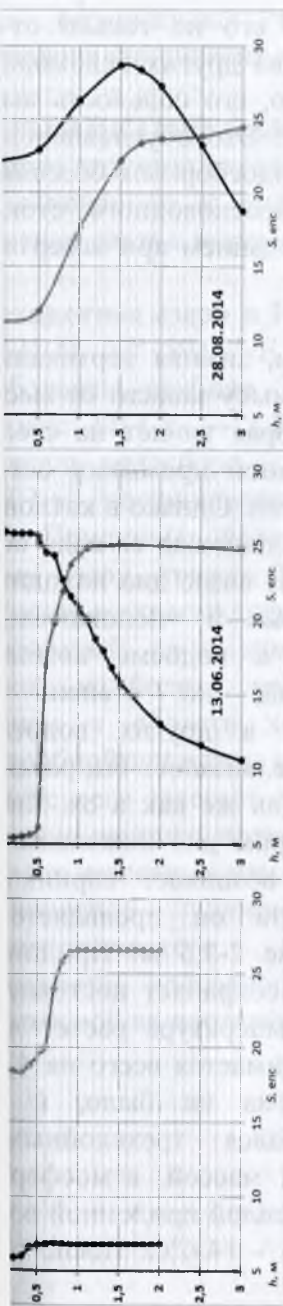


Рис. 2. Вертикальные профили температуры и солёности в разные сезоны 2014 г. в оз. Кисло-Сладком

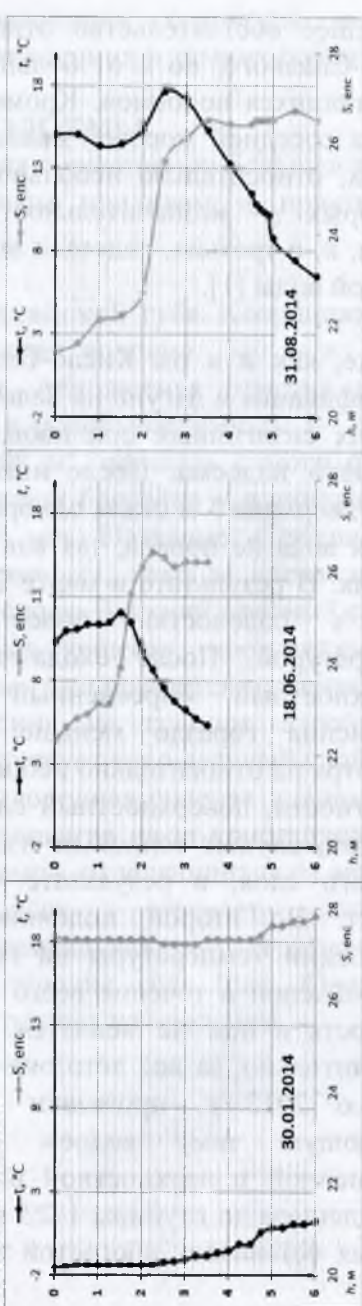


Рис. 3. Вертикальные профили температуры и солёности в разные сезоны 2014 г. в лагуне у Зеленого Мыса

Последнее обстоятельство отличает его не только от оз. Кисло-Сладкого, но и от большинства других беломорских отделяющихся водоемов. Кроме того, его соленость выше, чем на соседней морской акватории. Это обусловлено, во-первых, относительно небольшим водосборным бассейном, во-вторых — незначительностью пресноводного стока с берега, и, в-третьих, ледовым высаливанием при замерзании морской воды [1].

Так же, как и в оз. Кисло-Сладком, зимняя вертикальная стратификация в лагуне на Зеленом мысу зависит от высоты осенних сизигийных приливов, которая влияет на степень промывки водоема. После интенсивной промывки осенью 2012 г. верхние 5 м стали однородными. Однако в котловину свежая вода не попала, так как заполняющая ее вода более соленая. В результате в марте 2013 г. возле дна находилась вода с соленостью более 28‰ и положительной температурой. После схода льда в водоеме возникает поверхностный опресненный слой, но степень его опреснения гораздо меньше, чем в других водоемах: Несмотря на относительно небольшие, казалось бы, различия в плотности, поверхностный слой, так же как в оз. Кисло-Сладком, служит тепловым изолятором для нижележащего соленого слоя, в результате чего возникает парниковый эффект. Во второй половине лета он проявляется в повышении температуры на глубине 2-3,5 м. Придонный соленый слой в течение всего лета сохраняет постоянство: соленость в нем не меняется, а температура растет лишь незначительно: за все лето она поднимается всего на 4,5°C. Осенью 2012 г. промывки водоема не было, и всю следующую зиму водоем оставался трехслойным с опресненной поверхностной водной массой, атмосферным охлаждением до глубины 1-2,5 м и теплой придонной водой, которая оставалась прогретой до +3 - +4,6°C. После схода

льда вертикальная термохалинная структура водоема одинакова вне зависимости от осенних и зимних событий.

МЕРОМИКТИЧЕСКИЕ ВОДОЕМЫ

Данные водоемы находятся на существенно большей высоте по отношению к сизигийным приливам и практически утратили связь с морем.

Трехцветное озеро в Пеккелинской губе. Координаты: 66° 35,53' N, 32° 59,97' E. Размеры водоема: 340 м × 150 м, наибольшая глубина 7,5 м. Абсолютная отметка льда в феврале 2014 г. — 1,25 м, а поверхности воды — 0,85 м. Площадь водосбора — 643809 м², площадь самого озера — 32407 м², соотношение площади бассейна к площади озера 19,9. Приливных колебаний нет. Название «Трехцветное» этому озеру, прежде безымянному, дано за впечатляющие различия в окраске трех его слоев. Верхний пресный слой — желтоватый из-за гуминовых веществ, поступающих со стоком из болота, под ним располагается соленая вода, причем в области хемоклина на границе аэробной и анаэробной зон всегда присутствует ярко-зеленый слой воды, а ниже него залегает сероводородная соленая водная масса лимонно-желтого цвета, мутноватая из-за кристаллов серы. Из всех известных нам водоемов, отделяющихся от моря, оз. Трехцветное лучше всех отвечает понятию меромиктического. Вертикальная стратификация сохраняется постоянной в течение года (рис. 4) и была одинаковой на протяжении трех лет наблюдений.

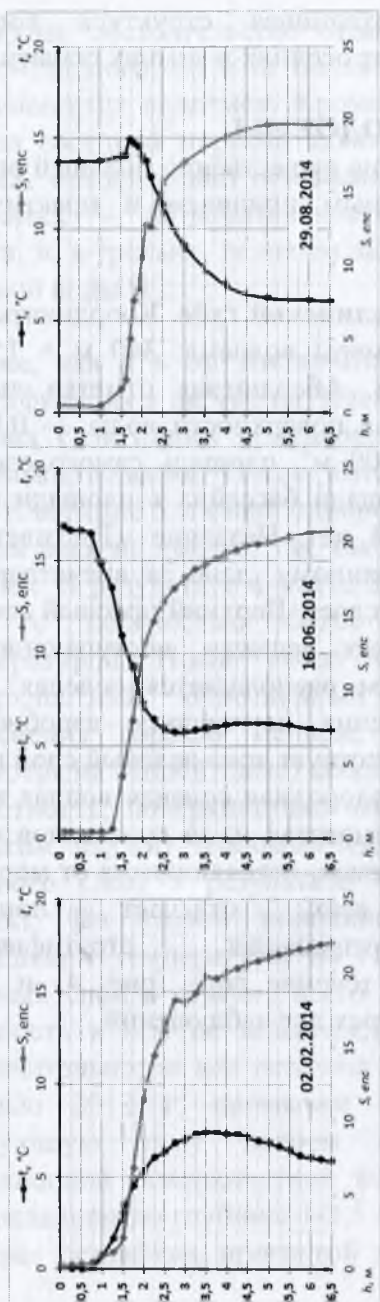


Рис.4. Вертикальные профили температуры и солености в разные сезоны 2014 г. в оз. Трехцветном

Пресный миксолимнион располагается до глубины 1 м, застойная соленая водная масса (монимолимнион) начинается с глубины 1,5 м, а между ними находится узкий пикноклин с резкими физико-химическими градиентами. Слой зеленой воды мощностью 15-20 см располагается непосредственно под хемоклином. В межень он приходится на зону 1,5 – 1,75 м, осенью, когда за счет осадков миксолимнион становится толще – на 1,8 – 1,9 м. Температура воды в придонных слоях в течение всего года постоянна и составляет 5,5-6,0°C. Поверхностный слой после схода льда постепенно прогревается до температуры 20-22°C. Начиная с конца лета, наблюдается слой относительно теплой по сравнению с поверхностью воды примерно на глубине 2-3 м.

В ноябре 2011 г. во все прибрежные водоемы, в том числе в оз. Трехцветное, высокий сизигийный прилив, совпавший с ветровым нагоном, забросил свежую морскую воду. Если в другие водоемы, не столь далеко продвинувшиеся по пути отделения от моря, соленая вода попадает с разной периодичностью, то для оз. Трехцветного это событие уникальное. В результате мощность миксолимниона уменьшилась с 1,5 м до 1 м, он стал солоноватым (5‰), на глубине от 1,5 до 3,5 м соленость возросла на 4-10 единиц. Ниже глубины 4 м термохалинный режим не изменился. Таким образом, меромиктическая структура оказалась достаточно устойчивой к возмущениям такого рода.

Нижнее Ершовское озеро. Координаты: 66° 32,28' N, 33° 3,48' E. Это нижнее из двух озер, образовавшихся на месте древнего пролива, соединенное протокой с пресным Верхним Ершовским озером, из которого получает пресную воду. Абсолютная отметка уровня льда в январе 2014 г. — 1,2 м, уровня воды – 0,8 м. Длина озера 550 м, ширина 250 м, максимальная глубина — 2,5 м. Площадь бассейна

составляет 1225349 м², площадь озера – 81025 м², отношение данных величин равняется 21,4. От моря это озеро отделено каменистым барьером, по которому из него вытекает пресный ручей. Регулярного поступления воды из моря нет. Большая часть водной толщи почти пресная (0,1-0,7‰). Мы обнаружили, что в донном рельефе озера есть два углубления 2,3 и 2,8 м, разделенных мелководным барьером с глубиной 0,5 м. В начале наших наблюдений в июле и августе 2011 г. соленая вода (7,5-8,9‰) присутствовала только в ближней к морю яме, начиная с глубины 1,5 м. В дальней яме в это время придонная вода имела соленость 0,2-0,7‰.

В конце 2011 г. после штормового нагона в его поверхностном слое соленость повысилась до 1,1‰, а соленая вода была найдена не только в ближнем углублении (15‰), но и в дальнем (11,8‰). В последующие два года поверхностный и придонный слои постепенно опресняются, но стартового состояния не достигли даже к началу 2014 г. Одновременное существование придонной солоноватой и поверхностной опресненной водных масс дает основания считать оз. Нижнее Ершовское меромиктическим.

ВЫВОД

Среди описанных водоемов есть все стадии развития изоляции водоемов морского происхождения от лагун с полной амплитудой приливных колебаний до стабильных меромиктических водоемов (оз. Трехцветное, оз. Нижнее Ершовское). Главная черта, объединяющая описанные водоемы — устойчивая вертикальная стратификация, в предельном варианте стремящаяся к меромиксису. Нам представляется, что стадия меромиктического водоема — закономерный этап гидрологической эволюции морского залива при его отделении от моря. Дальнейшее изучение уже известных водоемов и дополнение этого ряда новыми объектами позволит определить закономерности

гидрологический и экологической эволюции морских акваторий при их отделении от моря, и подойти к прогнозированию последствий искусственной изоляции морских акваторий от моря, например, при строительстве приливных электростанций, дорожных дамб и мостов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пантюлин А.Н., Краснова Е.Д. Отделяющиеся водоемы Белого моря: новый объект для междисциплинарных исследований // Геология морей и океанов: Материалы XIX Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. III. М.: 2011. С. 241-245.
2. Шапоренко С.И., Корнеева Г.А., Пантюлин А.Н., Перцова Н.М. Особенности экосистем отшнуровывающихся водоемов Кандалакшского залива Белого моря // Водные ресурсы. 2005. Т. 32. № 5. С. 517-532.

ЛЕДОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ НА РЕКАХ СЕВЕРНОГО СКЛОНА БОЛЬШОГО КАВКАЗА⁵

Е.О. Кузьмина

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

e-mail: ka_small16@mail.ru

Ледовые явления на реках предгорий и северного склона Большого Кавказа носят непостоянный характер из-за неустойчивых зимних условий. Большое влияние на пространственную изменчивость ледовых явлений и их характер оказывает высота местности. В районе встречаются

⁵ Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (грант 09-05-00399)