



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

имени М. В. ЛОМОНОСОВА

ИССЛЕДОВАНИЯ
МОЛОДЫХ ГЕОГРАФОВ

Москва - 2015

УДК 910
ББК 26.8
И88

ISBN № 0-000-00000-X

*Печатается по решению Ученого совета географического
факультета Московского государственного университета
имени М. В. Ломоносова*

Рецензенты:

*Е. И. Голубева, д.б.н., профессор
Ф. А. Романенко, к.г.н., в.н.с.*

И88 Исследования молодых географов: сборник статей участников секции «Экспедиционные исследования» Международной молодежной научной конференции «Ломоносов-2015» / Под ред. Н. Л. Фроловой, М. Д. Горячко. М.: АПР, 2015. — 136 с.

В сборник включены статьи участников двадцати зимних экспедиций НСО географического факультета МГУ 2015 г.

Сборник рассчитан на широкий круг специалистов, работающих в области изучения природных объектов и использования их ресурсов, на аспирантов и студентов, изучающих закономерности изменения природной среды и общества, особенности природопользования и экологической безопасности.

Текст печатается в авторской редакции.

УДК 910
ББК 26.8

ISBN 978-5-904761-46-2

© Географический факультет МГУ, 2015

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ И ДИНАМИКИ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ НА ПРИМЕРЕ ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ БЕЛОГО МОРЯ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

*Базилова В. О., Балабин Ф. А., Белоусова В. Н., Беляев Б. М.,
Василенко А. Н., Гусева С. П., Ефимов В. А., Захарченко Д. И.,
Калмацкая О. А., Косенков А. В., Кораблина А. Д., Корпушенков И. А.,
Кошутин Р. А., Кравчук Г. А., Лаптинский К. А., Мардашова М. В.,
Моисеев А. И., Осипов А. М., Полюхов А. А., Сазонов А. А.,
Телегина А. А., Телегина Е. А., Терский П. Н., Титова А. М.,
Турмачев Н. В., Харламов М. А., Харчева А. В.⁶*

*Кафедры гидрологии суши, метеорологии и климатологии,
океанологии, картографии и геоинформатики
географического факультета МГУ*

Кафедра общей физики физического факультета МГУ

*Беломорская биологическая станция имени Н.А.Перцова
биологического факультета МГУ*

В настоящее время большая часть береговой линии Белого моря интенсивно поднимается, а отделяющиеся от него водоемы обладают множеством удивительных и уникальных особенностей, которые касаются гидрологического режима, гидрохимических и гидробиологических характеристик [1, 2]. В период с 26 января по 6 февраля 2015 г. в рамках НСО географического факультета проведена экспедиция кафедры гидрологии суши, которая базировалась на Беломорской Биологической станции имени Н.А. Перцова (ББС) биологического факультета МГУ. В полевых исследованиях принимали участие студенты кафедр метеорологии и климатологии, океанологии, картографии и геоинформатики, а также студенты и сотрудники физического и биологического факультетов МГУ.

Цель экспедиции — получение данных натурных наблюдений зимнего режима водных объектов побережья Белого моря в окрестности ББС, включая морские заливы и озера на разной стадии отделения от

⁶ Руководители экспедиции – П. Н. Терский, Н. Л. Фролова; соруководители – А. А. Попрядухин, Т. Е. Самсонов, В. М. Степаненко, Е. Д. Краснова, Н. А. Демиденко

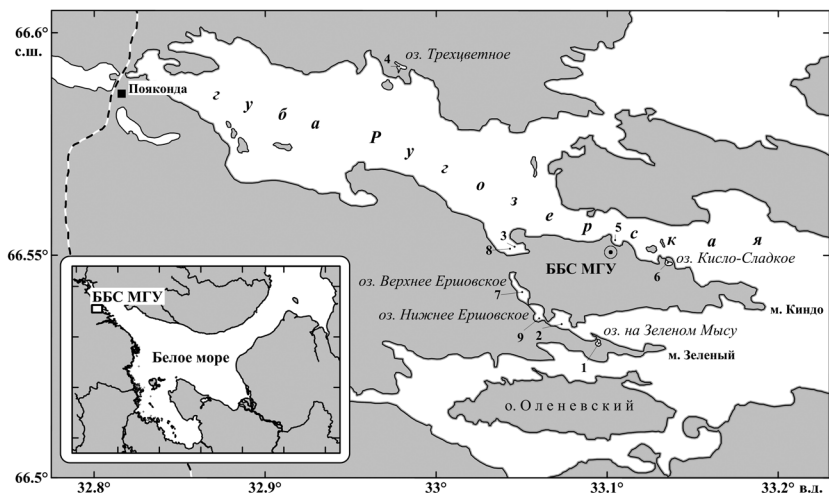


Рисунок 1 — Местоположение обследованных озер

моря, и особенностей динамики приземного слоя атмосферы в районе этих водных объектов. Их необычный химический состав, разнообразная гидрологическая структура, особые микроклиматические условия, влияние Белого моря на их режим потребовало проведения самых разнообразных исследований. В рамках экспедиции проводились гидрологические съемки, гидрохимические исследования, синоптические наблюдения, изучение обмена парниковыми газами между озерами и атмосферой, анализ биоразнообразия бентосных организмов, микробиологические исследования, определение высотных отметок озер, а также анализ термохалинной структуры моря и изучение снежного покрова на полуострове Киндо (рис. 1). Все работы сопровождалась спутниковой привязкой, а результаты были обеспечены картографической основой и геоинформационным наполнением.

Метеорологические исследования в 2015 г. проходили по двум направлениям — оба связаны с проблемой обмена парниковыми газами между водными экосистемами и атмосферой: измерение турбулентного режима приземного слоя воздуха над небольшим окруженным лесом озером и измерения содержания метана и углекислого газа в водоемах различных типов.

По данным вихреразрешающего моделирования [3] турбулентные потоки импульса и скалярных величин над небольшими озерами, окруженными лесом, существенно неоднородны как по горизонтали, так и по вертикали, что ставит под сомнение репрезентативность измерений потоков в одной точке, производство которых является распространенной практикой. Таким образом, задача настоящего исследования заключается в измерении неоднородности турбулентных потоков и других статистик турбулентности над подобным природным объектом. На оз. Верхнее были проведены наблюдения за турбулентным режимом приземного слоя воздуха в 6 точках: Radiculitis – автоматическая метеорологическая станция Davis Instruments вблизи точки «Радикулит», North и South – трехкомпонентные анемометры Gill на уровне 2 м, Center1 трехкомпонентные анемометры Gill на уровнях 2 м и 4 м, East, West и Center2 — двухкомпонентные анемометры Gill на уровне 2 м (рис. 2) с помощью ультразвуковых анемометров. На рис. 2 представлены спектры кинетической энергии горизонтальных компонент скорости для всех шести точек измерений на оз. Верхнее, за 0–6 ч 1 февраля 2015 г.

Каждый спектр получен осреднением шести спектров, вычисленных за часовые периоды времени (0–1 ч, 1–2 ч и т. д.). Во-первых, видно, что уровни энергии на всех спектрах близки, а их наклон соответствует закону Колмогорова для частот, превышающих $\sim 10^{-1} \text{ с}^{-1}$, что соответствует периодам менее ~ 1 мин. При этом, уровни энергии для двухкомпонентных датчиков Gill, частота измерений которых 1 Гц (см. светлую ломаную кривую на рис. 2), совпадают с энергией для трехкомпонентных датчиков (частота измерений 20 Гц) в соответствующих интервалах частот — см. темную ломаную на рис. 2. Таким образом, спектры мощности не позволяют судить о значительных различиях в режиме турбулентности в пределах озера. В дальнейшем будут изучены различия в потоках и других вторых моментах скорости и температуры.

К настоящему времени накоплено большое количество эмпирических данных о том, что водоемы являются глобально значимым источником парниковых газов (например, [4]). В то же время, в российской части Фенноскандии систематических эмпирических исследований содержания метана и углекислого газа до сих пор, насколько известно авторам, не проводилось. В рамках настоящей экспедиции отобрано

34 пробы на различных горизонтах для анализа концентрации парниковых газов из озер и 1 проба из пролива Большая Салма. Затем в лаборатории с помощью системы из двух шприцев и крана-тройника были получены смеси азота с газами, находящимися в равновесии с пробами воды из озер. После экспедиции образцы этих смесей были

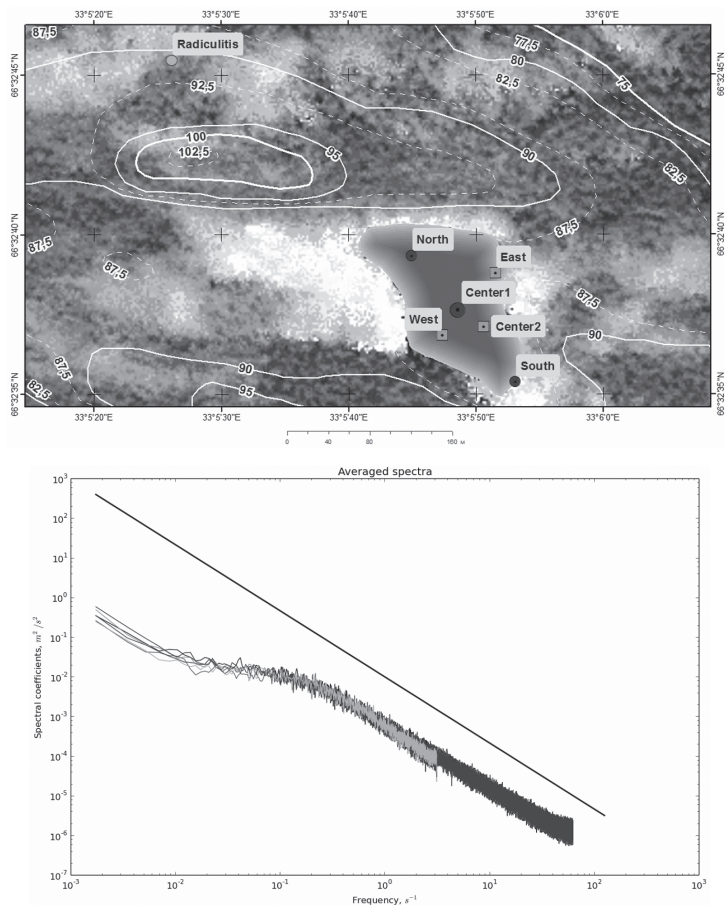


Рисунок 2 – Расположение точек измерений в окрестности озера Верхнее (наверху), спектры кинетической энергии горизонтальных компонент скорости (внизу). Черной прямой показан «закон минус пять третей» Колмогорова

отвезены в Университет Хельсинки на анализ содержания метана и углекислого газа.

Помимо упомянутых работ, производились также измерения основных метеорологических величин автоматическими метеорологическими станциями — на пирсе ББС МГУ и вблизи точки «Радикулит». На пирсе ББС были также установлены температурный профилемер МТР-5 и высокочастотный анализатор метана Licor-7700.

Океанологические исследования были посвящены определению влияния приливных процессов на термохалинную структуру вод Белого моря, описанию термической структуры оз. Верхнее, а также определению содержания углеводов, хлорофилла, микроэлементов в подледной воде, горизонтах льда, снеге. Приливные колебания в акватории ББС носят правильный полусуточный характер. В течение суток наблюдаются две малые и две полные воды. Амплитуда полусуточных волн примерно на порядок больше амплитуды суточных. В районе пирса ББС МГУ с 13:00 30 января до 19:00 31 января измерения распределения по глубине солёности и температуры показали достаточно однородную термохалинную структуру морских вод. Температура изменялась от $-1,11^{\circ}\text{C}$ до $-1,28^{\circ}\text{C}$, солёность — от 26,8 до 25,2 епс (единицы практической солёности).

В этой же точке (в районе пирса ББС) поставлена «термокоса» с 12:30 30 января по 10:00 4 февраля, которая состоит из датчиков температуры, установленных условно на глубине 0,5 м (1-й датчик), 1,5 м (2-й) и 2,5 м (3-й), а также датчика давления, установленного на 2-ом датчике температуры. Известно, что во время измерений наблюдалась сизигия — что подтверждает тенденция приливного уровня к увеличению на 40 см. Величина прилива по полученным данным составила 0,7–0,8 м. При прочих равных погодных условиях во время прилива температура воды понижается. В момент полной воды температура воды немного возрастает, после чего начинает снова понижаться. Во время отлива температура воды повышается. Это связано с приходом во время прилива более холодной воды с открытой части Белого моря. Во время отлива течения приносят более теплую воду из вершины Ругозерской губы. При этом минимумы температуры наблюдались в самом начале отливной фазы. Возможно, это связано с небольшим охлаждением воды в моменты полной воды, когда вода проникала в при-

Таблица 1 – Гидрологические характеристики озер полуострова Киндо

Озеро	$h_{\text{макс}},$ м	$t_{\text{мин}},$ °C	$t_{\text{макс}},$ °C	$\alpha_{\text{мин}},$ мкСм/см (S, епс)	$\alpha_{\text{макс}},$ мкСм/см (S, епс)
Кисло-Сладкое	4,0	-0,8	4,5	19300 (12,6)	35345 (25,2)
Верхнее Ершовское	4,8	0,0	5,4	92,2	243,9
Верхнее	2,75	0,0	5,2	17,4	65,5
Водопроводное	2,9	0,0	4,5	23,5	80,5
Трехцветное	7,75	-0,1	7	431	35176 (21,6)
Нижне-Ершовское	2,9	0,0	6,1	14,5	4360
Лагуна на Зеленом мысу	5,8	-1,6	2,4	39947 (23,7)	46003 (28,4)

ливные трещины. При начале отлива уже более холодная вода снова погружалась под ледовую корку и происходило понижение температуры подледной воды.

Гидролого-гидрохимические исследования. Для определения вертикальной структуры водоемов на разных стадиях отделения от моря в зимний период 2015 г. проведены гидролого-гидрохимические синхронные съемки (изучение распределения по глубине температуры и электропроводности воды) на озерах полуострова Киндо: Кисло-Сладкое (6), Верхнее Ершовское (7), Нижнее Ершовское (9), Верхнее, Водопроводное, Трехцветное (4) и в лагуне на Зеленом мысу (1) (рис. 1).

Водная толща озер различается по вертикальному распределению температуры (t) и минерализации (электропроводности α или солёности S) (табл. 1).

Для всех озер характерно в целом увеличение температуры с глубиной, а также увеличение электропроводности. В большей части озер в зимний период наблюдаются аномально высокие температуры воды, не характерные для устойчивой обратной температурной стратификации. Озера полуострова Киндо по классификации О. А. Алекина относятся к классам пресных, солоноватых и соленых. В химическом составе пресных озер преобладают гидрокарбонаты, поэтому для них возможен расчет вертикальной устойчивости на основе методов определения плотности [5] и [6].

В пресных озерах — Верхнем Ершовском, Водопроводном и Верхнем, температура достигает соответственно 5,2, 4,5 и 5,2°C в придонных слоях (рис. 3).

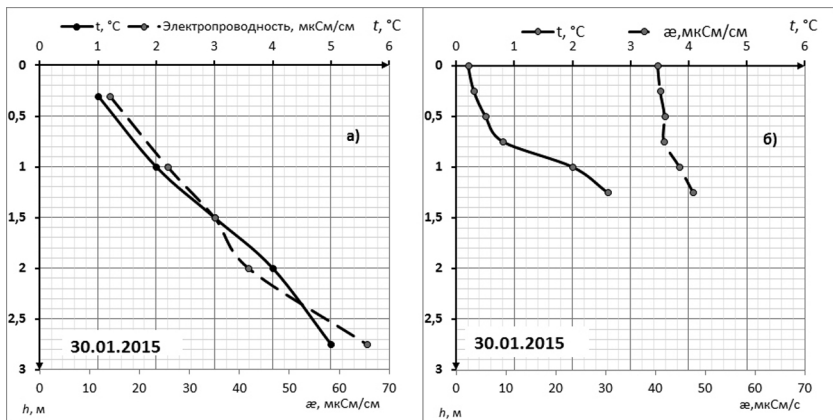


Рисунок 3 – Распределения температуры и электропроводности воды по глубине для оз.Верхнее (а) и оз. Водопроводное (б)

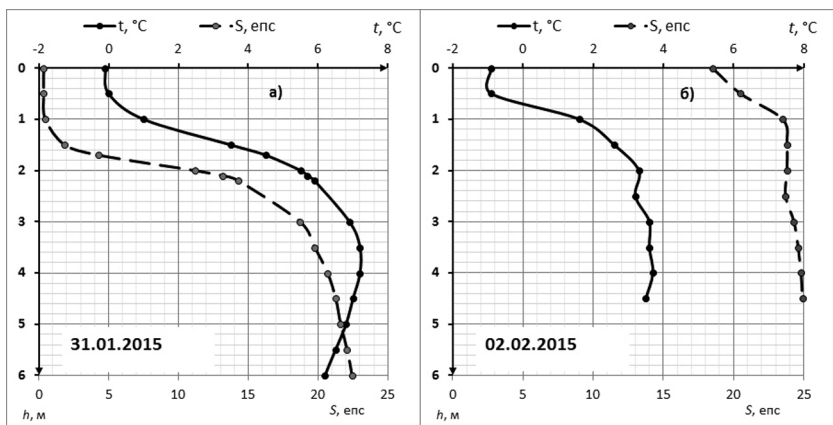


Рисунок 4 – Распределение температуры и солености воды в оз.Трехцветном (а) и оз.Кисло-Сладком (б)

Для этих озер (а также для солоноватого Нижнего Ершовского) была рассчитана плотность и проанализирована вертикальная устойчивость водных масс.

Для плотностного расслоения пресных водоемов характерно устойчивое равновесие в плотностной стратификации. Температура

в придонных слоях выше $+4^{\circ}\text{C}$, а увеличение плотности водных масс достигается за счет повышенной минерализации в придонных слоях.

В наиболее стратифицированных солоноватых озерах температура придонных слоев достигает $6,1^{\circ}\text{C}$ и $7,1^{\circ}\text{C}$ в Нижнем Ершовском и Трехцветном соответственно. Максимальная температура воды оз. Кисло-Сладкое достигала $4,5^{\circ}\text{C}$. Оз. Трехцветное обладает наиболее значительными различиями в распределении солёности с глубиной и нехарактерными чертами температурной стратификации. Так, максимальная температура в $7,1^{\circ}\text{C}$ измерена на глубине 3 м непосредственно ниже слоя скачка солёности воды (рис. 4). Ниже температура понижается до 5°C . Нижнее Ершовское в 2015 г. было пресным почти во всей толще, за исключением полуметрового придонного солоноватого слоя. В отличие от распределения по глубине температуры и солёности в Кисло-Сладком и Трехцветном, в Нижнем Ершовском озере на фоне относительно равномерного роста температуры с глубиной практически вся толща пресная, а в придонном слое минерализация возрастает практически на порядок.

Соленое озеро – лагуна на Зеленом мысу отличается незначительной температурной стратификацией. Температура возрастает от $-1,6^{\circ}\text{C}$ на поверхности до $2,4^{\circ}\text{C}$ у дна на глубине 5,8 м. Аномалия данного озера состоит в том, что при морском составе его солёность возрастает от 23,7‰ на поверхности до 28,4‰ на дне, достигая на глубине 3,5 м фоновой морской солёности в 26,5‰.

Пресноводные водоёмы, давно утратившие связь с морем, имеют смешанное питание атмосферными, поверхностными и грунтовыми водами. Для озёр данной группы характерна минерализация воды менее 150 мг/л, слабокислая или нейтральная реакция среды, гидрокарбонатно-кальциевый состав с большой долей хлоридов и натрия, что обусловлено участием атмосферных осадков морского происхождения в формировании водной массы озёр.

Водосборы озёр, расположенных на водоразделе, заболочены, что обуславливает высокую цветность их вод ($60-90^{\circ}$) и повышенные концентрации биогенных элементов. Особенность химического состава воды пресноводных озёр в зимний период — довольно высокое содержание общего фосфора при почти полном отсутствии его минеральной формы во всей водной толще. В придонных слоях озёр

возрастает минерализация воды, концентрации фосфора, кремния и железа, что подтверждает участие в их питании грунтовых вод. Однако, если в озерах водораздела у дна отмечено максимальное содержание растворенного железа (до 5 мг/л в оз. Водопроводное), то в воде оз. Верхнее Ершовское особенно резко (до 1 мг/л) у дна возрастало содержание минерального фосфора, что позволяет предположить различия в соотношении генетических категорий вод, питающих озеро.

Озера, отнесенные ко второй группе (оз. Кисло-Сладкое и лагуна у Зеленого мыса), характеризуются частым поступлением в них морских вод, вследствие чего вся водная толща имеет солёность 26–27 епс, возрастающую с глубиной. Химический состав воды озёр аналогичен составу беломорских вод. В зимний период 2015 г. солёность воды озёр немного превышала значения, наблюдавшиеся в 2014 г., однако, вертикальное распределение солёности и компонентов солевого состава было идентичным. Органические и биогенные вещества присутствуют в водах озёр в меньших количествах, нежели в пресноводных водоемах, однако, резкое увеличение концентрации минерального фосфора и кремния наблюдается в придонном слое, где происходит накопление органики и ее минерализация.

Озеро Трехцветное – яркий пример меромиктического озера. «Трехслойная» структура и наличие устойчивого хемоклина были характерны для Трехцветного озера зимой 2014 и 2015 гг. Сероводородный слой повышенной солёности, образовавшийся ниже 2 м в результате интрузии морской воды, характеризуется высокими концентрациями минерального фосфора, достигающего в придонных горизонтах 6 мг/л и составляющего 100% его валового содержания. Очевидна роль донных отложений в процессе накопления $P_{\text{мин}}$.

Озеро Нижнее Ершовское в 2014 г. имело черты меромиксии. Зимой 2015 г. величина электропроводности в придонном слое достигла лишь 1500 мкСм/см (в 2014 г. – 4500 мкСм/см). При этом, как в 2014, так и в 2015 гг. в слое от 2 м до дна (2,75 м) существовала аноксия, отмечено резкое увеличение концентрации $P_{\text{мин}}$ почти до 3 мг/л. На горизонте 2 м наблюдалось увеличение рН до 7,18, ниже вновь происходило уменьшение рН (диапазон вертикальных изменений данного показателя 6,76–6,9).

Таким образом, в ходе зимних гидрохимических исследований 2015 г. были получены результаты, которые подтвердили выделение 3 групп озер, сделанное на основе данных 2014 г., и позволили сделать следующие выводы:

1. Общей чертой всех исследованных озёр в зимний период является низкое содержание в воде растворённого кислорода и его полное отсутствие в гипolimнионе. Зимой 2015 г. зона аноксии была больше, чем в 2014 г.

2. Особенность химического состава воды пресноводных озер в зимний период — довольно высокое содержание общего фосфора при почти полном отсутствии его минеральной формы во всей водной толще.

3. Увеличение содержания минерального фосфора, кремния и температуры (выше 4°C) в придонных слоях всех озер обусловлено поступлением грунтовых вод. На резкий рост концентрации минерального фосфора может влиять его поступление из донных отложений. Теплоемкость донных отложений больше, чем теплоемкость воды, а теплообмен меньше, поэтому зимой илы вероятно могут влиять на температуру тонкого слоя на границе вода-донные отложения.

4. Химический состав воды разных слоев воды озер свидетельствует о соотношении генетических категорий вод, питающих озера.

5. Пресноводные водоемы характеризуются гидрокарбонатно-кальциевым составом с большой долей хлоридов и натрия.

6. Минерализация озерного льда обследованных озер различалась в соответствии с изменениями в минерализации воды озер. Формирование льда на поверхности водоема происходит одновременно за счет озерной воды и выпадающих осадков, поэтому разные слои льда различаются как по минерализации, так и по соотношению концентраций ионов. Для химического состава льда большинства озер характерно преобладание ионов натрия и хлора. Для озер с высокой минерализацией это закономерно, но даже для льда пресных озер не наблюдается обычного для их вод преобладания гидрокарбонатов и ионов кальция, что, связано с поступлением морских аэрозолей. Повышенное содержание магния среди катионов — особенность солевого состава снега и льда пресных озер.

Гидробиологические исследования. В Кисло-Сладком озере — одном из модельных и наиболее изученных объектов, проводится

мониторинг гидрологических, гидрохимических, микробиологических характеристик, изучение бактериальных и фитопланктонных сообществ [7]. Исследование бентосных сообществ в этом водоеме началось в 2010 г., первая количественная съемка проведена летом 2014 г. [8].

В зимний период гидрологическая и гидрохимическая структура озера сильно отличаются от летних, что сказывается на составе и распределении планктонных организмов.

В озере собрали количественные пробы на 18 станциях с трех трансект, расположенных аналогично летней съемке с помощью дно-черпателя Экмана-Берджи площадью 210,25 см². Трансекты заложены тремя радиусами, исходящими из центральной глубокой части, таким образом, чтобы охватить разные биотопы. Пробы отбирали через проруби с глубин 0,75 м, 1,25 м, 1,75 м, 3 м, 3,75 м и 4 м. Грунт промывали на сите с ячейей 1 мм и транспортировали в лабораторию, где проводилась первичная разборка.

Грунт в пробах был представлен коричневым и темным илом, детритом и растительными остатками. На всех глубинах в больших количествах встречались раковины *Hydrobia ulvae*, в средних горизонтах были многочисленны трубочки полихет *Pectinaria koreni*; также присутствовали экзувии куколок *Ephydriidae*, надкрылья жуков *Haliphus apicalis*, позвонки рыб (*Gasterosteus aculeatus*).

В пробах обнаружено 7 видов макробентосных организмов: 4 вида *Diptera* (*Chironomidae*) и по 1 виду *Coleoptera*, *Gastropoda* и *Amphipoda*. Средняя численность донных организмов составила 550 экз./м², что в 5 раз меньше, нежели в августе 2014.

Если летом биомасса бентоса в озере Кисло-Сладком варьировала от 0,6 до 200 г/м², что сопоставимо с летней биомассой в море — 9–279 г/м² [9], то зимой средняя биомасса в озере снизилась вчетверо: 12 г/м² против 45 г/м² летом при разбросе от 0,9 до 54 г/м².

По результатам зимней съемки на глубинах более двух метров живых животных обнаружено не было. Летом большая часть бентоса сосредоточена на глубине до 1,5 м, на глубине 2 м отмечалось резкое снижение численности и биомассы, однако в небольшом количестве бентосные организмы встречались до наибольшей глубины. Зимой 2015 г. в озере Кисло-Сладком наблюдался замор: в связи с ледовой

изоляция озера от моря [10] граница распространения сероводорода поднялась почти до поверхности, не оставив кислородного слоя для его обитателей.

Наблюдаемое снижение численности и биомассы бентоса по всему водоему, по всей видимости, результат замора. Наименее подверглась изменению зона илистого мелководья. Здесь встречены разнообразные личинки насекомых, в том числе единично личинка жука *Halipplus apicalis*. Возможно, с зимними заморными явлениями связаны наблю-

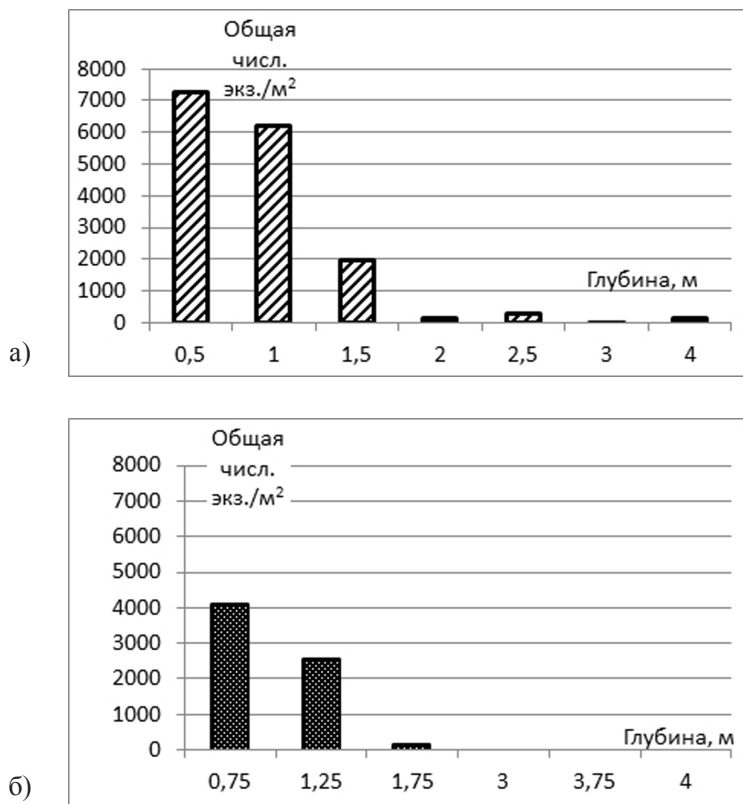


Рисунок 5 — Распределение численности бентосных организмов по глубинам в озере Кисло-Сладком летом (а) и зимой (б)

дававшееся в предыдущие годы резкие колебания численности гидробий и периодическое появление залежей их пустых раковин.

Наибольший вклад в общую численность и биомассу зимой вносил *Chironomus salinarius* — от 22 до 100% биомассы. Летом этот вид был вторым по вкладу в биомассу и доминировал лишь в центральной яме на 4 м.

Таким образом, как летом, так и зимой основу бентоса в озере составляют два вида: *Ch. salinarius* и *H. ulvae*, численность которых и соотношение изменяются во времени. Вероятно, сообщество донных организмов претерпевает циклические изменения, связанные с колебаниями гидрологического режима водоема.

Физико-химические и спектрально-оптические исследования.

Цель данной работы — измерение относительного количества зеленых серных бактерий (ЗСБ) в разных водоемах на разной глубине, а также разделение вкладов зеленоокрашенных и коричневоокрашенных ЗСБ с помощью комплекса спектрально-оптических методов.

Пробы отбирались с различных горизонтов при помощи погружаемого насоса. Измерялись физико-химические и спектрально-оптические характеристики наиболее окрашенных слоев. Спектры оптической плотности свежееотобранных образцов измерялись относительно дистиллята в лабораторных условиях на спектрофотометре Hitachi в спектральном диапазоне 200–1000 нм (измерения проведены Жильцовой А. А.). В лабораторных условиях были измерены спектры оптической плотности и спектры флуоресценции при помощи спектрофотометра Unico и флуориметра Solar CM2203 в стандартных кварцевых кюветках с длиной оптического пути 10 мм.

Для количественного определения пигментов из образцов воды были приготовлены ацетон-метанольные экстракты. В пробирку объемом 15 мл наливали воду с наиболее интенсивной окраской. Затем проводили центрифугирование в течение 5 мин со скоростью 3000 об/мин. После этого удаляли надосадочную жидкость (13 мл) и добавляли 8 мл раствора ацетона и метанола в соотношении 7:2.

Спектры оптической плотности образцов воды измерялись в спектральном диапазоне 200–1000 нм, в них присутствовали максимумы, характерные для бактериохлорофиллов (БХл) *d* и *e*, а также каротиноидов, содержащихся в клетках зеленых серных бактерий (рис. 6).

Зеленоокрашенные зеленые серные бактерии в своем пигментном составе имеют БХл *d* и каротиноид хлоробактин, для них характерны максимумы поглощения в диапазоне 420–470 нм в коротковолновой области спектра и на длине волны 725 нм; коричневоокрашенные зеленые серные бактерии содержат БХл *e* и каротиноид изорениератин, для них характерны максимумы в диапазоне 450–550 нм в коротковолновой области и также на длине волны 725 нм. По величине длинноволнового максимума было найдено, что максимальная концентрация зеленых серных бактерий была в озере Трехцветном, в Нижнем Ершовском их было в 20 раз меньше, в Кисло-Сладком – в 50 раз, и в лагуне на Зеленом мысу – в 40 раз.

По спектрам поглощения ацетон-метанольного экстракта образца воды из озера Трехцветного (2,0 м) была рассчитана концентрация БХл (*d* + *e*). Рассчитать значения концентраций в остальных озерах данным методом не удалось (из-за низких значений оптической плотности), они вычислялись из известных соотношений содержаний микроорганизмов в слоях воды.

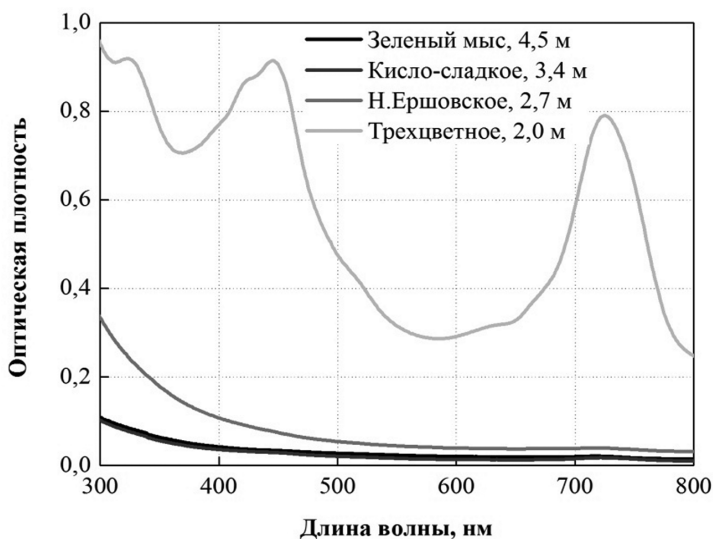


Рисунок 6 – Спектры поглощения образцов воды из отделяющихся водоемов, содержащих зеленые серные бактерии.

Для спектров испускания флуоресценции зеленых серных бактерий при возбуждении светом длиной волны $\lambda_{\text{ex}} = 440$ нм характерен максимум в районе 740–770 нм. Для чистых культур зеленоокрашенных зеленых серных бактерий он расположен в более длинноволновой области по сравнению с коричневоокрашенными культурами. По положению данного максимума было оценено относительное содержание разных типов зеленых серных бактерий в слое с максимальной интенсивностью окраски: в озере Трехцветном на глубине 2 м присутствовали только зеленоокрашенные ЗСБ – $(98,0 \pm 2,0) \%$, в озерах Н. Ершовском на глубине 2,7 м и Кисло-Сладком на глубине 3,4 м было обнаружено большее количество зеленоокрашенных ЗСБ – $(70,1 \pm 2,5) \%$ и $(60,1 \pm 3,0) \%$ соответственно, в лагуне на Зеленом мысу на глубине 4,5 м преобладали коричневоокрашенные ЗСБ – $(53,3 \pm 3,3) \%$. По сравнению с измерениями, проведенными в августе-сентябре 2014, относительное содержание зеленоокрашенных зеленых серных бактерий в озере Кисло-Сладком и лагуне на Зеленом мысу увеличилось на 10 %, в озере Нижнем Ершовском – уменьшилось на 30%. На основании всех полученных данных были вычислены концентрации БХл d и e в отделяющихся водоемах на глубинах с наиболее интенсивной окраской воды (табл. 2).

Выводы. Описанные водоемы находятся на разных стадиях развития изоляции водоемов морского происхождения – от лагуны с приливно-отливными колебаниями (лагуна на Зеленом мысу) до стабильных меромиктических водоемов (оз. Трехцветное, оз. Еловое, оз. Нижнее Ершовское) и пресных (Водопроводное, Верхнее, Верхнее Ершовское). Главная черта, объединяющая описанные водоемы – устойчивая вертикальная стратификация, в предельном варианте стремящаяся к меромиксии. В связи с этим представляется, что стадия меромиктического водоема – закономерный этап гидрологической эволюции морского залива при его отделении от моря. По степени изоляции от моря, которая проявляется в ослаблении влияния моря и устойчивости стратификации к внешним возмущениям, исследованные водные объекты можно расположить в следующий ряд: Оз. Трехцветное, оз. Нижнее Ершовское, оз. Кисло-Сладкое, Лагуна на Зеленом мысу.

В зависимости от площади водосборного бассейна и наличия в нем источников пресной воды водоем может развиваться в сторону

Таблица 2 – Концентрация бактериохлорофиллов зеленоокрашенных (БХл *d*) и коричневоокрашенных (БХл *e*) зеленых серных бактерий в отделяющихся водоемах на глубинах с наиболее интенсивной окраской воды

Озеро	Глубина слоя с наиболее интенсивной окраской, м	Концентрация БХл <i>d</i> , мг/м ³	Концентрация БХл <i>e</i> , мг/м ³
Лагуна на Зеленом мысу	4,5	18 ± 1	20 ± 1
Кисло-Сладкое	3,4	19 ± 1	13 ± 1
Нижнее Ершовское	2,7	51 ± 2	21 ± 2
Трехцветное	2,0	1427 ± 27	29 ± 1

опреснения (большинство водоемов) и в сторону осолонения (лагуна на Зеленом мысу. Приток соленой воды стимулирует процесс бактериальной сульфатредукции, в результате которого в толще воды появляется сероводород и, как следствие, перерабатывающие его фототрофные микроорганизмы, в том числе – зеленые серобактерии.

Типовая гидрологическая структура отделяющегося от моря водоема в терминах, применяемых к меромиктическим водоемам, состоит из миксолимниона – верхнего, как правило, опресненного слоя, и соленого монимолимниона, подразделяемого на два слоя: верхний фотический аэробный и заполняющий донные углубления афотический анаэробный. Между этими основными слоями расположены узкие зоны с резкими градиентами физико-химических параметров: пикноклин на границе опресненного и среднего соленого слоев и редокс-зона между аэробной и анаэробной зонами.

В зимний период гидрологическая и гидрохимическая структура озера сильно отличаются от летних, что сказывается на составе и распределении планктонных организмов и не может не влиять на бентосное сообщество. В настоящей работе описывается первая зимняя съемка макрозообентоса в Кисло-Сладком озере и приводится сравнение с летней ситуацией в водоеме.

Литература

1. Шапоренко С.И., Корнеева Г.А., Пантюлин А.Н., Перцова Н.М. Особенности экосистем отшнуровывающихся водоемов Кандалакшского залива Белого моря // Водные ресурсы, 2005. — N 32(5). — С. 517–532.

2. Шапоренко С.И. Кисло-сладкие озера у Полярного круга // Природа, 2004. — N 11. — С. 23–30.
3. Глазунов А.В., Степаненко В.М. Вихреразрешающее моделирование стратифицированных турбулентных течений над неоднородными природными ландшафтами. Известия РАН – Серия Физика атмосферы и океана, 51(4):(в печати), 2015.
4. David Bastviken, Lars J. Tranvik, John A. Downing, Patrick M. Crill, and Alex Enrich-Prast. Freshwater Methane Emissions Offset the Continental Carbon Sink. 7 January 2011: 331 (6013), 50.
[DOI:10.1126/science.1196808].
5. Chen C.T. and Millero F.J. 1986. Precise thermodynamic properties for natural waters covering only the limnological range // Limnology and Oceanography. v. 31 pp. 657–662.
6. Эдельштейн К. К. Гидрология озер и водохранилищ. Учебник для вузов. – М.: Перо, 2014. – 399 с.
7. Лаптинский К.А., Калмацкая О.А., Медвецкая И.Ю., Краснова Е.Д. Microscopic studies of water horizons of five lakes of the white sea. // Материалы III Международной молодежной научно-практической конференции «Морские исследования и образование» (Москва, 22-24 октября 2014 г.), р. 186–188. Москва, 2014.
8. Мальшко Е.В., Несмеянова Е.С., Ильченко С.А., Мардашова М. В., Краснова Е. Д., Меньшенина Л. Л.. Количественное распределение бентоса Кисло-Сладкого озера. // Материалы III Международной молодежной научно-практической конференции «Морские исследования и образование» (Москва, 22–24 октября 2014 г.), 231–240. Москва, 2014.
9. Чикина М.В., Спиридонов В.А., Мардашова М.В. Изучение пространственной и временной изменчивости прибрежных донных сообществ Керетского архипелага и пролива Великая Салма (Кандалакшский залив, Белое море). // Океанология, 2014. 54(1):60–72.
10. Краснова Е.Д., Демиденко Н.А., Пантюлин А.Н., Фролова Н.Л., Ефимова Л.Е., Широкова В.А., 2014. Термический и ледовый режимы реликтовых водоемов, отделяющихся от Белого моря // Труды VIII международной конференции «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей», Москва, Российский университет дружбы народов, 24–27 ноября 2014 г. Т. 1. С 430–443.