

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556

ОСОБЕННОСТИ ЭКОСИСТЕМ ОТШНУРОВЫВАЮЩИХСЯ ВОДОЕМОВ КАНДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА БЕЛОГО МОРЯ

© 2005 г. С. И. Шапоренко*, Г. А. Корнеева**, А. Н. Пантюлин***, Н. М. Перцова***

*Институт географии Российской академии наук
119017 Москва, Старомонетный пер., 29

**Институт океанологии Российской академии наук
117851 Москва, Нахимовский просп., 36

***Московский государственный университет
119992 Москва, Ленинские горы

Поступила в редакцию 02.03.2004 г.

Исследованы прибрежные водоемы, отделяющиеся от акватории Белого моря в результате поднятия Кандалакшского побережья. Гидрологические и гидрохимические параметры в них значительно отличаются от таковых сообщаемых с ними акваторий губ и проливов. Отмечены экстремальные значения температуры и солености воды, высокое (>20 мг/л) содержание кислорода в подповерхностных и сероводорода (>90 мг/л) в придонных водах. Обеднен видовой состав фито- и зоопланктона. Показатели ферментативной деструкции биополимеров в подповерхностных водах озер на порядок превышают таковые для открытых акваторий Белого моря.

Большая часть береговой зоны Белого моря в настоящее время интенсивно поднимается. Это служит причиной отделения от его акватории многочисленных губ, небольших заливов и прибрежных проливов и образования небольших озер, постепенно теряющих связь с морем. Геоморфологические и гидрологические особенности озер формируют специфические гидрохимические и гидробиологические условия, отдельные черты которых прослежены в других водоемах аналогичного генезиса [8, 11, 12, 16]. Изолированность и резкая плотностная стратификация вод в озерах усиливают их своеобразие до сверхконтрастности, когда в слое всего лишь 1 м происходит смена пересыщенных O_2 вод на воды с восстановительными условиями (с высоким содержанием H_2S). Малая изученность этих водоемов вызвана рядом причин. Океанологи не исследовали их из-за небольших размеров и изолированности от моря. Эти озера с большой натяжкой можно отнести и к объектам озераведения, так как в структуре их водного баланса доминируют морские воды. Рыбохозяйственного значения они, пожалуй, не имеют. Однако отшнуровывающиеся озера вызывают значительный интерес в плане изучения общих закономерностей формирования анаэробных условий в гидросфере [14], взаимодействия и сменяемости пресноводной и морской фаун, разнообразия происходящих в воде и осадках биогеохимических процессов. Актуальность таких исследований обусловлена возможностью массового возникновения подобных водоемов в будущем при падении уровня Мирового океана

(например, при гипотетическом глобальном похолодании).

В работе впервые выполнены комплексные исследования (гидрологические, гидрохимические, гидробиологические, энзимологические) двух озер, находящихся на разных стадиях отделения от прол. Великая Салма (Полупресное, или Кисло-сладкое, озеро) и Кислой губы (озеро на Зеленом Мысу) Кандалакшского зал. Основой работы служил анализ данных экспедиционных исследований этих озер, которые были проведены в августе 1994, 2001 и 2002 гг., а также в феврале 2003 г. (две пробы воды из оз. Кисло-сладкого отобраны студенческой экспедицией МГУ).

КРАТКАЯ ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА РАБОТ

Исследуемые озера находятся недалеко от Беломорской биологической станции МГУ в пос. Приморском (рис. 1). Геоморфологически регион приурочен к северной оконечности Прибеломорской низменности. Максимальные высоты окрестной территории не >100 м.

В настоящее время главным эндогенным процессом, формирующим облик региона, является поднятие земной коры. Оно происходит со средней скоростью 5 мм в год и приводит к отделению от акватории Кандалакшского зал. лагун, заливов и проливов, появлению отмелей [15]. Так образуются водоемы, постепенно теряющие свою

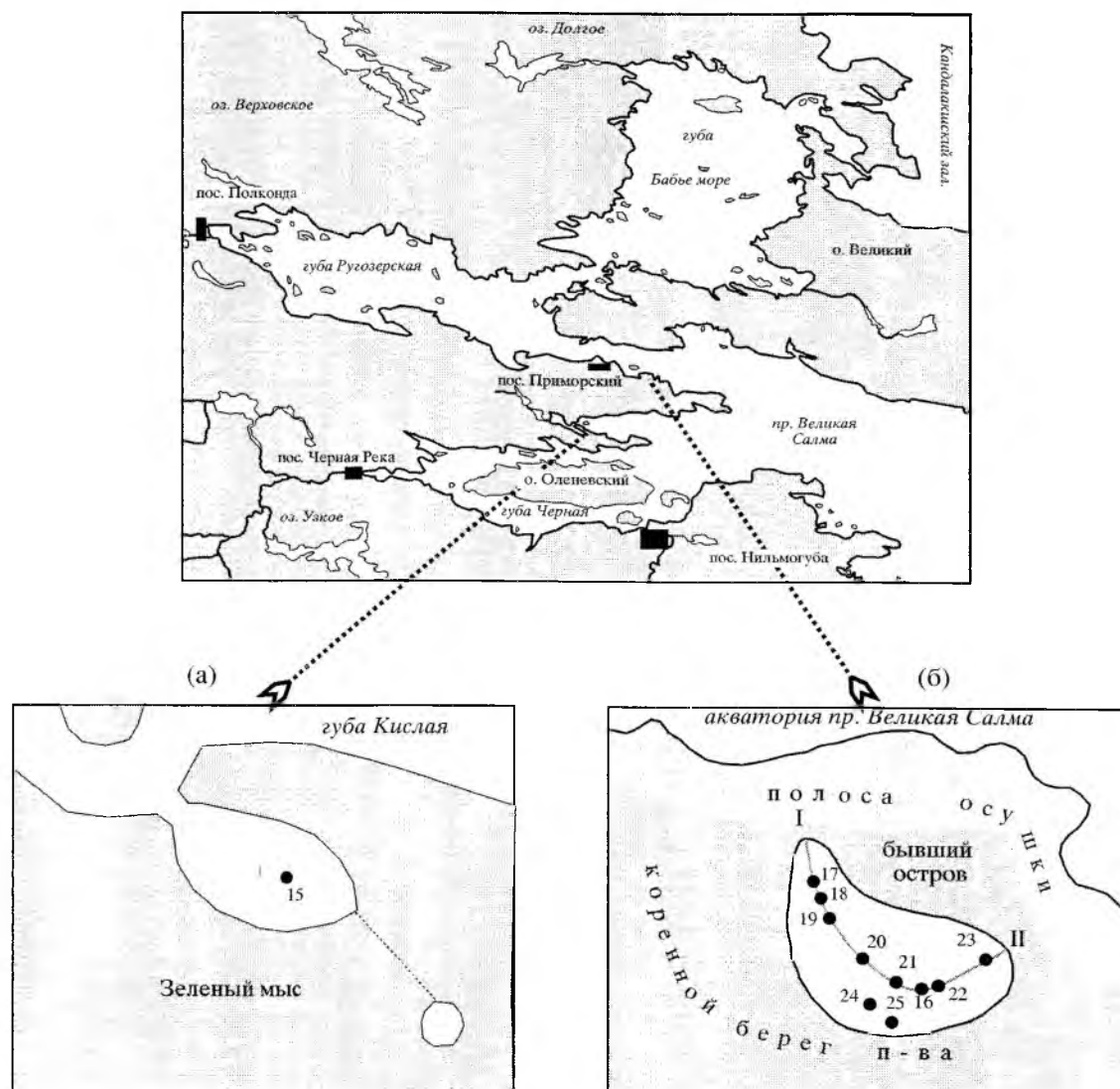


Рис. 1. Схема района работ и расположения озер. а – озеро на Зеленом мысу, б – Кисло-сладкое оз. I – II – положение гидрологического разреза между заросшей и каменной перемычками Кисло-сладкого оз. соответственно. 15–25 – станции отбора проб в 2001 г.

связь с морем. Именно таким образом сформировались исследуемые озера.

Кисло-сладкое оз. расположено в 2 км к востоку от пос. Приморского, имеет овальную форму ~100 м в длину и 60 м в ширину. Озеро образовалось в результате отчленения акватории пролива между небольшим, заросшим соснами безымянным островом и северным коренным берегом п-ва Киндо. В прошлом дно пролива с двух сторон ограждали два подводных порога, которые в результате общего поднятия суши вышли на поверхность и образовали перемычки, отделяющие акваторию озера от прол. Великая Салма. Одна из перемычек заросла травой и, по-видимому, затопливается только в периоды снеготаяния при переполнении озера. Вторая перемычка сложена окатанными валунами и галькой. Через нее осу-

ществляется слабый поверхностный водообмен с Кандалакшским зал. во время приливов. Во время сизигийных приливов расход воды, сочившейся между валунами, не превышал 1–1.5 л/сек. Скорее всего, существует и слабый подземный водообмен через весь северный берег озера. Южный берег заболочен. Здесь в озеро с крутого склона полуострова стекает еле заметный, но не пересыхающий ручеек. Расход воды в нем в период наблюдений не превышал 0.01 л/сек. Однако и такой приток в силу небольших размеров озера оказывает заметное влияние на формирование его гидрологического режима. Возможно, существуют и подводные родники, распресняющие озерные воды.

Второе озеро находится на Зеленом мысу в ~6 км к югу от пос. Приморского. Оно имеет почти та-

кие же размеры, как и первое, но более округлой формы. Образовалось озеро путем отчленения от Кислой губы лагуны, вдававшейся вглубь полуострова. В настоящее время озеро от залива отделяет каменная перемычка, через которую и осушается водоем в обе стороны. Во время полной воды приливов происходит приток морских вод в озеро, а в остальное время – сток из озера. Во время отлива 8.08.2001 г. расход поверхностного стока из озера визуально составлял ~10 л/сек. Западный берег озера заболочен, однако пресного поверхностного притока авторам обнаружить не удалось. На южном берегу, более высоком и крутом, чем другие, есть хорошо выраженное сухое русло временного водотока. Он берет начало из небольшого и сильно заболоченного озера в средней части мыса. Судя по данным солёности 1994 г., пресная подпитка озера периодически может осуществляться подземными водами. Таким образом, формирование гидрологического и гидрохимического режима озера на Зеленом мысу происходит в условиях более интенсивного водообмена с Кандалакшским зал. при гораздо более слабом распресняющем влиянии вод суши.

Чаши обоих озер имеют воронкообразную форму. Средняя глубина Кисло-сладкого оз. 1–1.5 м, озера на Зеленом мысу не >2 м. Максимальные глубины 4.5–4.6 и 6.1–6.2 м соответственно. Координаты наиболее глубоких точек озер, полученные с помощью навигатора системы GPS: 66°32', 910 с.ш.; 33°08', 068 в.д. (для Кисло-сладкого оз.) и 66°31', 806 с.ш.; 33°05', 704 в.д. (для озера на Зеленом мысу). Они отмечаются в небольших по площади (примерно 3 × 4 м) впадинах, находящихся почти в центрах озер. Глубину озер во впадинах определить очень трудно, так как они заполнены жидким илом и разлагающейся органической массой. Такое дно не дает устойчивый отражающий сигнал эхолота и постепенно засасывает механический лот.

При взгляде на озера с берега обращают на себя внимание обширные маты из отмерших нитчатых водорослей, дрейфующие под действием ветра. У наветренных берегов они образуют сплошные поля. Как оказалось, нитчатые водоросли – один из главных структурообразующих элементов экосистем озер, в значительной мере определяющий их гидрохимический облик.

П-ов Киндо, на котором расположена биостанция, пересекается северным полярным кругом. Географическое положение озер определяет климатические условия формирования их гидрологического режима. В данном случае это продолжительная зима со среднесуточной температурой в январе –11°C и относительно короткое влажное лето с максимальным количеством осадков в августе и со средней температурой в июле +14°C. Замерзание озер

с продолжительным ледоставом (с октября по май) приводит к их полной изоляции от моря.

В теплый период года в районе преобладают северо-восточные и восточные ветры. Лесной покров на берегах озер замедляет скорость ветра над ними, что ослабляет ветровое перемешивание их вод.

Во время летних экспедиционных работ дневная температура воздуха, как правило, поднималась до 17–19°C. С 13.08.2001 г. после прохождения атмосферного фронта похолодало до 8–10°C. Наблюдалась переменная облачность без существенных осадков (кроме 13–14 августа).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Труднодоступность озер как по воде, так и по суше предопределила использование надувной резиновой весельной лодки в качестве средства для проведения гидрологических и гидробиологических работ. Отбор проб воды осуществлялся с помощью насосной системы, состоящей из маркированного шланга, малогабаритного погружного насоса фирмы “LVM” (Великобритания) и автомобильного аккумулятора. Герметичность насоса и использование в конструкции его деталей, контактирующих с водой, полимерных материалов исключало возможность загрязнения проб при их отборе. На заданный горизонт опускался конец всасывающего шланга, размеченного через каждые 10 см. Таким интервалом оценивается минимальная дискретность отбора проб. (Подобный способ взятия проб воды одним из первых использовал С.О. Макаров во время экспедиции на “Витязе” в 1883–1886 гг.)

In situ измерялись температура, солёность, pH и содержание растворенного O₂. Для этого использовался измеритель солёности, температуры и давления с дистанционной индикацией показаний “Hydrolab” и термооксиметр “Марвет Юниор-97” фирмы “Elke Sensor” (Эстония). В нескольких пробах содержание O₂ определялось методом Винклера. Измерения pH и окислительно-восстановительного потенциала Eh проводили портативными приборами фирмы “Hanna”. Большинство химических анализов было проведено в полевых условиях и в лаборатории Беломорской биологической станции МГУ. Для этого были использованы портативный спектрофотометр “DR 2010” и цифровой титратор с соответствующими методиками экспресс-анализа американской фирмы “HACH”. Авторы не имели возможности провести желательную в некоторых случаях предварительную подготовку проб воды, поэтому концентрации аммония, фосфатов в придонных водах, нитратов и железа считают ориентировочными (точность 15–20%). По мнению авторов также при-

Таблица 1. Ионный состав вод Кисло-сладкого оз. и Кандалакшского зал. Белого моря, г/л (в скобках – экв. %)

Водоем, дата отбора проб	Горизонт наблюдения, м	НСО ₃ ⁻	СГ	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Σ _n
Кисло-сладкое оз. 13.08.2001 г.	0	0.086 (0.26)	8.591 (45.33)	1.212 (4.73)	0.18 (1.69)	0.595 (9.18)	4.669 (38.08)	0.15 (0.72)	15.483
	4	0.15 (0.30)	12.922 (44.58)	1.912 (4.88)	0.29 (1.78)	0.903 (9.10)	7.262 (38.66)	0.225 (0.71)	23.664
03.02.2003 г.	0	0.159 (0.25)	16.046 (42.72)	3.359 (6.60)	0.40 (1.89)	1.104 (8.58)	9.524 (39.08)	0.365 (0.88)	30.957
Кандалакшский зал. [2]	Поверхностная водная масса	0.112 (0.20)	14.21 (45.09)	1.98 (4.64)	0.30 (1.71)	0.96 (8.90)	7.75 (38.65)	0.25 (0.72)	26.84

близительны данные по концентрации O₂ > 20 мг/л (200% насыщения), так как они получены за пределами рабочего диапазона термооксиметра. Метод Винклера в слое экстремально высокого пересыщения воды O₂ оказался непригодным из-за моментального выделения на стенках склянок пузырьков газа при отборе проб воды. Зимние пробы на содержание гидросульфидов и сульфидов (в отличие от летних, анализ которых проводился сразу после отбора проб) обработаны с задержкой на месяц. Пластиковые бутылки, в которых хранились пробы, были полностью заполнены.

В Институте географии РАН были проанализированы пробы воды на общий солевой состав Т.А. Востоковой и на валовое содержание N и P Г.С. Шилькрот. Разрушение органических соединений производили кипячением образцов воды в течение получаса с добавлением щелочного реактива с персульфатом с последующим определением минеральных соединений (нитратов и фосфатов). Растворенные формы органических соединений определены в предварительно отфильтрованных (в лаборатории Беломорской биологической станции МГУ) в день отбора пробах. Максимальный срок транспортировки и хранения проб составил три недели.

Содержание микроэлементов определено А.В. Дубининым (Институт океанологии РАН). Анализ проб был выполнен методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборе "PlasmaQuad II STE" фирмы "Fisons Instruments" с применением двух внутренних стандартов – In и Re. В 10 мл раствора природных вод вводилось 0.2 мл азотнокислого раствора (5%) In и Re. Расчет концентраций элементов проводился по мультиэлементным стандартным растворам, правильность анализа контролировалась стандартным образцом Геологической службы США – BCR-1 (базальт) в различной степени разбавления (1000–50000 раз).

Для эколого-биохимической характеристики воды озер использовали разработанные в ИО РАН экспрессные методики, позволяющие обна-

ружить гидролитические активности ферментов в среде обитания [6]. Выявление протеазной активности исследуемых водных масс различного генезиса, осуществляющей ферментативный катализ органических соединений белковой природы, их комплексов и производных проводили по маркерному белку азоказеину ("Serva", США). Амилазную активность, ответственную за ферментативную деструкцию биополимеров полисахаридной природы, в водах озер определяли по модифицированному красителем "Проционовым-5СХ" крахмалу (Олайна, Латвия) [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Температура воды. Для летней температурной стратификации озерных вод характерен более теплый (на 2–3°C) по сравнению с поверхностными водами Кандалакшского зал. поверхностный слой, имеющий толщину ~1 м (рис. 2 и 3, табл. 1).

В нижней части поверхностного слоя воды отмечается слабо выраженный слой промежуточного подповерхностного температурного минимума, разница температуры между поверхностью и слоем минимума обычно не превышает 0.5°C. Его существование связано с суточным ходом температуры поверхностного слоя и соответствует послеполюденному состоянию, когда и производились наблюдения.

Ниже располагается промежуточный максимум температуры. В наибольшей степени температурный максимум был выражен в Кисло-сладком оз. 5.08.01. В этот день он находился между 1.2 и 2.5 м, а температура в нем достигла 21.4°C (разность температуры между подповерхностным минимумом и максимумом составила 5.1°C).

В озере на Зеленом мысу температурный максимум обычно выражен слабее и располагается глубже (в слое 3.0–3.2 м). Прогрев воды в этом слое происходит на обширных участках мелководий озер. Теплопередача происходит от дна, которое прогревается на солнце. Вертикальная устой-

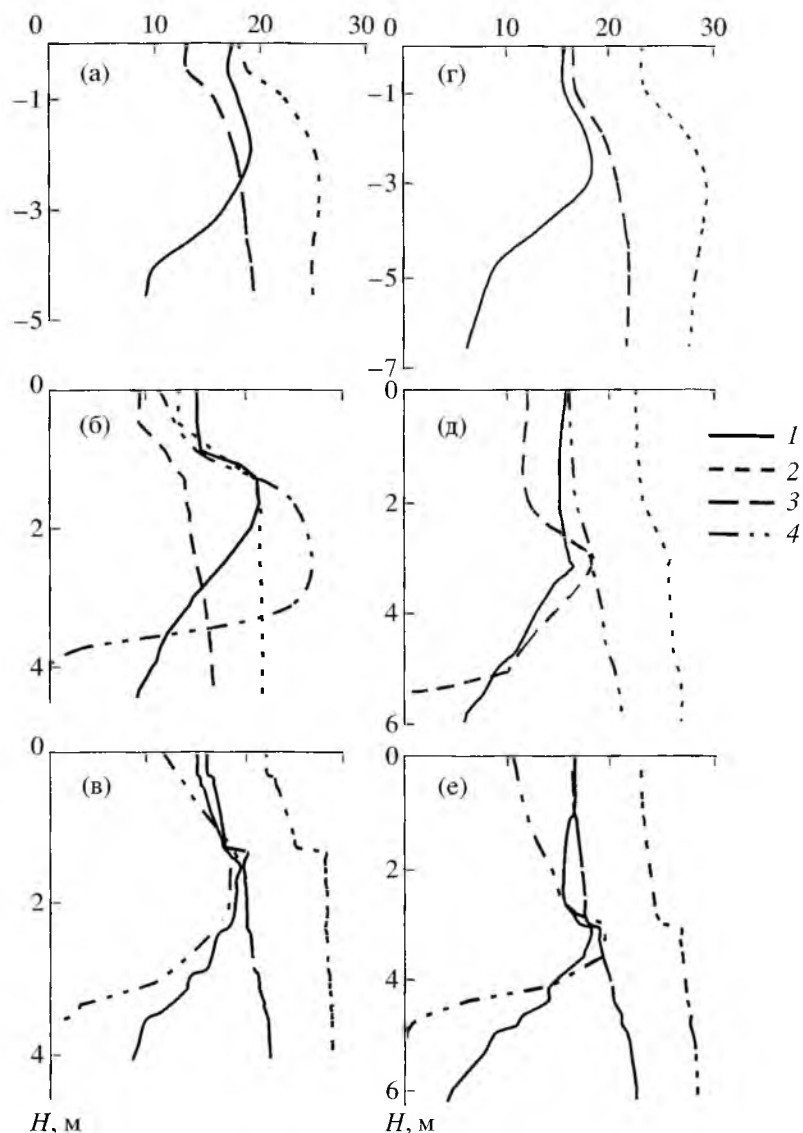


Рис. 2. Вертикальное распределение температуры воды T , $^{\circ}\text{C}$ 1; солёности S , ‰ 2; условной плотности 3 и растворенного кислорода O_2 мг/л 4 в Кисло-сладком оз. 24 августа 1994 г. (а), 5 августа 2001 г. (б), 5 августа 2002 г. (в) и в озере на Зеленом мысу 26 августа 1994 г. (г), 8 августа 2001 г. (д), 11 августа 2002 г. (е).

чивость слоя обеспечивается высокими положительными градиентами солёности воды.

Ниже слоя максимума температура воды с глубиной монотонно понижается. Минимальное ее значение (3.9°C) зафиксировано в оз. на Зеленом мысу 11.08.2002 г. в придонном слое впадины на глубине 6 м. В прол. Великая Салма, в Чистой губе в это время температура $<4^{\circ}\text{C}$ наблюдалась (кроме фронтальных зон) ниже 12–15 м.

Солёность и солевой состав вод. Как показали многократные измерения в Кисло-сладком оз. в 2001–2002 гг., а также сравнение с данными 1994 г., средняя солёность всей толщи вод озер (т.е. солевой запас в чашах озер) испытывает колебания, существенно меняясь в течение несколь-

ких суток. При этом общие черты ее вертикального распределения в летние сезоны сохраняются (табл. 1, рис. 2 и 3).

Вертикальная структура солёности воды озер включает относительно опресненный поверхностный слой. В 2001 г. в Кисло-сладком оз. его толщина составляла ~ 1 , а в озере на Зеленом мысу ~ 2 м. Соответственно в первом озере солёность воды в центре акватории колебалась от 13.2 (5.08) до 16.5, а во втором была $\sim 23\text{‰}$. В Кисло-сладком оз. поверхностная вода может осолоняться до 19‰ с одновременным уменьшением толщины верхнего слоя до 0.5 м (1994 г.) или даже до 22‰ и 0.3 м (2002 г.). Такая же тенденция при

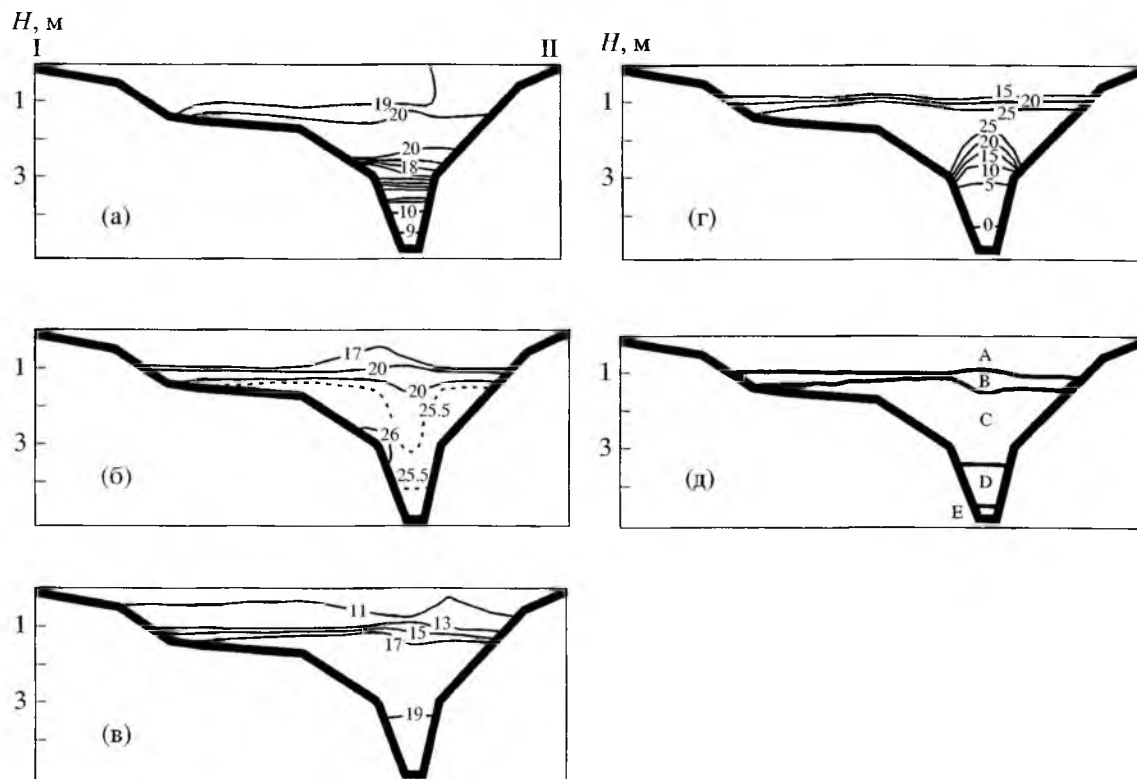


Рис. 3. Распределение T , °C (а), S , ‰ (б), условной плотности (в), растворенного O_2 (г) и границы характерных слоев воды (д) на разрезе в Кисло-сладком оз. в августе 2001 г. I и II – конечные точки разреза вдоль озера (рис. 1), А – эпилимнион, В – металимнион (слой галоклина и пикноклина), С – верхняя часть гипolimниона с высокими концентрациями кислорода, D – слой падения концентрации кислорода, E – придонный сероводородный слой впадин.

осолонении свойственна и водам озера на Зеленом мысу.

Зимой 2003 г. во время ледостава соленость воды поверхностного слоя Кисло-сладкого оз. повышалась до 30–31‰, что было связано, вероятно, с осолонением вод при льдообразовании.

Съемка акватории Кисло-сладкого оз. 11.08.2001 г. позволила обнаружить локальное опреснение вод до 3–10‰ на поверхности у южного берега, куда впадает маленький ручей. Возможно, благодаря этому факту озеро и получило одно из своих названий “полупресное”.

Под верхним относительно опресненным слоем располагается галоклин. В оз. Кисло-сладком в 2001 г. скачок солености в слое галоклина превышал 5‰, а его толщина составляла 0.5 м. В озере на Зеленом мысу галоклин был выражен гораздо слабее, а его толщина была ~1 м (рис. 2).

Ниже галоклина соленость воды, как правило, плавно увеличивается с глубиной в соответствии с общим количеством солей в чаше озера в данный момент, которое, как уже отмечалось, было величиной непостоянной. В озере на Зеленом мысу соленость под галоклином достигала 29.6 (1994 г.), а в Кисло-сладком – 28.9‰ (2002 г.).

В придонной воде впадин во время наблюдений 2001–2002 гг. величина солености воды уменьшалась в пределах десятых долей. В 1994 г. это уменьшение было значительнее и достигало 0.5 в Кисло-сладком оз. и 1.7‰ в озере на Зеленом мысу, захватывая нижний 3-метровый слой. Это говорит о разгрузке в озерах пресных подземных вод, дебит которых зависит от водности года.

Сравнение величин солености воды в озерах с режимными характеристиками солености воды Кандалакшского зал. показывает, что интервал ее колебания в озерах превышает интервал колебания солености поверхностной водной массы залива (19.2–27.99‰), толщина которой составляет 15–20 м [2].

Солевой состав вод наиболее опресненного Кисло-сладкого оз. почти не отличается от солевого состава беломорских вод (табл. 1). Это объясняется очень низкой минерализацией вод притока, которые, разбавляя морскую воду, не изменяют ее солевой состав. Небольшая трансформация солевого состава наблюдается в озерных водах с повышением их солености, что связано с уменьшением относительной концентрации Cl^- и Mg^{2+} , а также одновременным увеличением SO_4^{2-} , Ca^{2+} и Na^+ . Наиболее вероятная причина отмеченной зако-

Таблица 2. Значения гидролого-гидрохимических параметров характерных слоев воды озер, наблюдавшиеся 5–12 августа 2001–2002 гг. (здесь и в табл. 3 А–Е – характерные слои (рис. 3д), прочерк – отсутствие данных)

Параметры	Оз. Кисло-сладкое			Озеро на Зеленом мысу		
	А	С	Е	А	С	Е
Горизонт верхней границы слоя, м	поверхность	1.15–1.55	3.8–4.5	поверхность	3.0–3.1	5.2–5.6
Горизонт нижней границы слоя, м	0.8–1.0	3.20–3.75	дно	2.0–2.9	4.5–5.4	дно
T, °C	15.0–19.6	12.0–20.8	8.3–8.9	15.3–16.4	8.0–16.7	3.9–7.2
S, ‰	13.14–25.02	21.06–28.70	21.66–28.79	22.68–24.70	25.83–27.28	26.88–27.85
ρ, у. е.	9.17–17.76	13.87–21.56	16.66–18.31	16.20–17.31	18.66–20.80	21.14–22.14
pH	8.23–9.20	8.20–8.90	7.0	8.10–8.60	8.30–8.70	6.90
O ₂ , мг/л	10.0–11.5	5–29.6	~0	10.38–12.2	5.0–19.26	~0
O ₂ , ‰	105–125	45–320	~0	107–120	60–204	~0
CO ₂ , мг/л	3.9–23.3	8.8–26.0	25.1–53.2	16.9–22.9	19.3–26.8	34.8–176.0
HS ⁻ + HS ²⁻ , мг S/л	0.003–0.022	0.006–0.021	5.6–10.3	0.0–0.013	0.0–0.025	38–>60
Alk, мг CaCO ₃ /л	44–63	76–89	121–135	74	91–118	700
NH ₄ ⁺ , мг N/л	0.08–0.64	0.07–0.51	0.49–2.40	0.054–0.490	0.11–0.42	17.5
NO ₂ ⁻ , мг N/л	0.004–0.016	0.004–0.009	0.006–0.013	0.005–0.006	0.004–0.008	0.016–0.030
NO ₃ ⁻ , мг N/л	0.2–0.7	0.2–0.5	0.6–3.3	0.6	0.6–0.7	5.0–13.5
N _{общ. раств.} , мг/л	2.25	5.0–6.4	3.25	2.20	2.75	12.70
N _{общ.} , мг/л	9.35	–	7.14	3.35	7.60	12.90
PO ₄ ³⁻ , мг P/л	0.006–0.03	0.00–0.1	0.01–0.07	0.03–0.05	0.058–0.11	0.668–2.25
P _{общ. раств.} , мг/л	0.10	0.10	0.32	0.083	0.10	8.33
P _{общ.} , мг/л	0.11	0.188–0.75	0.58	–	0.12	8.95

номерности – метаморфизация солевого состава при льдообразовании и сохранение свойств зимней воды в условиях застойности глубинных вод. Сходные черты подобной трансформации ионного состава были прослежены на Аральском море при солёности воды ~30‰. В 1990 г. во льду были повышены относительные концентрации Mg²⁺ и Cl⁻ и понижены SO₄²⁻ и Na⁺ [13].

Условная плотность. В озерных водах она изменяется в пространстве и во времени и в основном соответствует ходу солёности воды. Летом минимальное (9.2) и максимальное (22.38) значения наблюдались в Кисло-сладком оз. соответственно в поверхностной и придонной водах. Положение пикноклина, его толщина и градиенты плотности в нем полностью определяются характеристиками галоклина, так как температура в этом слое возрастает с глубиной, что ослабляет вертикальную устойчивость вод.

Глубже пикноклина, как правило, отмечается плавное увеличение плотности с глубиной. На этих горизонтах на ее ходе начинает существенно сказываться уменьшение с глубиной температуры воды. В соответствии с изменчивостью обще-

го солевого запаса испытывает колебания и плотность воды (рис. 2 и 3, табл. 2).

Необходимо отметить, что опреснение придонных вод впадин не всегда компенсируется падением их температуры. Это наблюдалось в Кисло-сладком оз. 11.08.2001 и 5.08.2002 гг., а в озере на Зеленом мысу 26.08.1994 г.

Характер вертикального распределения гидрофизических параметров позволяет выделить в структуре водной толщ озер слои эпилимниона, металимниона (скачка солёности и плотности воды) и гиполимниона с придонным слоем впадин (рис. 3д). Слой промежуточного максимума температуры располагается в металимнионе и верхней части гиполимниона. Абсолютные значения гидрологических характеристик в структурных слоях, а также толщины слоев испытывают колебания во времени. Тем не менее эти данные удобно использовать при анализе распределения гидрохимических параметров.

Растворенный O₂. В озерах наблюдалась особенность вертикального распределения O₂, ранее авторами нигде не встречавшаяся. В 2001 г. в эпилимнионе Кисло-сладкого оз. при облачной с прояснениями погоде содержание растворенного

O₂ колебалось от 10.5 до 11.5 мг/л (110–125% насыщения). В озере на Зеленом мысу оно было ~12 мг/л (120%). В пасмурную и дождливую погоду 13.08.2001 г. его содержание в Кисло-сладком оз. было <10.0–10.1 мг/л (105%). Это говорит о значительном влиянии погодных условий (определяющих освещенность водной среды) на интенсивность фотосинтеза в озерах.

В металимнионе концентрация O₂ с глубиной быстро возрастает и в верхнем слое гиполимниона доходит до 18 мг/л (175% насыщения) в озере на Зеленом мысу и до 25–27 мг/л (280–290%) в Кисло-сладком оз. Максимальное содержание O₂ 29.6 мг/л (329%) было зафиксировано в придонном слое на глубине 1.5 м (ст. 19, оз. Кисло-сладкое). Очевидно, что столь высокие концентрации O₂ сомнительны, так как получены прибором, работавшим за верхним пределом гарантированного измерительного диапазона. Тем не менее авторы не пренебрегают ими, а считают ориентировочными. О необычайно высокой концентрации O₂ свидетельствовала интенсивная дегазация проб воды на стенках кислородных склянок (как при откупоривании бутылки с газированной минеральной водой) при попытках отбора проб по методу Винклера. Дегазация происходила даже под водой во время подъема воды насосом с горизонтов 1.5–2.0 м к поверхности. Ее хорошо было видно по шлейфу пузырьков газа из конца подающего шланга, что удалось запечатлеть на фотографии. Слой максимальных концентраций O₂ по вертикали соответствовал промежуточному слою максимума температуры и ограничивался снизу изотермами 12.5–13.0°C. В 2002 г. концентрации O₂ в слое максимума были ниже, чем в 2001 г. (200–210% насыщения), но все равно достаточно высокие, что подтверждает наблюдения предыдущего года.

В нижней половине гиполимниона содержание O₂ с глубиной быстро убывало и примерно в полуметре от дна падало до нуля. Градиенты роста его концентрации в металимнионе и падения в гиполимнионе необычайно велики и достигали в оз. Кисло-сладком 13.08.2001 г. 3.1 и 5.0 мг/л на 10 см вертикального профиля соответственно. Однако если верхний оксиклин (роста) соответствовал галоклину и пикноклину, то нижний оксиклин (падения) располагался в слое постепенного, относительно медленного роста солености и плотности воды.

Причиной таких высоких концентраций растворенного O₂ служил фотосинтез нитчатых водорослей, в больших количествах распространенных на мелководьях озер. Нитчатые водоросли концентрировались у дна, где лучше всего прогревалась вода и отмечался рост ее солености. По оценкам авторов степень их покрытия некоторых участков озер доходила до 80–90%. Часть отмерших водорослей скапливалась в ямах и разлагалась, пол-

ностью потребляя O₂. Геоморфология дна препятствовала вентиляции придонных вод впадин.

Толщина придонного анаэробного слоя в период работ 2001–2002 гг. была ~0.5 м. В 1994 г. при других условиях водообмена, плотностной стратификации вод, их аэрации и фотосинтеза она увеличивалась до горизонтов 1.6 м в озере на Зеленом мысу и 2.5 м в Кисло-сладком оз. При максимальном развитии анаэробные процессы могут таким образом охватывать весь гиполимнион исследуемых озер.

Активная реакция воды (рН) почти во всех аэробных слоях озера составляла 8.2–9.2. У нижней границы аэробного слоя Кисло-сладкого оз. она уменьшалась до 7.5, а в анаэробном слое озера на Зеленом мысу – до 6.9. В феврале 2003 г. в поверхностном слое Кисло-сладкого оз. она снижалась до 6.3–6.4.

Щелочность. В эпилимнионе величина щелочности воды в Кисло-сладком оз. колебалась от 44 до 63 мг CaCO₃/л. Экстремумы щелочности соответствовали минимуму и максимуму солености воды. В озере на Зеленом мысу вследствие лучшего водообмена с морской акваторией величина щелочности была повышена до 74 мг CaCO₃/л. Пропорциональное соотношение общей щелочности с соленостью показывает, что ее основу в эпилимнионе составляет бикарбонатная составляющая.

Согласно стратификации солености воды величина ее щелочности с глубиной растет и достигает отмеченных в придонных слоях максимумов 135 и 700 мг CaCO₃/л в Кисло-сладком оз. и озере на Зеленом мысу соответственно. На величину общей щелочности воды влияют, помимо гидрокарбонатов, высокие концентрации гидросульфидов и аммонийного N, что характерно для сероводородных вод [1].

Углекислота в озерах содержится в весьма высоких количествах с закономерным увеличением от поверхностного к придонному слою. Четырехкратное превышение концентрации CO₂ в эпилимнионе озера на Зеленом мысу по сравнению с Кисло-сладким оз. объясняется, вероятно, различиями в плотностной стратификации вод. Минимальное количество CO₂ (8.8–10.8 мг/л) зафиксировано в эпилимнионе Кисло-сладкого оз., а максимальное (400 мг/л) – в придонных водах озера на Зеленом мысу.

Сероводород (H₂S). Гидросульфиды (HS⁻) с сульфидами (S²⁻) присутствовали во всей водной толще Кисло-сладкого оз. Их содержание в эпилимнионе составляло 0.003–0.012 мг/л, увеличиваясь в слое отрицательных градиентов O₂ до 0.047–0.554 мг/л (слой сосуществования O₂ и H₂S, или с-слой). В анаэробном придонном слое их концентрации были 5.6–10.3 мг/л. Содержание H₂S, определенное методом титрования, – 16.6 мг/л (при

параллельном определении концентрации гидросульфидов с сульфидами 5.58 мг/л).

В озере на Зеленом мысу HS^- и S^{2-} в верхней части водной толщи в основном не фиксировались. На горизонте 5.5 м их концентрация была 0.028, а 6 м – >60 мг/л. При параллельном определении H_2S титрованием его концентрации составили 6.71 и >90 мг/л соответственно.

Толщину c -слоя в озерах ввиду весьма высоких градиентов O_2 и форм сероводорода (HS^- и S^{2-}) на стыке аэробной и анаэробной зон определить экспериментально (даже примененным авторами способом откачки проб насосом) с высокой точностью было невозможно. По-видимому, его толщина в озере на Зеленом мысу может достигать 1.0–1.1 м в периоды поступления морских вод, о чем свидетельствует одновременное осолонение озера. Однако это состояние, вероятнее всего, неустойчивое.

При отборе проб воды из Кисло-сладкого оз. зимой 2003 г. четкий запах H_2S стал ощущаться сразу, как была пробурена лунка во льду. Это свидетельствует о том, что в период ледостава анаэробные условия охватывают всю толщу вод озера. В пробе воды, обработанной с задержкой почти на месяц, концентрации HS^- и S^{2-} составили 0.015–0.020 мг/л.

Железо (в форме общего растворенного) находилось в воде озер в концентрациях 0.01–0.03 мг/л. Концентрации $\text{Fe}_{\text{общ}}$ (лабильного) при параллельном определении растворенной формы всегда было выше, что закономерно. Содержание лабильного Fe в Кисло-сладком оз., по-видимому, зависит от водообмена с губой, так как оно уменьшалось при осолонении вод. Минимальные его концентрации составляли 0.003–0.005 11.08.2001 г., а максимальные – 0.260 мг/л 05.08.2001 г. (располагались в слое максимальных концентраций кислорода).

В вертикальном распределении $\text{Fe}_{\text{общ}}$ в Кисло-сладком оз. 05.08.2001 г. можно отметить однородность по столбу воды при содержании 0.002–0.004 и увеличение до 0.130 мг/л в анаэробном придонном слое. В распределении лабильного Fe в это же время отмечены два минимума: 0.06 (металимнион) и 0.02 мг/л (c -слой).

Таким образом, в ситуации повышенного опреснения Кисло-сладкого оз. подвижное Fe во всем аэробном слое преимущественно адсорбируется на взвеси, а в анаэробном переходит в раствор.

В озере на Зеленом мысу повторных наблюдений не проводилось, поэтому предположений о возможном характере временной изменчивости содержания Fe сделать нельзя. В вертикальном распределении $\text{Fe}_{\text{общ}}$ в этом озере наблюдалась высокая однородность при концентрациях 0.01–0.03 мг/л. Содержание лабильного Fe повышалось с глубиной от 0.03 мг/л в эпилимнионе до

0.05 в слое максимума O_2 и до 0.11–0.15 мг/л в нижней части гипolimниона.

Соединения фосфора (P) в озерах представлены во всех растворенных и взвешенных (минеральных и органических) формах (табл. 2).

Оцененные авторами концентрации PO_4^{3-} в Кисло-сладком оз. были близки к среднепогодовым концентрациям в поверхностной структурной зоне Кандалакшского зал., а в озере на Зеленом мысу соответствовали максимальным концентрациям той же структурной зоны.

Вертикальное распределение $\text{P}_{\text{общ}}$ было очень похоже на распределение предыдущей формы. Единственное отличие заключалось в расположении максимума (0.75 мг P/л), который в Кисло-сладком оз. находился несколько выше (в слое максимума концентрации O_2 на 1.6–1.7 м). Зимой в Кисло-сладком оз. содержание $\text{P}_{\text{общ}}$ оставалось на уровне летнего (0.084–0.108 мг P/л).

Таким образом, в Кисло-сладком оз. по вертикальному распределению соединений P можно выделить слой минимума PO_4^{3-} , связанный с их интенсивным потреблением и совпадающий со слоем максимума взвешенного фосфора ($\text{P}_{\text{взв}}$) и максимального пересыщения вод O_2 (верхняя часть гипolimниона). Ниже (слой падения содержания O_2) начинает превалировать органический растворенный фосфор ($\text{P}_{\text{орг.раств.}}$), что связано с относительным преобладанием в этом слое процессов деструкции органики над процессами ее синтеза.

В озере на Зеленом мысу область доминирования $\text{P}_{\text{взв}}$ находится в слое падения содержания O_2 . Слой максимального потребления PO_4^{3-} выражен не так ярко и расположен в эпилимнионе.

Соединения азота (N) были представлены в озерах во всех формах. Относительно других форм содержание NO_2^- было наименьшим (0.004–0.01 мг N/л, табл. 2). В вертикальном распределении отмечены максимумы NO_2^- (0.026 мг N/л) в Кисло-сладком оз. в слое падения содержания O_2 (3.4 м) 11.08. 2001 г. и 0.03 мг N/л в озере на Зеленом мысу в придонном анаэробном слое.

В озерах по сравнению с морскими акваториями в повышенных количествах содержатся NO_3^- и NH_4^+ , накапливающиеся преимущественно в придонных водах.

В вертикальном распределении общего растворенного N ($\text{N}_{\text{общ.раств.}}$) максимумы концентраций (при фоновых концентрациях 2–5 мг N/л) отмечены в Кисло-сладком оз. – 9 мг N/л в слое D (рис. 3д) и в озере на Зеленом мысу в придонных анаэробных водах (12.7 мг N/л) в 2001 г. При этом в первом озере наблюдался и дополнительный мак-

Таблица 3. Содержание растворенных микроэлементов, мкг/л, в характерных слоях воды озер

Элемент	Кисло-сладкое оз. 5.08.2001 г.		Озеро на Зеленом мысу 8.08.2001 г.			
	С	Е	А	С	Д	Е
V	–	–	303	–	341	337
Cr	0.2	0.3	0.5	0.5	0.6	0.7
Mn	–	–	7.0	4.1	14.2	43.6
Fe	–	–	303	–	321	329
Co	0.28	1.89	1.96	2.86	2.43	2.46
Ni	1.5	3.1	4.3	4.2	4.0	4.6
Cu	2.4	4.9	5.4	5.7	4.5	4.7
Zn	–	–	9	–	17	12
As	29	104	170	183	180	193
Rb	8.6	61.2	72.6	80.2	83.4	86.3
Sr	375	4118	5118	5769	5719	6388
Cd	–	–	1.48	–	0.64	0.33
Cs	–	–	0.27	–	0.25	0.24
Ba	–	–	23	–	62	52
Pb	0.94	1.23	1.28	2.06	5.75	1.84
U	0.37	1.52	2.50	3.45	3.08	1.38

симум в верхней части металимниона (7.8 мг N/л). Зимой содержание общего азота ($N_{\text{общ}}$) в воде Кисло-сладкого оз. падало до 0.5–0.74 мг N/л.

При рассмотрении соотношений всех растворенных форм N видно, что содержание $N_{\text{общ,раств}}$ определяется главным образом формой растворенного органического азота ($N_{\text{орг,раств}}$), присутствующего в воде благодаря деструкции органики. При этом отмечается соответствие максимумов $N_{\text{орг,раств}}$ и NH_4^+ . Следовательно, в круговороте N в озере на Зеленом мысу процесс растворения и минерализации органики преобладает преимущественно в анаэробном слое и на его границе. Для Кисло-сладкого оз. это граница аэробного и анаэробного слоев, а также верхняя граница слоя металимниона.

Несколько иной характер вертикального распределения наблюдался у $N_{\text{общ}}$. В Кисло-сладком оз. его содержание снижается от эпилимниона ко дну от 9.35 до 7.14 мг N/л, а в озере на Зеленом Мысу в таком же порядке возрастает от 3.35 до 12.90 мг N/л.

Таким образом, в Кисло-сладком оз. можно отметить максимум взвешенного азота ($N_{\text{взв}}$) в эпилимнионе (6.9 мг N/л) с уменьшением в нижнем слое до 3.5–3.9 мг N/л. В озере на Зеленом мысу максимум приходится на верхнюю часть гипolimниона (4.9 мг N/л).

Отношение взвешенных форм N и P в Кисло-сладком оз. в 2001 г. в эпилимнионе ~700, а в анаэробном слое ~15. В озере на Зеленом мысу ана-

логичные отношения в слое максимума O_2 составили 240, в с-слое – 1.3, а в анаэробном слое – 0.3. Судя по полученным величинам, взвешенные формы биогенных веществ в основном должны ассоциироваться с неорганической составляющей при подавляющем преобладании N в аэробном слое. Лишь в анаэробном слое Кисло-сладкого оз., в нижней части снижения содержания O_2 и части с-слоя в озере на Зеленом мысу взвешенные формы могут быть связаны с органикой.

Отношения растворенных минеральных форм N и P как потенциальных источников питательных веществ для первичных продуцентов в оз. Кисло-сладком равны 47.3 в эпилимнионе, 137 в нижней части металимниона, 304 и 167 в верхней и нижней частях с-слоя соответственно и 110 в придонном слое. Для озера на Зеленом мысу отношения составляют 12.3 и 29.9 в эпилимнионе и в анаэробном слое соответственно. Таким образом, в озерах фосфаты лимитируют развитие первичных продуцентов органического вещества. Лишь в эпилимнионе озера на Зеленом мысу отношение растворенных минеральных форм N и P приближается к 7.

Микроэлементы. Концентрации микроэлементов в воде озер показаны в табл. 3. Литературные источники, данные в которых можно было бы сопоставить с полученными оценками, авторами не найдены. Поэтому для предварительного выявления особенностей распределения микроэлементов в изучаемых прибрежных водоемах

можно взять для сравнения фоновые их концентрации в морях и океанах [5].

Больше половины проанализированных элементов (Cr, Mn, Co, Ni, Cu, As, Rb, Pb, U, Zn) имеют концентрации примерно такие же, как в других морских бассейнах. Концентрации V и Fe более чем на два порядка, а Cd в 8 раз превышают фоновое содержание. Обогащение беломорских вод этими микроэлементами может происходить за счет воздействия горнорудных и металлургических предприятий Кольского п-ва через атмосферные переносы [3]. Концентрации Sr и Cs несколько меньше в водах озер, чем в других морских бассейнах.

В вертикальном распределении микроэлементов наиболее характерно накопление Mn в придонном анаэробном слое (озеро на Зеленом мысу), где он меняет валентность и растворимость его увеличивается. Рост содержания с глубиной Rb, Sr и U в Кисло-сладком оз. связан, вероятно, с солоностной стратификацией, так как эти элементы характеризуются консервативным характером распределения.

В фитопланктоне озер в августе 2001 г. доминировали мелкожгутиковые формы (табл. 4). Диатомовые, среди которых преобладали мелкие центрические виды, были более многочисленны в озере на Зеленом мысу ($>0.4 \text{ г/м}^3$). В этом озере было высоко содержание пресноводных зеленых водорослей.

Состав фитопланктона в исследованных озерах обьчен для прибрежных вод Белого моря в конце лета. Одноклеточные синезеленые водоросли находились в значительном количестве только в верхнем слое вод оз. Кисло-сладкое. На горизонтах 1.5–3.5 м самых глубоководных мест озер отмечены синезеленые нитчатки, вероятно происходящие из донных водорослевых матов на мелководьях. Состав фитопланктона в Кисло-сладком оз. более сходен с таковым в открытой части моря.

Биомасса фитопланктона была высокой, однако не достигала характерной для уровня цветения. Подобное количество фитопланктона не может вызывать наблюдавшегося резкого повышения концентрации O_2 в толще воды.

Пробы на зоопланктон отобраны из Кисло-сладкого оз. из слоя 0–3 м, а из озера на Зеленом мысу – 0–5 м 13 и 12 августа 2001 г. соответственно. Видовой состав зоопланктона в обоих озерах оказался беден. Он был представлен характерными для поверхностных слоев воды Кандалакшского зал. эвригалинными видами. В Кисло-сладком оз. преобладали два массовых в заливе вида – *Oithona similis* и *Acartia longiremis*. В видовом составе зоопланктона озера на Зеленом мысу кроме этих видов присутствовали также *Centropages hamatus*, *Podon leuckarti* и личинки моллюска *Littorina littorea*, причем *Acartia longiremis* в общей численно-

Таблица 4. Биомасса основных видов фитопланктона, мг/л, в аэробных слоях озер в августе 2001 г. (данные Т.Н. Ратьковой)

Виды фитопланктона	Оз. Кисло-сладкое		Озеро на Зеленом мысу	
	горизонты, м			
	0	1.5	0	3.5
Diatoms	146	106	448	396
Dinoflagellates	0	0	13	3
Phaeocystis, single celled	26	5	1	1
Chryomonades	15	0	20	13
Choanoflagellates	0	2	0	6
Anidentified flagellates	777	514	632	442
Cryptophytes	68	0	0	0
Chlorophytes	0	0	148	51
Picophytoplankton	29	96	17	19
Cyanobacteria, total	69	6	0	4
Всего	1130	723	1278	930

сти зоопланктона этого озера составил 90%, а в общей биомассе – 86%. В пробах было много детрита. В Кисло-сладком оз. и озере на Зеленом мысу численность зоопланктона составила 979 и 6033 экз/м³, а биомасса – 9.9 и 122.5 мг/м³ соответственно. В первом озере все рачки были очень прозрачными, без пищи в кишечнике. У рачков во втором озере кишечника были заполнены темным содержимым, встречались фекалии. По количественным показателям зоопланктон в нем соответствует таковому в открытых прибрежных районах Кандалакшского зал. [18]. Эти данные говорят о значительно худших кормовых условиях в Кисло-сладком оз. по сравнению с озером на Зеленом мысу.

Биохимические (ферментативные) процессы деструкции органического вещества. Из Кисло-сладкого оз., параллельно с пробами на гидрохимические анализы, были отобраны пробы воды для биохимического исследования динамических характеристик деструкции органического вещества – протеазной и амилазной ферментативных активностей (табл. 5). В исследованной акватории протеазная активность имела высокие значения 660–2260 ф.ед/л, что свидетельствует о больших скоростях деструкции органического вещества, характерных для зон высокой продуктивности.

Сравнительный анализ вертикальной изменчивости протеазной активности вод, а также гидрологических и гидрохимических параметров показал, что высокой активности верхних горизонтов (0–2 м) вод соответствуют значения солёности воды 16–24.8‰ и весьма высокое содержание O_2 (10.7–26.5 мг/л или 113–292%). Начиная с горизон-

Таблица 5. Гидролитические ферментативные активности на разных горизонтах Кисло-сладкого оз. в августе 2001 г.

Горизонт, м	Протеазная активность, ф. ед/л	Амилазная активность, ν крахмала, мг/(л ч)	Скорость деструкции азоказеина ν белка, мг/(л ч)	Время оборота азоказеина в тест-системе трипсин–азаказеин $t, \text{ч}$	Скорость деструкции азоказеина, ν белка, мг/(л ч)	Время оборота азоказеина в тест-системе трипсин–азаказеин $t, \text{ч}$
0	2260	480	113	0.7	38.4	1.8
1.5	1640	520	82	0.7	41.6	1.8
3.4	660	220	33	0.7	17.6	1.9
4.4	800	240	40	0.7	19.2	1.8

та 3.4 м протеазная активность резко уменьшалась на фоне повышения солености воды (до 25.55‰), низкого содержания O_2 (<3.2 мг/л) и появления сероводородных условий, а также значительного повышения концентрации свободного CO_2 .

Максимальная величина (520 ф.ед/л) амилазной активности, ответственной за биохимические скорости деструкции полисахаридов, их комплексов и производных, также обнаружена в подповерхностном слое вод, пересыщенных O_2 .

В придонном слое с высокими концентрациями H_2S значения ферментативных активностей несколько возрастали по сравнению с таковыми в промежуточных водах.

Исследование оз. Кисло-сладкого в августе 2002 г. подтвердило наличие более высоких значений протеазной активности (до 820 ф.ед/л) в поверхностных горизонтах и минимальное значение 312 ф.ед/л на горизонте 4 м с увеличением активности у дна до 720 ф.ед/л.

В пробах воды озера на Зеленом мысу в 2002 г. не обнаружена амилазная активность, а на горизонте 3 м также и протеазная активность. В придонном слое (в анаэробных условиях) протеазная активность выше, чем в поверхностном слое (табл. 6). Этим данное озеро отличается от другого, что связано, вероятно, с более низкими в нем температурами воды.

Полученные значения для Кисло-сладкого оз. в несколько раз выше отмечавшихся ранее вели-

Таблица 6. Гидролитические ферментативные активности на разных горизонтах озера на Зеленом мысу, август 2002 г.

Горизонт, м	Протеазная активность, ф. ед/л	Скорость деструкции азоказеина ν белка, мг/(л ч)
0	214	17.1
4.6	152	12.2
5	168	13.4
6	412	40

чин протеазной активности морских вод прибрежной и открытой части Белого моря, не превышавших 320 ф.ед/л [6]. В то же время они соответствуют значениям данного параметра вод литоральных ванн Баренцева и Белого морей 1300–3260 ф.ед/л. Изучение ферментативных процессов деструкции органического вещества в морских экосистемах показывает наличие разных факторов, формирующих протеазную и амилазную активности. Из всех факторов температурные характеристики поверхностных вод Кисло-сладкого оз. в исследуемый период и ранее изученных литоральных ванн были наиболее близкими (21–22° С), а по своим абсолютным значениям – намного превышавшими таковые поверхностных вод открытых акваторий моря. Присутствие одноклеточных синезеленых водорослей в значительном количестве только в верхнем слое вод Кисло-сладкого оз. также указывает на возможную близость экологических условий верхнего слоя вод отшнуровывающихся озер и литоральных ванн Баренцева и Белого морей.

ГИДРОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГЕОЭКОСИСТЕМ ОТШНУРОВЫВАЮЩИХСЯ ОЗЕР

Расположение озер на границе моря и суши предопределяет особый подход к их изучению как к водоемам, обладающим чертами биогеосистемы, например, эстуарного или лиманного типа [17]. Их нельзя рассматривать как мелкие морские заливы в силу значительной отчлененности от Кандалакшского зал. выше среднего уровня моря барьерами. Специфические геоморфологические черты отшнуровывающихся озер – воронкообразная форма дна с впадиной и окружающими ее обширными мелководьями. Влияние суши проявляется в разном опреснении озер, быстро меняющемся во времени. Наложение данного гидрологического фактора на геоморфологические особенности озер в итоге приводит к формированию в них своеобразной гидролого-гидрохимической об-

становки. О ее уникальности свидетельствуют величины и характер распределения гидрологических и гидрохимических параметров, отличающихся от характеристик Кандалакшского зал. и ранее не отмеченных в других водоемах. Тем не менее ее отдельные черты можно найти в некоторых прибрежных водоемах, формирование которых происходит в сходных условиях. К таким водоемам (описаны в научной литературе) можно отнести оз. Могильное на о-ве Кильдин в Баренцевом море [11, 12], прибрежный водоем Устричный, находящийся между Вудс Холлом и Фалмосом, Массачусетс, США [16], а также озера, прилегающие к Черной губе на Новой Земле [8] и, вероятно, губа Долгая на Соловецких о-вах Белого моря [10].

К одной из гидрологических особенностей озер авторы относят их термохалинную структуру. Мелководность озер, маленькие размеры и водообмен (особенно значительный у озера на Зеленом мысу) с заливом должны были бы привести к выравниванию значений солености с таковыми поверхностной водной массы Кандалакшского зал., распространяющейся до глубин 10–15 м [2]. Однако в гипolimнионе озер постоянно наблюдаются более высокие значения солености воды, несмотря на опреснение эпилимниона. После временного опреснения гипolimниона Кисло-сладкого оз. 05.08.2001 г. до 21.0–21.6‰ через шесть дней 11 августа соленость воды возросла до 25–25.9‰. В эти дни соленость воды в прол. Великая Салма была ~25‰. 26.08.1994 г. в озере на Зеленом Мысу максимум солености воды 29.6‰ приближался к средней величине солености беломорской глубинной водной массы. Значения солености воды ~30‰ отмечались в Кисло-сладком оз. и в его поверхностном слое зимой 2003 г. К этому следует добавить еще одну закономерность – максимальные величины солености воды в озерах летом постоянно наблюдаются в верхней половине гипolimниона. Все эти факты говорят о том, что на промежуточных глубинах должен существовать источник, повышающий соленость воды озер в гипolimнионе и имеющий солевой состав, одинаковый с таковым в Белом море. Таким единственным источником могут быть грунтовые рассолы мелководий, образующиеся при промерзании озер зимой. Сохранение резкой соленостной стратификации в мелководных (~3 м) отделяющихся водоемах, прилегающих к Черной губе на южной оконечности Новой Земли, наверное, впервые Е.М. Крепс объяснил процессом обратного перехода солей из донных отложений в воду летом [8]. Если это так, то чем интенсивнее и дольше шел процесс образования льда, тем больше должно было получиться рассола, а возможно, и выкристаллизоваться из него солей. Чем холоднее и продолжительнее была зима и чем меньше зимой выпадало

осадков, тем интенсивнее должно было происходить осолонение озер летом (например, в озере на Зеленом мысу летом 1994 г. по сравнению с летом 2001 г.). Подтверждением этому может служить отмеченная в Кисло-сладком оз. последовательная трансформация солевого состава вод при увеличении их солености, характерная для процесса льдообразования (табл. 1).

К особенностям температурной стратификации озер относятся образующийся летом теплый промежуточный слой и сравнительно низкие температуры (по сравнению с водами Кандалакшского зал.) глубже 3.5 м в Кисло-сладком оз. и 4.5 м в озере на Зеленом мысу. Максимальная разница между температурой поверхностного и теплового промежуточного слоев достигала 6.14°C в Кисло-сладком оз. 05.08.2001 г. В озере на Зеленом мысу эта разница была намного меньше (1.3–2.5°C). Существование слоя промежуточного максимума объясняется тем, что значительный прогрев воды в озерах происходит от дна мелководий, поглощающих солнечные лучи и имеющих глубины 1.5–2.5 м в Кисло-сладком оз. и 3.0–3.2 м в озере на Зеленом мысу. Галоклин, расположенный выше указанных глубин, препятствует теплопередаче в эпилимнион. В Кисло-сладком оз. поступает относительно большой приток поверхностных вод с суши, и градиенты солености и плотности воды в нем значительно больше. Имеет значение также и глубина залегания галоклина, так как от нее зависит площадь мелководий, которую он перекрывает. За счет указанных факторов значительно ярче (при средних условиях) промежуточный максимум температуры выражен в Кисло-сладком оз. по сравнению с таковым в озере на Зеленом мысу в августе 2001 и 2002 гг. Несколько иная ситуация была в озере на Зеленом мысу 26.08.1994 г., когда в его воду поступало больше солей со дна. Галоклин и пикноклин поднимались до глубины 1.5 м, а градиенты показателей в них возрастали. Соответственно и слой температурного максимума был выражен сильнее, перепад температур между ним и эпилимнионом достигал 2.1°C. В 2002 г. при более глубоком положении галоклина градиенты солености воды в нем были еще выше, что способствовало и более значительному прогреву воды в металимнионе (рис. 2). Повышение температуры воды в соленом придонном слое наблюдалось и в упоминавшихся отделяющихся водоемах на Новой Земле, что также объяснялось прогревом ее от дна. В одном из озер глубиной 2.5 м с соленостью придонной воды 43‰ наибольшая разница между температурой поверхностной и придонной воды составила 10°C, а придонная вода прогрелась до 14°C. В это время температура воздуха была всего лишь 2°C [8].

В озерах Кисло-сладком и на Зеленом мысу слой прогретой воды находится, так же как и в озерах Новой Земли, на мелководьях, дно кото-

рых лежит ниже слоя пикноклина. Выше слоя пикноклина нет препятствий к перемешиванию придонной воды с поверхностной и ее охлаждению при контакте с атмосферой. Расположенная ниже, во впадинах, вода прогревается очень слабо в силу того, что солнечные лучи не проникают до дна. Это позволяет сохранять устойчивость вертикальной стратификации вод. Горизонтальное перемешивание вод отсутствует, так как рельеф дна изолирует находящуюся в ямах воду. Прогрев сверху за счет диффузии должен сопровождаться поступлением и солей, выделяющихся из дна. Это также сохраняет устойчивость вод. Таким образом формируются температурные профили с ярко выраженными слоями температурных максимумов над самыми глубокими впадинами озер.

Положение между сушей и морем, а также специфика гидрологических условий и геоморфологии чаши водоема определяют особенности гидрохимического режима озер. К ним в первую очередь надо отнести уникально высокие концентрации растворенного O_2 в промежуточном слое, достигавшие в Кисло-сладком оз. на некоторых станциях 26–28 мг/л (до 280–300%). Плотный покров нитчатых водорослей (при отсутствии большого количества фитопланктона) определенно указывал на то, что столь высокие концентрации O_2 связаны с их бурным ростом. Цветение водорослей, насколько активным оно ни было бы, не может привести к столь высоким концентрациям O_2 в воде. Последние были вызваны также скачком плотности воды, препятствовавшим перемешиванию вод с вышележащими, находящимися в контакте с атмосферой. Поэтому концентрации O_2 в эпилимнионе были типичными для “цветущего” водоема (110–120% насыщения). Таким образом, для достижения экстремально высоких концентраций O_2 в воде необходимо как минимум наличие в водоеме обширных мелководий, перекрываемых сверху галоклином, достаточно резким, чтобы обеспечить вертикальную устойчивость при прогреве вод под ним. Описанные процессы, вероятно, могут быть одной из причин развития промежуточного температурного и кислородного максимумов в оз. Могильном, хотя до сих пор при характеристике водоема они не рассматривались [11, 12].

Другая особенность исследуемых озер – анаэробные условия в небольших центральных впадинах, которые складываются в результате разложения отмерших нитчатых водорослей, скапливающихся в ямах. По объему их здесь гораздо меньше, чем плавающих на поверхности озер. Однако сами впадины невелики, поэтому имеет место весьма высокая концентрация разлагающейся органики. Переход от аэробного слоя со сверхвысокими концентрациями O_2 к анаэробному происходит в тонком слое. Вертикальный градиент уменьшения содержания O_2 в Кисло-сладком оз. 05.08.2001 г. до-

стигал 30 мг/(л м). Для сравнения в резко стратифицированном оз. Могильном максимальный градиент $O_2 \sim 5.5\text{--}5.7$ мг/л м [11, 12]. В Устричном озере (мелководное и имеющее сходное с беломорскими озерами строение дна) в двух воронкообразных понижениях северного и южного плесов также создаются анаэробные условия. При этом градиент концентрации O_2 в этом озере в южном понижении, в котором анаэробные условия постоянны, достигает еще больших величин, чем в оз. Кисло-сладком [16]. Однако большая разница между этими озерами состоит в том, что в беломорских озерах падение концентрации O_2 не сопряжено со значительным градиентом плотности воды, а в озерах Могильном и Устричном они совмещены с галоклином, возникающим между нижними морскими и верхними почти пресными водами.

Таким образом, на примере озер Кисло-сладкого и на Зеленом мысу видно, что выделенный ранее геоморфологический фактор развития анаэробных условий [14] может проявляться в качестве ведущего не только в глубоководных впадинах (подобных Кариако), но и мелководных озерах.

Еще одной особенностью рассматриваемых озер можно считать то, что при относительно небольшом анаэробном слое в ямах концентрация H_2S в последних может достигать весьма высоких величин, близких к наблюдавшимся в оз. Могильном [12], и превышает таковые в Черном море в несколько раз. Высокие концентрации H_2S свидетельствуют об интенсивном процессе сульфатредукции в анаэробных слоях озер.

Вертикальное положение границы анаэробного слоя определяется преимущественно интенсивностью фотосинтеза. Этим, вероятно, объясняется то, что в 1994 г. в озере на Зеленом мысу граница с анаэробным слоем располагалась на глубине 5 м, а в Кисло-сладком оз. она поднималась как минимум до 2 м, т.е. до скачка плотности воды. При ледоставе анаэробные условия в Кисло-сладком оз. складываются во всем столбе воды, что было зафиксировано при отборе проб в феврале 2003 и 2004 гг. Постоянными зимними заморами, а также слабым водообменом (по сравнению с озером на Зеленом мысу) с открытыми водами Кандалакшского зал. объясняется его бедность зоопланктоном.

Подъему анаэробной зоны оз. Кисло-сладкого при ослаблении фотосинтеза растений должно способствовать расположение границы между насыщенной O_2 водой эпилимниона и донными отложениями с восстановительными условиями у самой поверхности осадков мелководий. Подтверждением этому служат данные Г.А. Дубининой, полученные в июле 2000 г. На мелководье озера (0.7 м) при концентрации O_2 на поверхности воды 6.8, в придонном слое ~ 8.5 мг/л, в поверхно-

стном слое илистых осадков наблюдались восстановительные условия, а скорость сульфатредукции составляла 3.7 мг S/(кг сут). Эта величина примерно в 5 раз больше максимальных оценок таковой в верхнем 15-сантиметровом слое глубоководных осадков Черного моря [9]. В этой же пробе донных отложений оз. Кисло-сладкого найдены и тионовые (сероокисляющие) бактерии в количестве 100–1000 кл./мл осадка.

Следует отметить весьма высокие концентрации восстановленной S в прибрежных водоемах на фоне их крайне низких концентраций в открытых акваториях Белого моря [4].

Из гидрохимических параметров обращает на себя внимание не характерное для беломорских вод высокое содержание в воде соединений N. Наиболее повышены концентрации NH_4^+ , что объясняется существованием анаэробной зоны, имеющей контакт с вышележащей аэробной зоной. Для вод Белого моря давно была зафиксирована тенденция роста концентрации $N_{\text{общ}}$, имеет место трансформация соотношения форм N в сторону повышения концентрации NH_4^+ . Полученные концентрации NH_4^+ следует считать близкими к характерным для прибрежных вод. Как уже отмечалось, в озерах по сравнению с беломорскими водами присутствуют в гораздо более высоких концентрациях все формы N. Это может быть связано с выносом его с суши, а также с общим загрязнением прибрежных вод Кандалакшского зал., ярко выраженная тенденция которого отмечалась еще в 1980-х гг. [2].

ВЫВОДЫ

Исследования отшнуровывающихся мелководных озер литоральной зоны Кандалакшского зал. показали уникальность гидролого-гидрохимического режима, формирующегося в них на определенном этапе эволюции. Рельеф дна (наличие впадин и обширных мелководий), затрудненный водообмен с морем, опресняющее влияние вод суши служат причиной возникновения в озерах летом экстремальных значений гидрологических и гидрохимических параметров. К ним относятся высокая температура воды подповерхностного слоя и низкая температура в придонном слое впадин, не характерные для поверхностной структуры беломорских вод. Резкий галоклина, а также интенсивный фотосинтез в связи с активным развитием нитчатых водорослей в слое повышенных температур определяют экстремально высокие (>200%) концентрации O_2 в металимнионе и верхней части гиполимниона. Плохое перемешивание вод во впадинах и разложение скапливающейся в них органики приводят к резкой смене по вертикали окислительной обстановки на восстанови-

тельную. В придонных водах развивается интенсивный процесс сульфатредукции, обеспечивающий экстремально высокие концентрации H_2S (>90 мг/л). При этом между кислородной и сероводородной зонами, в отличие от большинства других водоемов, нет резких градиентов плотности воды.

Это позволяет аэробной зоне обогащаться NH_4^+ , CO_2 и некоторыми другими биогенными веществами. В годы, когда условия для фотосинтеза не столь благоприятны, граница сероводородной зоны поднимается до галоклина, что наблюдалось в 1994 г. Зимой во время ледостава, по исследованиям Кисло-сладкого оз., восстановительная обстановка характерна для всей толщи вод.

Регулярные заморы приводят к тому, что в озерах нет специфических для солоноватых вод видов фито- и зоопланктона. По-видимому, отсутствуют и постоянные представители ихтиофауны. В связи с более интенсивным водообменом с открытыми морскими акваториями озера на Зеленом мысу численность и биомасса зоопланктона в нем на порядок превосходят таковые в Кисло-сладком оз. и соответствуют таковым в изолированных губах других частей моря. Для Кисло-сладкого оз. в слое повышенных температур отмечены экстремально высокие значения протеазной активности, превышающие в несколько раз ее величины в открытых акваториях моря и соответствующие таковым в литоральных ваннах Баренцева и Белого морей. Вероятно, сходными чертами экосистем могут обладать и другие озера литорали Белого моря, чьи берега испытывают поднятие.

Авторы выражают благодарность директору Беломорской биологической станции МГУ Г.Г. Новикову, ее администрации и сотрудникам, предоставившим возможность проведения полевых исследований и оказывавшим содействие в работе, а также Г.С. Шилькрот, Т.А. Востоковой и С.Н. Голубчикову (ИГРАН), А.В. Дубинину и Т.Н. Ратьковой (ИО РАН), Г.А. Дубининой (Институт микробиологии РАН), Е.П. Матафонову (ФУП "Геоцентр Москва"), К.В. Батрак и Ю.Н. Мосейкиной (МГУ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков И.И., Дирссен Д., Розанов А.Г. Проблема щелочности вод и анаэробная минерализация органического вещества в Черном море // Геохимия. 1998. № 1. С. 78–87.
2. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Л.: Гидрометеоздат. 1991. Т. 2. Вып. 2. 195 с.
3. Гордеев В.В., Демина Л.Л. Тяжелые металлы в шельфовой зоне морей России // Геоэкология шельфа и берегов морей России. М.: Ноосфера, 2001. С. 328–359.
4. Кокрятская Н.М. Соединения серы в воде и донных осадках Белого моря и устья Северной Двины.

- Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М.: ИО РАН, 2004. 24 с.
5. Корж В.Д. Геохимия элементного состава гидросферы. М.: Наука, 1991. 244 с.
 6. Корнеева Г.А. Современные эколого-биохимические исследования в морях Баренц-региона // Экологические системы и приборы. 2000. № 9. С. 40–46.
 7. Корнеева Г.А., Тропин И.В., Романкевич Е.А. Процессы ферментативного гидролиза органических макромолекул в воде различной солености и их взаимосвязь с физиологически важными и токсичными металлами на литорали Баренцева моря // Океанология. 1997. Т. 37. № 2. С. 226–237.
 8. Крекс Е.М. Гидрологический очерк Черной губы на Новой Земле и реликтовых озер, к ней примыкающих // Исследования морей СССР. Л.: ГГИ, 1927. Вып. 5. С. 10–80.
 9. Лейн А., Иванов М.В. Продукция сероводорода в Черном море // Микробиология. 1990. Т. 59. № 5. С. 921–928.
 10. Нинбург Е.А. Долгая губа: изоляция естественная и искусственная // Природа. 1990. № 7. С. 44–49.
 11. Реликтовое озеро Могильное. Л.: Наука, 1975. 299 с.
 12. Сапожников В.В., Аржанова Н.В., Титов О.В. и др. Гидрохимические и микробиологические особенности оз. Могильного // Вод. ресурсы. 2001. Т. 28. № 1. С. 58–66.
 13. Цыцарин А.Г., Скороход А.И., Лисицына Л.В. Вертикальное распределение основных солеобразующих компонентов во льдах Аральского и Каспийского морей // Вод. ресурсы. 1998. Т. 25. № 6. С. 671–677.
 14. Шапоренко С.И. Анаэробный слой гидросферы: концепция выделения и закономерности существования // Изв. РАН. Сер. географ. 2000. № 4. С. 19–28.
 15. Шевченко Н.В. Особенности геоморфологического строения фиардовых берегов приливных морей на примере Кандалакшского залива Белого моря. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1999. 18 с.
 16. Emery K.O. A Coastal Pond, Studied by Oceanographic Methods. N. Y.: American Elsevier Publishing Company Inc, 1969. 78 p.
 17. Pantiulin A.N. The White Sea as a Hierarchical Estuarine System // Joint Assemblies of the International Association for the Physical Sciences of the Oceans and International Association for Biological Oceanography. Mar del Plata, 2001. 63 p.
 18. Pertzova N.M., Kosobokova K.N. Zooplankton of the White Sea // Ber. Polarforsch. 2000. № 359. P. 30–41.