

УДК 551.464.6.02:551.468

## ИЗОТОПНО-КИСЛОРОДНЫЙ СОСТАВ ВОДЫ И СНЕЖНО-ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ОТДЕЛЯЮЩИХСЯ ВОДОЕМОВ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ ИЗОЛЯЦИИ ОТ БЕЛОГО МОРЯ

© 2013 г. Академик А. П. Лисицын, Ю. К. Васильчук, В. П. Шевченко, Н. А. Буданцева,  
Е. Д. Краснова, А. Н. Пантюлин, А. С. Филиппов, Ю. Н. Чижова

Поступило 04.09.2012 г.

DOI: 10.7868/S0869565213100204

Функционирование экосистемы Белого моря неразрывно связано с гидрогеохимическими процессами, происходящими в его водосборном бассейне [1]. Одним из слабо изученных процессов на границе Белого моря является отделение от моря небольших заливов и образование озер, происходящее в ходе эвстатического поднятия побережья [2–4].

Эволюция таких водоемов включает несколько стадий [5]. На первой стадии сохраняется приливной водообмен через порог, но происходит некоторое обособление вод котловины. Когда порог поднимается настолько, что блокирует приливной водообмен, не препятствуя при этом стоку поверхностных вод в море, водоем переходит во вторую стадию развития. Это стадия водоема-изгоя, отторгнутого морем, но не освоенного сушией [6]. Дальнейший подъем порога обуславливает переход к следующей стадии эволюции водоемов. На поверхности образуется слой пресной воды, а в котловине сохраняется соленая вода. Это стадия меромиктического водоема. Подобные водоемы редки на территории России [7–10], в мире их насчитывается около 200 [11, 12].

Исследование отделяющихся водоемов важно для выявления относительных колебаний уровня моря в голоцене в связи с климатическими изменениями. Для изучения длительных изменений в масштабе последних 10 000 лет анализируют донные осадки отделившихся и отделяющихся от моря водоемов [2–5], а для изучения кратковременных изменений, происходящих в последние годы и даже месяцы, необходимы измерения гидрофизических характеристик и изотопно-кислородного состава воды. Содержание стабильных изото-

пов кислорода в воде, снеге и льду является важным индикатором процессов образования льда и стратификации вод в водоемах [13, 14].

В Белом море, благодаря особенностям его морфологии, отделяющиеся водоемы представлены многообразно. Сравнительные исследования находящихся в разных стадиях отделения водоемов проводились ранее только в летний период [6, 15], данные о зимнем состоянии этих озер отсутствуют.

Цель нашей работы – исследовать изотопно-кислородный состав вод, льда и снега в отделяющихся от Белого моря водоемах и на основе этих данных идентифицировать структурные особенности этих водоемов в зимний период.

Исследования были проведены во время комплексной экспедиции в Кандалакшском заливе Белого моря в окрестностях Беломорской биологической станции им. Н.А. Перцова Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (ББС МГУ) в период с 20 марта по 2 апреля 2012 г. В процессе полевых работ были выполнены исследования водоемов, находящихся на разных стадиях отделения от моря, в районе пролива Великая Салма и Ругозерской губы в ранневесенний период. Были изучены гидрофизические и изотопные характеристики воды озер, льда и снега. Обследовано пять озер (Кисло-Сладкое, Трёхцветное, Нижнее Ершовское, Верхнее Ершовское, озеро на Зеленом Мысу), Ермолинская губа и снег у причала ББС МГУ (рис. 1, табл. 1).

Пробы воды из разных слоев озер отбирали с помощью шланга и погружного насоса. Измерения температуры и солености через 0.5 м выполнены кондуктометром ProfiLine Cond 197i. Снег отбирали в чистые полиэтиленовые пакеты. Керны льда добывали с помощью титанового кольцевого бура, делили на слои, визуально различающиеся по структуре льда, упаковывали в чистые полиэтиленовые пакеты. Снег и лед растапливали при температуре 16–18°C.

*Институт океанологии им. П.П. Шишова  
Российской Академии наук, Москва  
Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова*

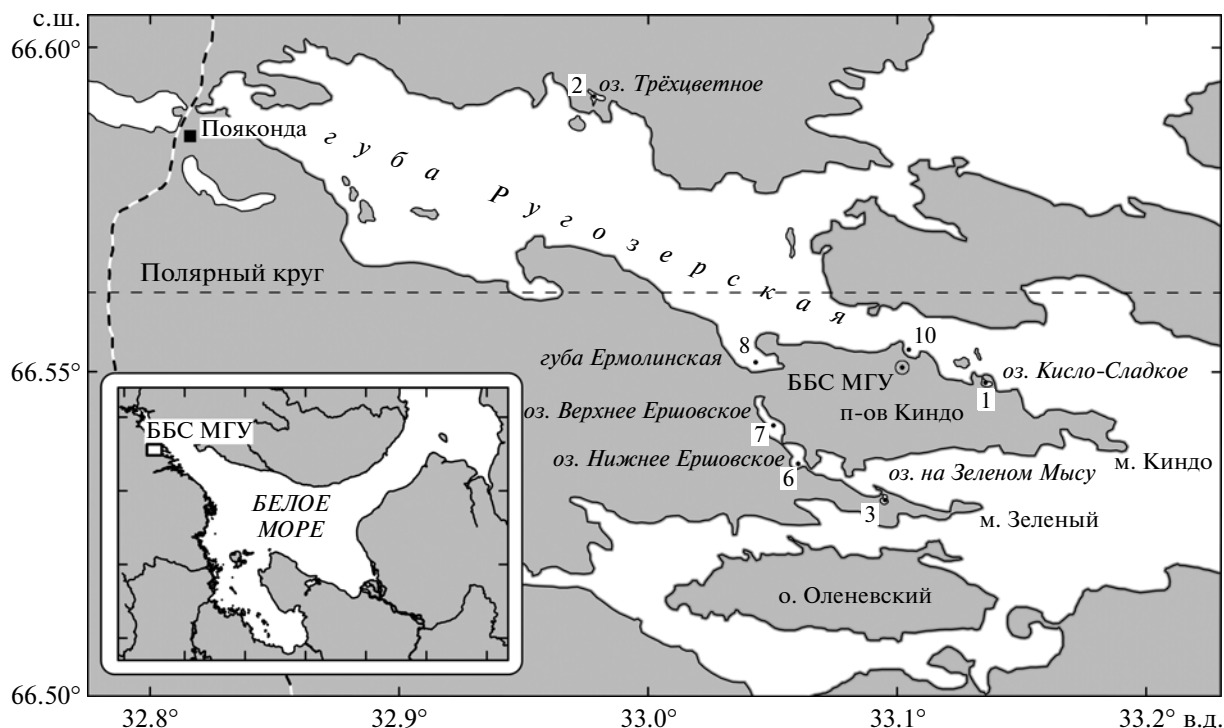


Рис. 1. Схема расположения станций на полуострове Киндо (Кандалакшский залив Белого моря). Координаты станций и глубины отбора проб см. в табл. 1 и 2.

Образцы озерной и морской воды, снега и льда анализировали в изотопно-геохимической лаборатории географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова на масс-спектрометре Delta-V со стандартной опцией газ-бенч по стандартным методикам. Точность измерений на приборе составляет  $\pm 0.04\text{‰}$  по  $\delta^{18}\text{O}$ . При измерении  $\delta^{18}\text{O}$  анализируемые образцы воды уравнивались с  $\text{CO}_2$  в течение 24 ч. Для измерений использовали международный стандарт среднеокеанической воды SMOW-V и лабораторные стандарты МАГАТЭ и изотопной лаборатории Австрийского технологического института.

Обследованные водоемы располагаются следующим образом по степени обособления от мо-

ря. Ермолинская губа имеет свободный водообмен с морем. Озеро на Зеленом Мысу находится в начальной стадии отделения, в нем есть постоянный приливной водообмен с морем, приливные колебания уровня составляют около 10 см. Кисло-Сладкое озеро лишено постоянного водообмена, морская вода проникает в него эпизодически, но высота порога не препятствует свободному стоку поверхностных вод. Трёхцветное озеро считается полностью отделившимся от моря, на что указывали поверхностный двухметровый слой пресной воды и нижний соленый слой, характеристики которого не менялись в течение четырех лет (типичный признак меромиктического водоема). Верхнее Ершовское озеро является

Таблица 1. Время, координаты точек и виды работ в окрестностях ББС МГУ, Белое море (26–30 марта 2012 г.)

Станция	Местоположение станции	Дата	с.ш.	в.д.	Глубина, м
3	Озеро на Зеленом Мысу	26.03	66°31.811'	33°05.702'	6
2	Озеро Трёхцветное	27.03	66°35.548'	32°58.697'	6.5
8	Ермолинская губа	27.03 (снег) 29.03 (лед, вода)	66°33.089'	33°02.589'	1.25
10	Причал ББС	27.03	66°33.206'	33°06.279'	2
1	Кисло-Сладкое озеро	28.03	66°32.900'	33°08.125'	4
7	Верхнее Ершовское озеро	29.03	66°32.505'	33°03.018'	2.7
6	Нижнее Ершовское озеро	30.03	66°32.151'	33°03.614'	1.6

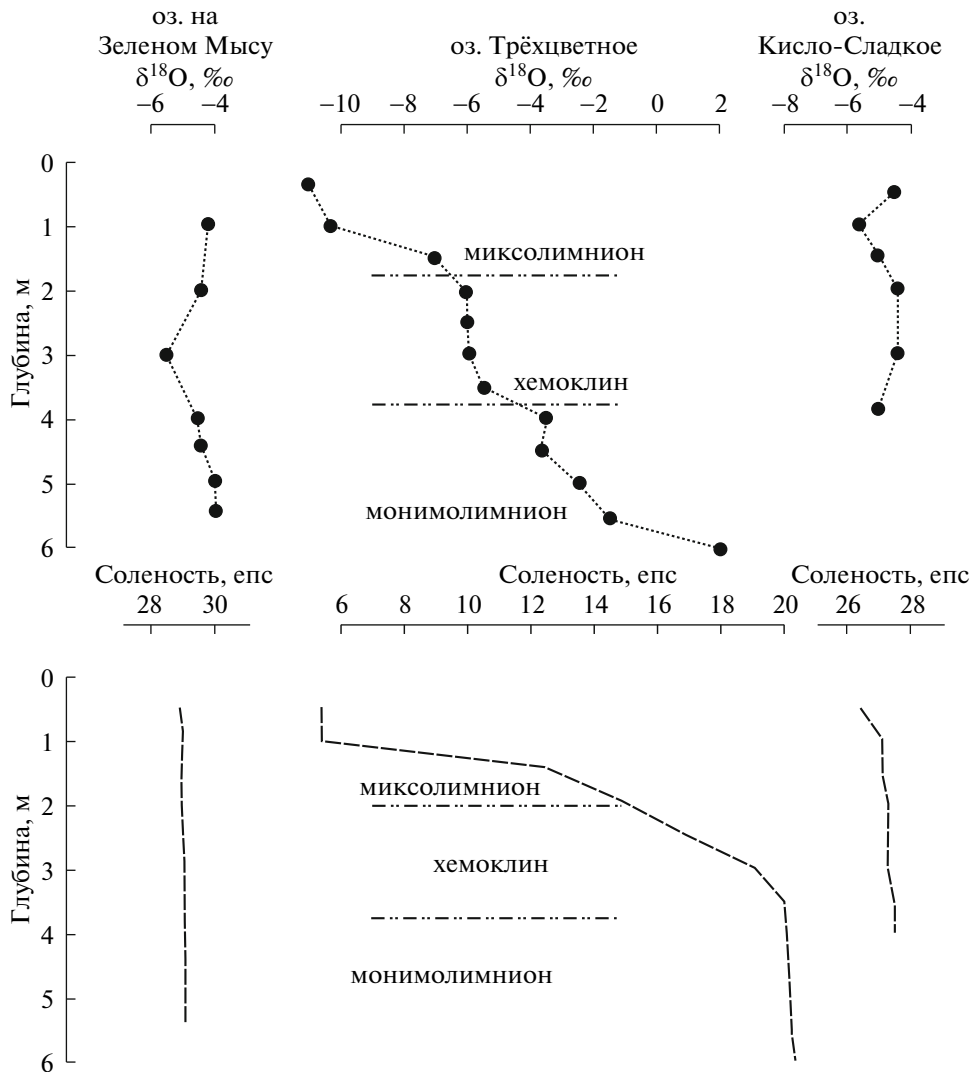


Рис. 2. Распределение вариаций  $\delta^{18}\text{O}$  и солености по глубине в отделяющихся от моря водоемах на полуострове Киндо.

полностью пресным. Таким же считалось и Нижнее Ершовское озеро, последние признаки осолонения вод у дна фиксировались в нем более 15 лет тому назад. Но летом 2011 г. в нем снова обнаружили признаки осолонения, придонный слой в ямах имел соленость 9 епс. В озерах в разной степени проявляются три режима изменчивости характеристик: сезонный, межгодовой и катастрофический. Последний заключается в эпизодическом совпадении высоких приливов и ветровых нагонов, что приводит к вторжению морских вод в отделившийся водоем.

В структурном отношении все соленые озера оказались стратифицированными по температуре и солености, что неожиданно для столь мелководных водоемов в конце зимнего сезона.

В озере Кисло-Сладком на поверхности, где вода обычно опреснена, в марте 2012 г. верхний полу-

метровый слой имел морскую соленость 26.2 епс (рис. 2). Термохалинная структура вод была двухслойной. Верхний конвективный слой, непосредственно связанный с ледообразованием и имеющий температуру, близкую к замерзанию ( $-1.4^\circ\text{C}$ ), оказался необычно тонким, всего 0.5 м, при относительно большой толщине льда — около 50 см. После слоя скачка ниже 2 м располагался квазиоднородный слой с температурой  $-0.6^\circ\text{C}$  и соленостью 27.6 епс. Этот слой — результат адвекции морских вод.

Озеро Трёхцветное по весенне-летним наблюдениям в предшествующие годы имело четкую двухслойную структуру: поверхностный пресный слой толщиной в 2 м и нижний соленый слой, содержащий сероводород. Сезонные колебания температуры распространялись до горизонта 5 м. В марте 2012 г. пресный слой отсутствовал, но

структура сохранила двухслойность. На поверхности располагался слой толщиной 1 м с соленостью около 5 епс и температурой  $-0.3^{\circ}\text{C}$  (табл. 2, рис. 2). Такое осолонение поверхностного слоя могло произойти только за счет адвекции морских вод через порог. Ниже 1 м температура воды оказалась положительной, а в нижних трех метрах (от 3.5 до 6.5 м) — выше  $4^{\circ}\text{C}$ . Глубже 2 м соленость увеличивалась от 17.3 до 21.9 епс. Соленая вода с положительной температурой в конце зимы на глубине всего 1 м от поверхности в Белом море зарегистрирована впервые.

В Нижнем Ершовском озере, которое предшествующим летом было пресным и лишь в донных ямах находилось небольшое количество солоноватой воды (8.9 епс), в марте даже на поверхности вода оказалась осолоненной до 1.1 епс, а с горизонта 1 м имела соленость 16 епс. При этом нижний соленый слой воды имел положительную температуру: в одном из углублений дна, расположенном ближе к морю,  $2.8^{\circ}\text{C}$ , а в другом, дальше от моря,  $3.8^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, феномен соленой воды с положительной температурой на глубине 1 м в конце зимы был зарегистрирован дважды.

Наименьшие изменения от действия адвекции отмечены в озере на Зеленом Мысу, где термохалинная структура вод в марте 2012 г. также оказалась двухслойной. Верхний однородный слой до горизонта 4.5 м имел соленость 28.8 епс и температуру  $-1.4^{\circ}\text{C}$ , что в пределах точности измерения соответствует температуре замерзания воды. Ниже отмечено повышение солености до 29.3 епс и температуры до  $0.2^{\circ}\text{C}$ . В это же время в море соленость поверхностного слоя воды, способного сообщаться с водной массой лагуны через порог, была гораздо ниже — 25.9 епс. Это означает, что столь высокая соленость вод в котловине озера есть эффект осолонения при ледообразовании непосредственно в самом озере.

Верхнее Ершовское озеро, как и летом, оказалось полностью пресным. В отделяющихся водоемах исследованы структура льда и состояние снежного покрова. Толщина снежного покрова на них изменялась от 12 до 35 см, а на льду Ермолинской губы составляла 9 см. В структуре льда озер с соленой водой обнаружены общие черты: поверхностный слой толщиной 15–20 см состоял из чередующихся слоев матового льда и жидкой льдистой массы; ниже лед имел характерную для морского льда структуру: матовый слой, под ним кристаллический прозрачный и нижний слой пористый. В Трёхцветном озере в нижней части керна вместо пористого льда находился слой прозрачного пресного льда толщиной 5 см.

Изотопно-кислородный профиль столба воды в оз. Трёхцветном обнаруживает высокие значения  $\delta^{18}\text{O}$  в придонной части (рис. 2) и позволяет выделить 3 зоны в толще воды: 0–2 м — зона мик-

солимниона, где вода меняется от пресной до солоноватой, а значения  $\delta^{18}\text{O}$  изменяется от  $-10.8$  до  $-6.2\text{‰}$ , 2–3.8 м — хемоклинная зона с переходными свойствами, где значения  $\delta^{18}\text{O}$  изменяются от  $-5.9$  до  $-3.6\text{‰}$ , и 3.8–6.5 м — зона монимолимниона с экстремально соленой водой (соленость в 3 раза выше, чем у поверхности) и наиболее высокими значениями  $\delta^{18}\text{O}$ , составляющими от  $-3.6$  до  $2.1\text{‰}$ , т.е. озеро продолжает быть меромикктическим, как и ряд других озер [7–12].

Изотопно-кислородный профиль толщи воды оз. Кисло-Сладкое обнаруживает достаточно однородные значения  $\delta^{18}\text{O}$  по глубине (табл. 2, рис. 2), максимальный диапазон вариаций  $\delta^{18}\text{O}$  в пределах озера составляет  $1.2\text{‰}$  и регистрируется на переходе от глубины 0.5 м к 1 м, на этой же глубине меняется соленость. Изотопный состав воды ниже 1 м в целом указывает на квазиоднородный слой, что хорошо согласуется с гидрофизическими показателями. Это свидетельствует о том, что в результате поступления аномально большого количества морской воды в зимний период меромикктическая стратификация Кисло-Сладкого озера была нарушена в отличие от меромикктических озер, находящихся вдали от морей [7–12]. Озерный лед характеризуется значениями  $\delta^{18}\text{O}$  от  $-6.9$  до  $-3.9\text{‰}$ . Нарастание озерного льда идет наиболее интенсивно в первый период после замерзания, причем процесс этот происходит одновременно и снизу, и сверху. Таким образом, возможно, нижняя часть льда была сформирована из соленой озерной воды, а в формировании верхней части разреза льда принимали участие атмосферные осадки.

В столбе воды озера на Зеленом Мысу как и в оз. Кисло-Сладком, вариации  $\delta^{18}\text{O}$  незначительны, значения составили от  $-4.01$  до  $-5.8\text{‰}$  (рис. 2) при достаточно однородных величинах солености и температуры воды (табл. 2). В структуре вод этих озер необычно тонкий поверхностный слой (меньше 0.5 м), остальная исследованная толща воды по изотопному и химическому составу однородна (рис. 2). Придонный слой практически не выражен, что, очевидно, связано с активной адвекцией морской воды.

Озерный лед изотопически тяжелый со значениями от  $-4$  до  $-1.4\text{‰}$ , что указывает на намораживание льда из соленой озерной воды без значительного участия атмосферных осадков [14]. Вариации  $\delta^{18}\text{O}$  во льду являются следствием изотопного фракционирования при ледообразовании.

Изотопно-кислородный профиль толщи воды оз. Нижнее Ершовское указывает на существование поверхностной зоны на глубинах от 0 до 1 м. Изотопно-кислородные вариации весьма показательны, значения  $\delta^{18}\text{O}$  изменяются от  $-11.7\text{‰}$  на глубине 0.5 м до  $-6.6\text{‰}$  на глубине 1 м, при этом температура и соленость также резко меняются:

**Таблица 2.** Значения температуры ( $T$ , °C), солёности ( $S$ , епс) и  $\delta^{18}\text{O}$  (‰) в воде и снежно-ледяном покрове водоёмов на полуострове Киндо (Кандалакшский залив Белого моря)

Номер и название станции на рис. 1	Проба	Горизонт	$T$ , °C	$S$ , епс	$\delta^{18}\text{O}$ , ‰	
1. Озеро Кисло-Сладкое	Свежий снег	0–2 см	–	–	–14.47	
	Весь снежный разрез	0–15 см	–	–	–8.19	
		Лед	0–8 см	–	–	–6.91
		»	8–15 см	–	–	–4.83
		»	15–29 см	–	–	–3.91
		»	29–43 см	–	–	–4.22
	Вода	0.5 м	–1.4	26.4	–4.40	
		»	1 м	–1	27.2	–5.66
		»	1.5 м	–0.8	27.2	–5.13
		»	2 м	–0.6	27.3	–4.48
		»	3 м	–0.5	27.3	–4.51
		»	3.5 м	–0.5	27.4	–4.65
		»	3.8 м	–0.5	27.4	–5.15
		»	придон. 5 см	–	–	–4.77
2. Озеро Трёх-цветное	Вода	0.5 м	–0.3	5.2	–10.8	
		»	1 м	0.2	5.2	–10.2
		»	1.5 м	1.6	12.7	–7.1
		»	2 м	2.4	15.2	–6.2
		»	2.5 м	3.2	17.1	–5.9
		»	3 м	3.7	19	–5.8
		»	3.5 м	4	19.9	–5.4
		»	4 м	4.3	20.6	–3.6
		»	4.5 м	4.5	21	–3.8
		»	5 м	4.6	21.3	–2.4
		»	5.5 м	4.7	21.6	–1.4
		»	6 м	4.8	21.9	2.1
3. Озеро на Зеленом Мысу	Снег	0–12 см	–	–	–13.59	
	Лед	0–7 см	–	–	–4.00	
		»	7–19 см	–	–	–3.65
		»	19–34 см	–	–	–2.22
		»	34–38 см	–	–	–1.41
	Вода	1 м	–1.4	28.7	–4.16	
		»	2 м	–1.4	28.7	–4.55
		»	3 м	–1.4	28.8	–5.77
		»	4 м	–1.4	28.8	–4.55
»		4.5 м	–1.4	28.8	–4.30	
»	5 м	–1.4	28.9	–4.01		
»	5.5 м	–0.9	29	–4.13		
6. Озеро Нижнее Ершовское	Снег	0–12 см	–	–	–14.0	
	Лед	0–9 см	–	–	–14.9	
		»	9–20 см	–	–	–13.2
	Вода	0.5 м	–0.4	1	–11.7	
		»	0.75 м	–	–	–8.9
		»	1 м	2.4	16.4	–6.6

Таблица 2. Окончание

Номер и название станции на рис. 1	Проба	Горизонт	$T, ^\circ\text{C}$	$S, \text{ епс}$	$\delta^{18}\text{O}, \text{ ‰}$
7. Озеро Верхнее Ершовское	Снег	0–12 см	–	–	–14.46
	»	13–24 см	–	–	–20.12
	Снежная корка	12–13 см	–	–	–15.50
	Снег	24–35 см	–	–	–21.24
	Лед	0–17 см	–	–	–13.93
	»	17–37 см	–	–	–8.91
	Вода	0.5 м	0.2	0	–11.3
	»	1 м	1.5	0	–12.1
	»	1.5 м	2.3	0	–12.3
	»	2 м	2.9	0	–11.4
8. Ермолинская губа	Снег	0–2 см	–	–	–12.9
	Лед	0–8 см	–	–	–5.2
	»	8–19 см	–	–	–5.4
	»	19–49 см	–	–	–3
	»	49–53 см	–	–	–2.3
	Вода	0.6 м	–	–	–4.1
	»	1.1 м	–	–	–3.4
	»	5 см от дна	–	–	–4.3
10. У причала ББС МГУ	Снег	0–2 см	–	–	–11.8
	»	2–3 см	–	–	–12.7
	»	3–21 см	–	–	–16

температура возрастает от  $-0.4$  до  $2.4^\circ\text{C}$  и соленость от 1 до 16 епс. Лед этого озера имеет изотопно-кислородный состав атмосферной влаги, и снег и лед характеризуются значениями около  $-14\text{‰}$ . В толще пресной воды оз. Верхнее Ершовское изотопно-кислородный состав наиболее легкий по сравнению со всеми исследованными озерами, значения  $\delta^{18}\text{O}$  изменяются от  $-12.3$  до  $-11.3\text{‰}$  вне зависимости от глубины и температуры. Это пресное озеро не испытывает влияния моря и изотопически не стратифицировано.

Озерный лед характеризуется значениями  $\delta^{18}\text{O}$ :  $-13.9$  и  $-8.9\text{‰}$  (табл. 2), что свидетельствует о преимущественном участии атмосферных осадков в его формировании [15]; более высокое значение  $\delta^{18}\text{O}$ , равное  $-8.9\text{‰}$ , является результатом фракционирования, обычно составляющего при льдообразовании около  $3\text{‰}$  [14]. Снег, лежащий на льду, характеризуется значениями  $\delta^{18}\text{O}$  от  $-14.5$  до  $-21.2\text{‰}$ .

Тяжелый изотопно-кислородный состав был отмечен в толще воды Ермолинской губы, где величина  $\delta^{18}\text{O}$  составляла от  $-3.4$  до  $-4.3\text{‰}$  (см. табл. 2); это прямо указывает на то, что вода здесь по всей толще морская. Лед в этой точке характеризуется значениями  $\delta^{18}\text{O}$  от  $-5.4$  до  $-2.3\text{‰}$ , плавно

изотопически утяжеляясь по разрезу (табл. 2). Это, несомненно, указывает на преимущественное участие в сложении ледяного покрова Ермолинской губы морской воды. Относительно более легкий состав в верхнем горизонте льда может быть связан с частичным участием снежных осадков.

Таким образом, показано, что использование данных о  $\delta^{18}\text{O}$  и распределении солености и температуры является эффективным способом изучения источников воды, поступающей в отделяющиеся от моря водоемы. Выявлено, что в результате аномально большого поступления морской воды при ветровом нагоне во время высокого уровня приливов в зимний период 2011–2012 гг. произошло сильное осолонение и нарушение мезомиктической стратификации в водоемах, находящихся вблизи береговой черты на севере Карельского берега Белого моря.

Авторы выражают благодарность директору ББС МГУ А.Б. Цетлину, заведующему ББС МГУ А.В. Савченко, Д.А. Воронову, Н.А. Демиденко, А.С. Саввичеву, В.В. Сивонену, В.Т. Колбыко и коллективу биостанции за поддержку.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 10–05–00986, 11–05–01141, 12–04–00477, 12–04–01621, Министерства образова-

ния и науки РФ, контракт № 02.740.11.0875, федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 годы (№ 348П) и на 2012–2013 годы (лот 2012–1.1–12–000–1008) и Программ фундаментальных исследований Президиума РАН № 9 и 23.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисицын А.П. В кн.: Система Белого моря. Т. I. Природная среда водосбора Белого моря. М.: Науч. мир, 2010. С. 353–445.
2. Колька В.В., Корсакова О.П., Шелехова Т.С. и др. // ДАН. 2012. Т. 442. № 2. С. 263–267.
3. Романенко Ф.А., Шилова О.С. // ДАН. 2012. Т. 442. № 4. С. 544–548.
4. Субетто Д.А., Шевченко В.П., Лудикова А.В. и др. // ДАН. 2012. Т. 446. № 2. С. 183–190.
5. Long A.J., Woodroffe S.A., Roberts D.H., Dawson S. // Quatern. Sci. Revs. 2011. V. 30. P. 3748–3768.
6. Пантюлин А.Н., Краснова Е.Д. В сб.: Материалы XIX Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. М.: Геос, 2011. Т. 3. С. 241–245.
7. Degermendzhy A.G., Belolipetsky V.M., Zotina T.A., Gulati R. // Aquat. Ecol. 2002. V. 36. № 2. P. 271–297.
8. Саввичев А.С., Русанов И.И., Rogozin Д.Ю. и др. // Микробиология. 2005. Т. 74. № 4. С. 552–561.
9. Belolipetskii P.V., Belolipetskii V.M., Genova S.N., Mooij W.M. // Aquat. Ecol. 2010. V. 44. P. 561–570.
10. Дегерменджи А.Г., Rogozin Д.Ю. В кн.: Роль микроорганизмов в функционировании живых систем: фундаментальные проблемы и биоинженерные приложения. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. С. 102–104.
11. Pagé P., Ouellet M., Hillaire-Marcel C., Dickman M. // Limnol. and Oceanogr. 1984. V. 29. № 3. P. 564–573.
12. Jeffries M.O., Krouse H.R., Shakur M.A., Harris S.A. // Canad. J. Earth Sci. 1984. V. 21. P. 1008–1017.
13. Васильчук Ю.К. Изотопные методы в географии. Ч. 2. Геохимия стабильных изотопов пластовых льдов. М.: Изд-во МГУ, 2012. Т. I. 472 с.
14. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К. Изотопные методы в географии. Ч. 1. Геохимия стабильных изотопов природных льдов. М.: Изд-во МГУ, 2011. 228 с.
15. Шапоренко С.И., Корнеева Г.А., Пантюлин А.Н., Перцова Н.М. // Вод. ресурсы. 2005. Т. 32. № 5. С. 517–532.