

ИСТОРИЯ БЕЛОГО МОРЯ В ПАЛЕОАРХИВАХ ОЗЕР И БОЛОТ ЕГО ПОБЕРЕЖЬЯ

УДК 574.5:556

РЕЛИКТОВЫЙ ВОДОЕМ В ПОРЬЕЙ ГУБЕ (БЕЛОЕ МОРЕ, КАНДАЛАКШСКИЙ ЗАЛИВ): ЧТО ИЗМЕНИЛОСЬ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 90 ЛЕТ?

© 2022 г. Е. Д. Краснова^а, *, Д. А. Воронов^б, Н. Л. Фролова^с, А. Н. Василенко^с, В. А. Ефимов^с,
Л. Е. Ефимова^с, Н. М. Кокрятская^д, Г. Н. Лосюк^д, С. В. Пацаева^е

^аБеломорская биологическая станция Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова,
пос. Приморский, Россия

^бИнститут проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, Москва, Россия

^сМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

^дФедеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова УрО РАН,
Архангельск, Россия

^еМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

*e-mail: e_d_krasnova@mail.ru

Поступила в редакцию 08.02.2022 г.

После доработки 31.07.2022 г.

Принята к публикации 18.08.2022 г.

При регрессии моря прибрежные морские участки могут оказываться в изоляции от моря, в результате чего их водная экосистема полностью трансформируется. Изучение последствий естественной изоляции важно для прогнозирования состояния водоемов в будущем, а также при проектировании искусственных сооружений, отчленяющих части морских акваторий. В 1930-х годах научной группой с Беломорской методической станции Государственного гидрологического института (ГГИ) был подробно изучен реликтовый водоем в восточной части Порьей губы под местным названием “Озерки”. Это лагуна, состоящая из трех ковшей, один из которых сообщается с морем во время прилива, второй связан с первым через мелководный пролив и последний, кутовой, сообщается со средним. Целью данной работы была регистрация изменений в экосистеме лагуны за прошедшие почти 90 лет. Выяснилось, что из-за продолжающегося послеледникового подъема берега пороги, отделяющие Озерки от моря, обмелели. С помощью логгеров — датчиков давления установлено, что теперь прилив в лагуне начинается при уровне моря на 20–30 см выше, чем в 1930-х годах. В результате ослабления водообмена с морем в дальнем плесе сложилась устойчивая вертикальная стратификация, указывающая на возможную меромиксию, появилась аноксийная зона с высоким содержанием сероводорода, которая занимает треть глубины водоема; в придонной зоне на два порядка возросла концентрация минерального фосфора. В плесах лагуны по мере отдаления от моря прослеживается увеличение суммарной численности зоопланктона, появляется дополнительная экологическая ниша — хемоклин, в котором на ранних стадиях изоляции доминируют морские коловратки, а после формирования постоянной сероводородной зоны — личинки полихет из отряда Spionidae.

Ключевые слова: морские лагуны, подъем берега, прогрессирующая изоляция, столетний тренд, стратификация, аноксия, зоопланктон, Белое море

DOI: 10.31857/S2587556622060061

ВВЕДЕНИЕ

На побережье Белого моря в ходе постгляциального поднятия берега образовалось множество водоемов, в разной степени изолированных от моря. Их можно рассматривать как временной ряд для изучения экологической сукцессии, при которой морская экосистема сменяется пресноводной, проходя через стадию меромиктического водоема с сульфидной аноксией. Однако для верификации такой реконструкции, а также для

оценки скорости этого процесса были бы полезны прямые наблюдения за трансформацией экосистемы. Поскольку берег продолжает подниматься со скоростью более 30 см за столетие (Романенко, Шилова, 2012), изменения в экосистеме могут быть заметны на протяжении жизни исследователя либо разными исследователями в рамках преемственности научной темы. В последние два десятилетия комплексные исследования прибрежных меромиктических водоемов морского происхождения развернуты на базе Беломорской

биологической станции МГУ имени М.В. Ломоносова (Краснова и др., 2016; Мардашова и др., 2020; Шапоренко, 2003). Их выявлено уже более двух десятков. Нужна лишь отправная точка — данные о состоянии какого-либо отделяющегося от моря водоема в прошлом.

В 1930-х годах изучение реликтовых водоемов на побережье Белого моря было одним из основных направлений работы Беломорской методической станции Государственного гидрологического института, располагавшейся в пос. Лесной, позднее объединенном с пос. Умба (Мурманская область, Терский район). Одним из организаторов умбской станции был океанолог Константин Михайлович Дерюгин, хорошо знакомый с реликтовым оз. Могильное в Баренцевом море (Дерюгин, 1925). В 1920-е годы отделяющиеся от моря лагуны на Новой Земле и морском шельфе исследовал Е.М. Крепс (1927). Поиск аналогичных водоемов на побережье Белого моря стал задачей молодого сотрудника умбской станции выпускника Ленинградского университета Георгия Семеновича Гурвича. Его группа исследовала множество губ на побережье Кандалакшского залива (Дерюгин, 1935) и нашла один подходящий водоем. В статье с результатами их исследований, выполненных в 1932–1934 гг., подробно описана лагуна, частично изолированная от Белого моря, состоящая из трех ковшей (Гурвич, Соколова, 1939). Начерчен профиль дна, описан гидрологический режим, приведены данные трех лет гидрологических наблюдений, результаты гидрохимических анализов, список видов бентоса. Если повторить эти исследования, то можно узнать, что изменилось за без малого 90 лет. За это время берег должен был подняться на несколько десятков сантиметров, что должно привести к усилению изоляции лагуны от моря, к изменениям в гидрологической системе, а, следовательно, и в составе и распределении живых организмов.

Мы установили, что описанный реликтовый водоем — это лагунная система с местным названием “Озерки” в восточной части Порьей губы (Белое море, Кандалакшский залив) рядом с кордоном “Восточная Порья губа” Кандалакшского государственного природного заповедника на о. Горелый (рис. 1) (Краснова, 2020; Краснова и др., 2020). В 2019–2021 гг. был выполнен комплекс исследований, целью которых было выявление изменений в гидрологической системе данного водоема, оценка скорости поднятия берега и регистрация некоторых особенностей биоты водоема.

ОПИСАНИЕ ВОДОЕМА

Исследуемый водный объект (66°46′ с.ш.; 33°46′ в.д.) представляет собой остаток пролива между островом Горелый и материком, который в

результате поднятия берега превратился в лагуну, соединенную с морем двумя порогами и состоящую из трех плесов, разделенных отмелями (рис. 2). На берегу дальнего от моря (кутового) плеса (I), расположено заброшенное поморское село Порья губа, которое было ликвидировано в 1965 г. как “неперспективное”. С ним сообщается средний плес (II), отделенный узким мелководным проливом от ближнего к морю плеса (III), который сообщается с морем во время прилива. Площадь I плеса 18.9 га, II плеса — 6.9 га, III плеса — 5.3 га. В кутовую часть I плеса впадает р. Порья и небольшой ручей. В статье Г.С. Гурвича и Е.В. Соколовой (1939), изучавших водоем в 1930-х годах, очень выразительно описан порог, через который водоем сообщается с морем: “Глубина на пороге во время отлива не превышает 75 см. В отлив проток представляется настоящим порогом с заметным на глаз падением и стремительным, бурным течением, против которого лодка может быть поднята только бечевой, да и то с трудом. В прилив течение значительно слабее, но выгresti против него на карбасе все же невозможно. В настоящее время порог обмелел, водообмен через него стал меньше, так же, как и скорость течения. Входу на лодке теперь препятствует не течение, а многочисленные валуны и камни, преграждающие путь, а во время отлива — недостаточная высота воды”.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Полевые исследования выполнены в начале августа 2019, 2020 и 2021 гг. Сделана батиметрическая съемка с использованием эхолота Lowrance Elite 7 Ti2, построена карта глубин. В каждом плесе в самой глубокой точке ежегодно выполняли гидрологическое зондирование и отбор проб. Температуру, соленость и величину редокс-потенциала определяли зондом YSI PRO 30 (YSI, USA), концентрацию растворенного кислорода — зондом ProODO Optical Dissolved Oxygen Instrument (YSI, USA), освещенность измеряли люксметром AR813A (SMARTSENSOR, China), модифицированным для погружения под воду, pH определяли с помощью портативного прибора Waterliner pH-meter (Taiwan). Пробы воды отбирали с помощью погружного насоса GP1352 (Wale Marine, USA) с калиброванным кабелем. Все работы осуществлялись с плавсредств таким образом, чтобы не нарушать природную стратификацию изучаемых водоемов.

Для гидрохимических анализов и для изучения вертикального распределения зоопланктона пробы отбирали в 2020 и 2021 гг. в тех же точках. Также были отобраны пробы морской воды в середине залива у входа в лагуну Озерки. В 2020 г. пробы для анализа биогенных элементов консервировали хлороформом, в 2021 г. содержание фосфатов, аммонийного азота и кремния определяли

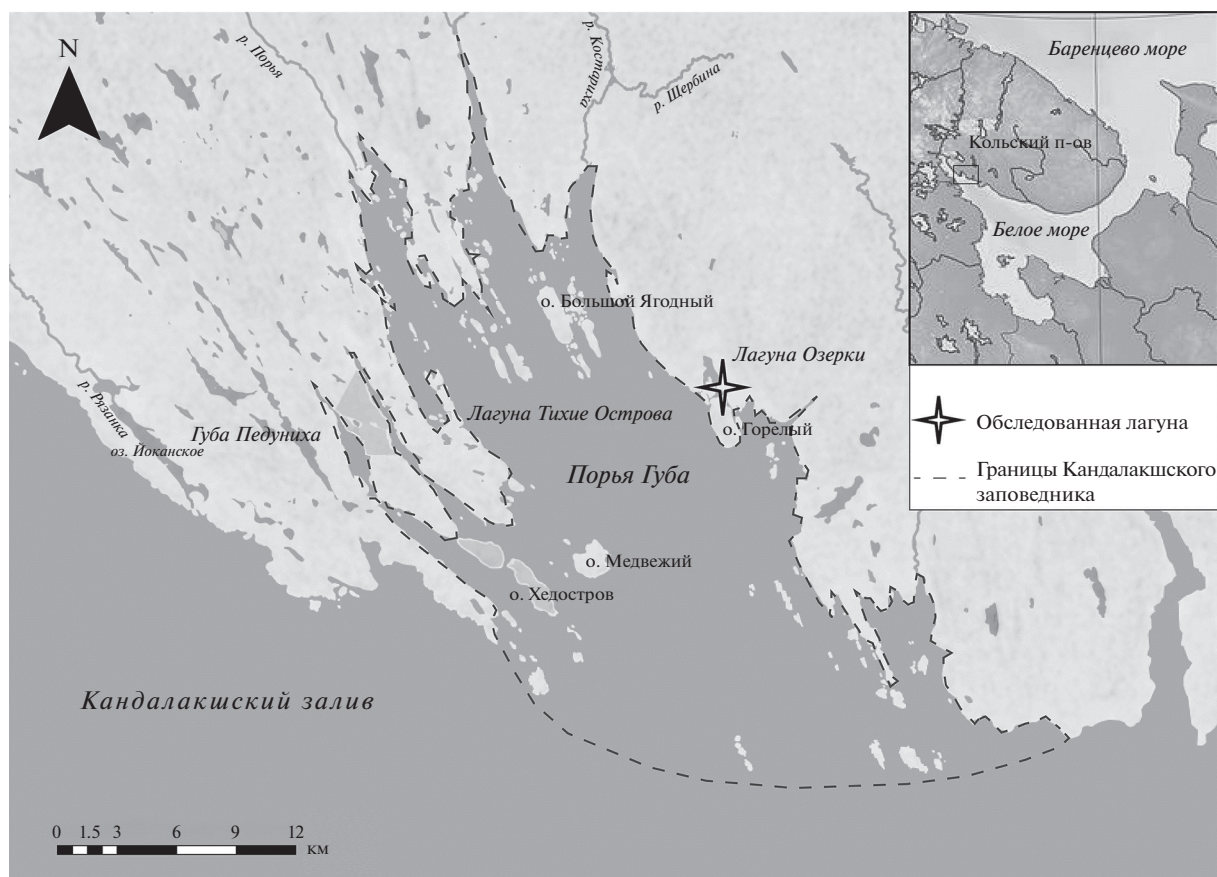


Рис. 1. Географическое положение лагуны Озерки в восточной части Порьей губы.



Рис. 2. Лагуна Озерки в восточной части Порьей губы.

I — дальний от моря плес (кутовой), II — средний плес, III — плес, сообщающийся с морем во время прилива.

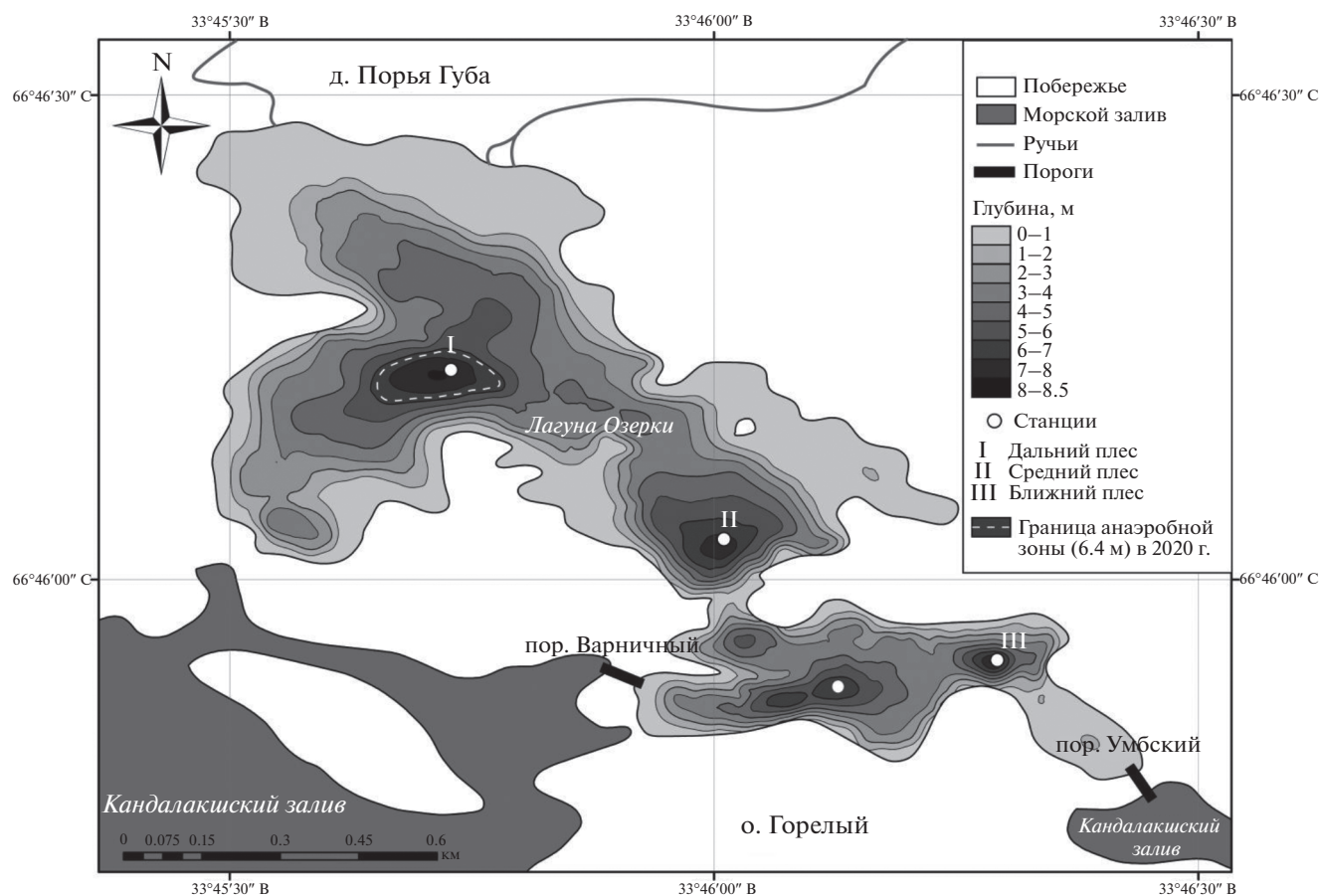


Рис. 3. Батиметрическая карта лагуны Озерки в восточной части Порьей губы.

в полевых условиях. Содержание биогенных элементов определяли колориметрическим методом: фосфатов — с молибдатом аммония и аскорбиновой кислотой (модифицированный метод Морфи и Райли), аммонийного азота — по реакции с фенолом и гипохлоритом (метод Сэджи-Солорзано), силикатов — в виде молибденовой сини после восстановления кремнемолибдата аскорбиновой кислотой в кислой среде, относительная ошибка метода $\pm 4\%$ (Руководство ..., 2003). Для фиксации сероводорода (H_2S) использовали растворы ацетата цинка и ацетата кадмия при использовании фотометрического и йодометрического методов определения соответственно.

Для оценки состава фототрофных микроорганизмов и растворенных гуминовых веществ в пробах воды из поверхностного и придонного слоев воды в I плесе были измерены спектры поглощения света на спектрофотометре Solar PB 2201 в кювете с длиной оптического пути 1 см и спектры испускания и возбуждения флуоресценции на спектрофлуориметре Solar SM2203.

Зоопланктон исследовали в пробах объемом 1.5–2.0 л, отобранных на разной глубине с помо-

щью погружного насоса. Сразу после отбора пробы фильтровали через газ с ячейей 18 мкм с помощью вакуумного насоса, организмы с фильтра смывали в камеру Богорова и подсчитывали под бинокляром.

В III плесе и в море возле кордона заповедника проведена регистрация колебаний уровня воды с помощью логгеров Solinst 3001 Levellogger Edge с интервалом 30 минут. Для учета изменения атмосферного давления третий логгер был установлен в помещении на кордоне.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Батиметрия

В ходе батиметрической съемки было определено, что наибольшая глубина 8.5 м находится в плесе I, в плесе II максимум глубины — 7.7 м, в плесе III — два углубления 8.2 и 7.8 м, разделенные повышением донного рельефа с глубиной 3 м (рис. 3). Профиль дна и размеры плесов отвечают описанию реликтового водоема, исследованного в 1930-х годах (Гурвич, Соколова, 1939).

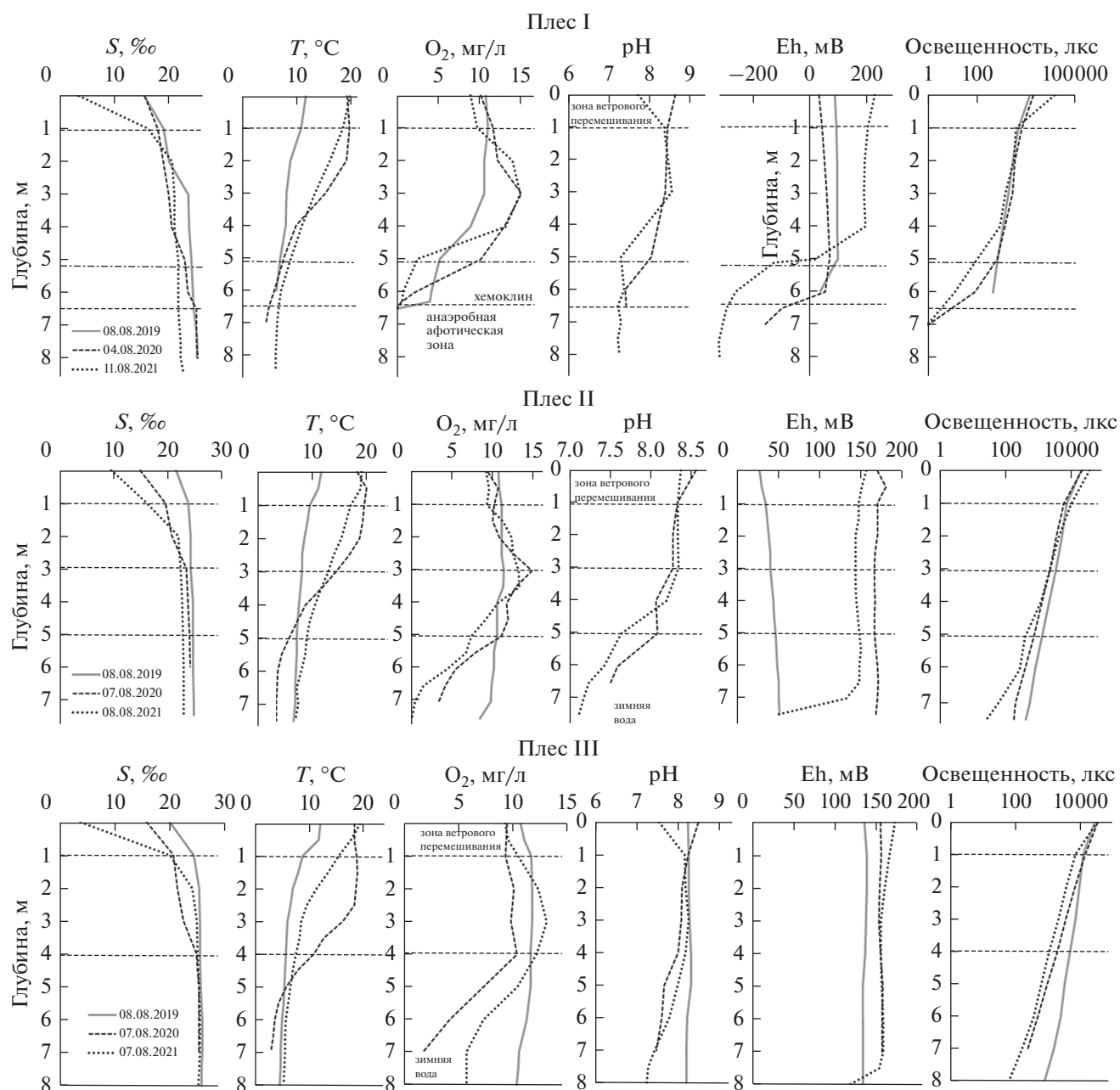


Рис. 4. Вертикальные профили гидрологических параметров в лагуне Озерки в августе 2019–2021 гг.

Гидрология

Во всех трех плесах обнаружена вертикальная стратификация. Судя по вертикальным профилям основных гидрологических характеристик (рис. 4), поверхностный слой, подверженный ветровому перемешиванию и опреснению, во всех плесах имеет толщину менее 1 м. По направлению вниз температура постепенно уменьшается, соленость увеличивается. Концентрация кислорода в поверхностном слое соответствует 100% насыщения, ниже — сначала нарастает, на горизонте около 3 м достигает максимума с превыше-

нием концентрации насыщения вплоть до 150%, а далее с глубиной убывает. В плесе III минимальное содержание растворенного кислорода, зарегистрированное в придонном слое воды, было 1.8 мг/л (соответствует слабой гипоксии), в плесе II — 0.2 мг/л (глубокая гипоксия). В плесе I начиная с горизонта 6.5 м находится сульфидная аноксийная зона.

Судя по термохалинным характеристикам придонной воды: низкой температуре (в плесе I — 2.9°–5.3°C; в плесе II — 2.7°–6.9°C, в плесе III — 4.4°–6.1°C) и солености, на 2 единицы превыша-

ющей соленость на соседней морской акватории, нижняя часть лагунных ковшей заполнена водой, поступившей туда в зимнее время: зимой в Белом море соленость воды повышается. Придонная вода в плесе I, по всей вероятности, не обновляется, либо это происходит не каждый год.

Три плеса лагуны Озерки можно рассматривать как разные стадии изоляции. III плес, соединяющийся с морем, находится на самой ранней стадии, во II плесе усиление стратификации проявляется в более контрастных физико-химических градиентах и придонном дефиците кислорода. Во II и III плесах стратификация, возможно, имеет сезонный характер. В наиболее изолированном I плесе гидрологическая структура аналогична таковой в известных прибрежных меромиктических водоемах, возникших путем изоляции от Белого моря (Краснова и др., 2016; Краснова, 2021), где есть слой ветрового перемешивания с пониженной соленостью, под ним более соленый слой с аэробными условиями, ниже хемоклин и еще ниже придонная анаэробная зона. Положение хемоклина в разные годы менялось: в 2020 г. он располагался под горизонтом 6.5 м, в 2022 г. — между 5.1 и 5.2 м. Это, возможно, новый прибрежный меромиктический водоем на беломорском побережье, который не был учтен в предыдущей инвентаризации (Краснова, 2021). На границе аэробных и анаэробных условий в нем мы обнаружили прослойку воды розоватого цвета с пурпурными серными бактериями. Окрашенный слой с аноксигенными фототрофными бактериями, которые используют при фотосинтезе сероводород, также характерен для водоемов с устойчивой меромиксией (Krasnova et al., 2018).

Уровенный режим

Логгер, установленный в море, показал, что в районе Порьей губы наблюдаются полусуточные приливные колебания амплитудой около 1.6–1.7 м. Продолжительность прилива примерно на час меньше продолжительности отлива. В плесе III амплитуда колебаний составляет от 4 до 12 см, наступление полных вод запаздывает относительно моря примерно на час, а малых вод — на 3–3.5 ч; продолжительность прилива меньше продолжительности отлива примерно в три–четыре раза (рис. 5). Амплитуда вечернего прилива в губе вдвое ниже амплитуды утреннего прилива. На спаде приливного цикла наблюдалось понижение максимальных уровней колебаний в лагуне примерно на 5 см за цикл.

Температура морской воды по данным наблюдений на морском логгере изменялась от 16.7 до 19°C, поскольку на разных фазах прилива он оказывался на разной глубине. За один приливный цикл температура воды в море менялась в пределах 1.5°C. Значения температуры во время пол-

ной воды в период наблюдений были практически неизменными.

В лагуне наблюдались колебания температуры воды в пределах 2.5–3.5°C, причем пики колебаний температуры в лагуне отставали от таковых в море на 3–3.5 ч. При этом, если в море наблюдается соответствие времени максимальных уровней и минимальных температур (и наоборот), то в лагуне экстремумы температур наступают на 2–2.5 ч позже обратных им экстремумов уровня воды. Для температуры воды в лагуне характерна обычная внутрисуточная изменчивость, связанная с процессами нагревания и охлаждения в течение суток и незначительным влиянием приливов.

Гидрохимия

Выполненные исследования показали присутствие сероводорода в воде всех трех плесов. Сероводород обнаружен в придонных водах. Во II и III плесах максимальное количество сероводорода в придонном слое 0.03–0.07 мг/л (табл. 1). Сероводородное заражение свидетельствует о застойных явлениях, так же как и увеличение содержания минерального фосфора в придонных горизонтах.

Во II плесе анаэробные процессы выражены более отчетливо: в его придонных водах содержание всех определяемых биогенных элементов было существенно больше (см. табл. 1). Сильнее всего стагнация выражена в I плесе, в придонных водах которого отмечен самый высокий уровень содержания сероводорода (16.5 мг/л), фосфатов, кремния и нитритов. Образование нитритов происходит в результате окисления солей аммония, поэтому повышенные их концентрации приурочены к местам значительного скопления отмерших организмов. В кислородных водах нитриты окисляются до нитратов, тогда как при дефиците кислорода они восстанавливаются до аммония. В морской воде концентрация нитритов обычно невелика, составляет доли или единицы мкг/л и лишь в редких случаях превышает 15–20 мкг/л. В районах интенсивного перемешивания водных масс нитриты, как правило, отсутствуют.

Поверхностные воды всех четырех станций близки между собой по содержанию биогенных элементов. В целом содержание биогенных элементов в них несколько выше, чем в морских водах (см. табл. 1). Повышенное содержание кремния в поверхностных водах лагуны представляет закономерным, поскольку туда поступает сток с суши, который служит основным поставщиком кремния в море.

По общему содержанию фосфора морская вода в губе Порьей и поверхностные воды лагуны характеризуются как олиготрофные, пресные водотоки и придонная вода в III плесе — как мезотрофные, а вода в придонном слое I плеса — как

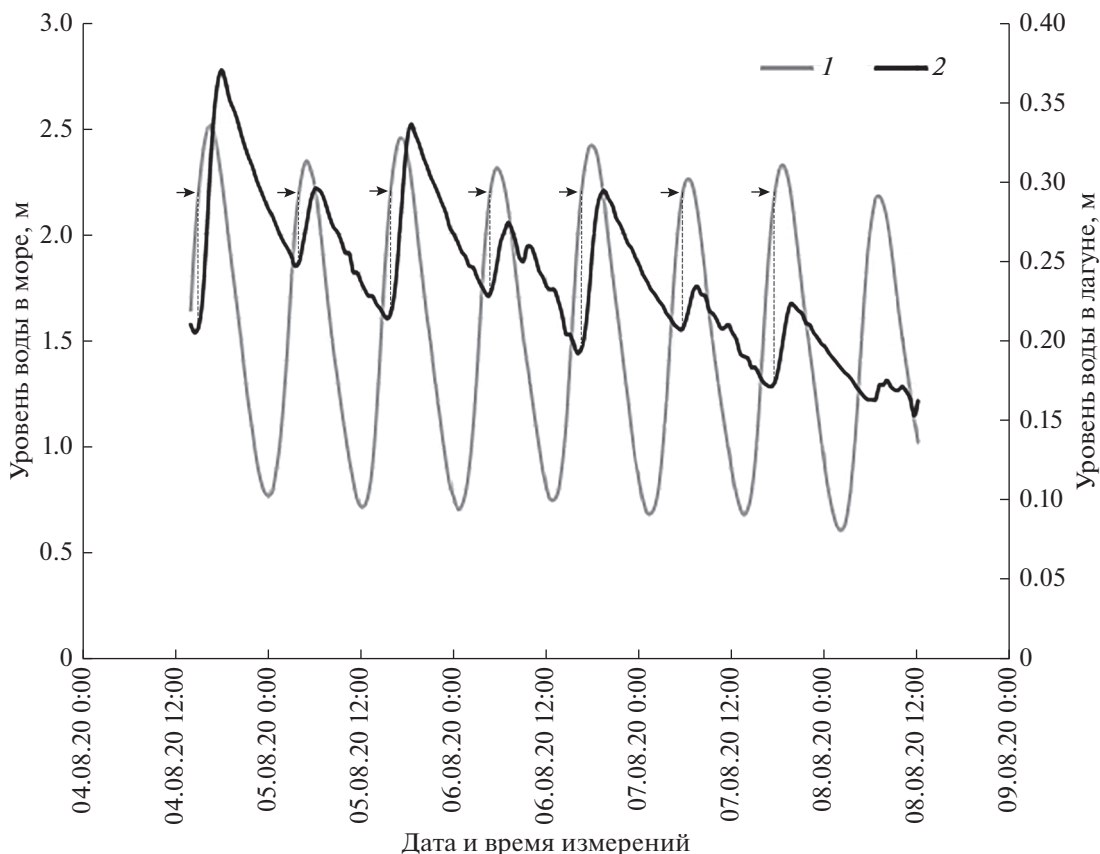


Рис. 5. Колебания уровня воды в море (1) и в III плесе лагуны (2) с 4 по 8 августа 2020 г. Стрелки указывают на начало подъема уровня воды в лагуне.

гиперэвтрофная в соответствии с классификацией Карлсона (Carlson, 1977).

Высокая концентрация сероводорода, фосфатов и кремния в придонной зоне I плеса в 2020 и 2021 гг. (табл. 2 и 3) указывает на устойчивость стратификации, не нарушаемой в течение года.

Оптические свойства

В спектрах оптической плотности для воды из I плеса Порьей губы в 2020 г. оптические плотности быстро убывают с ростом длины волны. Наибольшее поглощение света наблюдается для коротковолнового УФ света, что типично для гуминовых веществ природной воды.

На разной глубине оптическая плотность воды различалась. Наибольшая оптическая плотность во всем диапазоне длин волн характерна для зоны хемоклина (6.4 м). По всем окрашенным компонентам растворенного и взвешенного органического вещества вода на границе аэробной и анаэробной зон более концентрированная, по сравнению с водой из аэробной зоны.

В спектре флуоресценции пробы с горизонта 6.4 м при возбуждении светом с длиной волны

270–280 нм отмечена флуоресценция белков (в диапазоне 300–350 нм), что говорит о присутствии большого количества микроорганизмов. При микроскопировании в этом слое обнаружены пурпурные серные бактерии.

По положению максимума испускания флуоресценции как функции длины волны возбуждения и по квантовому выходу флуоресценции спектральные характеристики растворенных органических веществ на горизонтах 1 и 6.4 м очень близки. Эти характеристики отражают состав гуминовых веществ, которые имеют по всему столбу воды одинаковую природу.

Зоопланктон

В поверхностных водах лагуны Озерки зоопланктон представлен преимущественно ракообразными. Наиболее многочисленны были Соперода, включая копеподитные стадии и науплии, встречены два вида морских Cladocera (*Evadne nordmanni* и *Podon leucartii*), и единичные Ostracoda. Единично встречались личинки донных беспозвоночных (велигеры брюхоногих моллюсков, трохофоры нескольких видов многощетинковых

Таблица 1. Гидрохимические характеристики вод в лагуне Озерки в августе 2021 г.

Место отбора	Н, м	H ₂ S, мг/л	Биогенные элементы, мкг/л		
			P-PO ₄	Si	N-NO ₂
Плес III, кутовой (яма возле Умбского порога)	0.5	0	7.11	1536	3.54
	2.0	0	—	—	—
	3.0		24.04	319	2.29
	5.0	0	16.98	596	2.43
	7.0	0.01	—	—	—
	8.0	0.03	59.03	919	3.82
Плес III (яма возле Варничного порога)	0.5	0	5.97	1401	2.53
	1.5	0	—	—	—
	3.0	0	—	—	—
	3.5	—	20.66	741	1.64
	5.0	0.01	—	—	—
	6.0	0.03	64.95	1426	6.66
Плес II (средний)	6.2	0.07	—	—	—
	0.5	—	7.52	1621	2.64
	2.0	—	—	—	—
	3.5	—	23.37	738	2.72
	5.0	0.01	—	—	—
	6.5	0.01	—	—	—
Плес I (дальний от моря)	7.5	0.03	363.68	2611	6.68
	0.5	0	3.59	1210	1.58
	3.0	0.01	10.26	647	1.59
	5.0	0.26	—	—	—
	5.1	0.46	—	—	—
	5.2	2.30	—	—	—
	5.5	8.31	—	—	—
	6.0	10.59	565.40	6331	22.56
	6.5	12.89	—	—	—
	7.0	14.55	710.40	6491	35.34
р. Порья Ручей, впадающий в III плес Море (2020–2021 гг.) Поверхностные воды Кандалакшского залива 2012 г.*	7.5	13.94	—	—	—
	8.0	16.45	705.40	6506	18.72
	0.5	—	11	1025	—
	0.5	—	4	576	—
	0.5	—	0.39– 2.0	142– 690	0.14
	—	—	2.69–4.61	237–302	0–4.12

Примечание: * по данным (Комплексная ..., 2021).

червей и цифонаутесы мшанок). В зоне хемоклина в большом количестве были обнаружены нектохеты многощетинковых червей из отр. Spionidae и морские коловратки *Synchaeta* (предположительно *S. balthica*, но возможно и еще несколько морских видов), а также разнообразные инфузории (в том числе Tintinnidae). Присутствовали гидроидные

медузы, но используемый нами метод отбора проб их не улавливает.

В каждом из плесов характер вертикального распределения зоопланктона в 2020 и 2021 гг. был сходным. В плесе III возле Умбского порога, где кислородом обеспечена вся толща воды, зоопланктон встречался на всех горизонтах. Больше

всего его численность была возле дна, особенно *Copepoda* (рис. 6). В плесе II, где нижний метр водной толщи характеризовался гипоксией, копеподы тяготели к нижней части аэробной зоны. На границе гипоксической зоны отмечены скопления личинок полихет *Spionidae* и коловраток *Synchaeta*, причем коловратки были особенно многочисленными. В других стратифицированных водоемах они обитают в зоне хемоклина (Краснова, Воронов, 2022). В I плесе над границей сероводородной зоны найдено скопление личинок полихет из отр. *Spionidae*, численность которых превышала 600 экз./л. В плесах по мере удаления от моря прослеживается тенденция к увеличению суммарной численности зоопланктона и появлению дополнительной экологической ниши — хемоклина, в котором на ранних стадиях доминируют морские коловратки, а после формирования постоянной сероводородной зоны — личинки *Spionidae*.

ОБСУЖДЕНИЕ

Изменения в гидрологической системе за девять десятилетий

Водоем, изученный в 1930-х годах научной группой Г.С. Гурвича на базе Беломорской методической станции ГГИ, в современном виде представляет собой три плеса, в разной степени изолированных от моря, причем в дальнем от моря сформировалась устойчивая вертикальная стратификация с аноксической зоной, характерная для прибрежных меромиктических водоемов беломорского побережья. Насколько изменилась гидрологическая структура лагуны за почти 90 лет? В публикации предшественников приведены таблицы с данными о температуре, солёности и концентрации кислорода в воде, мы попробовали сопоставить результаты своих измерений с данными 1930-х годов. Оказалось, что по большинству параметров оценить изменения невозможно. Одно из ожидаемых последствий прогрессирующей изоляции — уменьшение солёности поверхностного слоя воды. По данным 1930-х годов солёность была столь изменчива, что наши величины полностью укладываются в этот диапазон. То же самое относится к солёности и температуре в придонном слое. Стал ли опресненный слой больше или тоньше? Тоже не удастся оценить: в 1930-х годах измерения проводили с шагом по вертикали 1–2 м, а опресненный слой ветрового перемешивания в этих водоемах меньше. Существовала ли в 1930-х годах анаэробная зона и какой мощности? Это можно было бы определить по данным измерений концентрации растворенного в воде кислорода — увы, в те годы измерения, как правило, не затрагивали придонную зону.

Таблица 2. Содержание сероводорода в I плесе (сравнение по годам)

Горизонт, м	Содержание H ₂ S, мг/л	
	04.08.2020	11.08.2021
1.0	0.01	н.о.
3.0	—	0.01
5.0	—	0.26
5.1	—	0.46
5.2	—	2.30
5.5	—	8.31
6.0	0.09	10.59
6.4	0.14	—
6.5	0.52	12.89
7.0	—	14.55
7.5	25.96	13.94
8.0	13.27	16.45

Таблица 3. Содержание растворенного кремния и фосфор (сравнение по годам)

Название и горизонт, м	Кремний, мг/л		P-PO ₄ , мкг/л	
	08.2020	08.2021	08.2020	08.2021
III плес, 1 м	1.48	1.54	3	7
III плес, 8 м	1.95	0.92	5	59
I плес, 1 м	1.17	1.21	4	4
I плес, 6 м	4.17	6.33	257	656
I плес, 6.4 м	9.99	—	506	—
I плес, 7 м	—	6.49	—	710
I плес, 7.5 м	15.26	—	727	—
I плес, 8 м	—	6.51	—	705
Море	0.69	—	2	—

И все-таки некоторую динамику гидрологических параметров выявить удалось.

1. В I плесе солёность придонной воды, начиная с горизонта 5 м, в 1930-х годах была на 2–3 единицы больше, чем сейчас. Такие небольшие различия могут быть следствием разных способов измерения.

2. В 1930-х годах более существенными по сравнению с 2019–2021 гг. были межгодовые вариации придонной солёности в дальней яме. Диапазон величин солёности в меньшей степени зависит от способа измерения, по сравнению с абсолютными значениями. Можно предположить, что в 1930-х годах гидрологический режим был

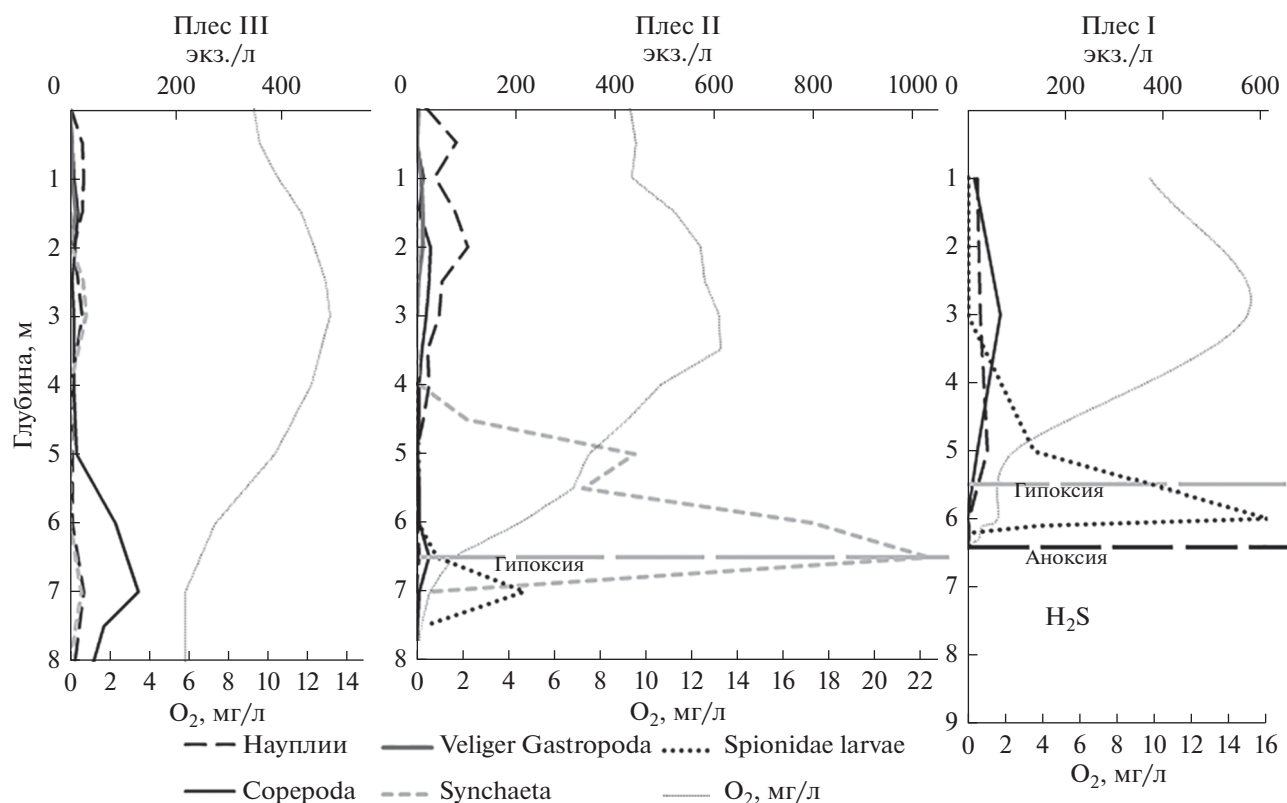


Рис. 6. Вертикальное распределение зоопланктона в лагуне Озерки в августе 2021 г.

менее стабильным из-за более интенсивного водообмена с морем.

3. Наши предшественники ни разу не упомянули о том, что в нижней части водоема есть вода с запахом сероводорода. Упоминали лишь о запахе, исходящем от грунта, не преминули написать о нулевом содержании кислорода, зарегистрированном однажды в апреле. Это дает основания полагать, что постоянной сероводородной зоны не было. Обнаруженная нами аноксийная зона в плесе I охватывает его нижние 2.0–3.5 м. В 2020 г. она доходила до горизонта 6.5 м, в 2021 г. — до 5.1 м. Изменчивость положения редокс-границы свидетельствует о динамичности гидрологической системы лагуны. Нечто аналогичное мы наблюдаем в лагуне на Зеленом мысе (расположенной в окрестностях Беломорской биостанции МГУ), которая находится на относительно ранней стадии изоляции, и подвержена ежедневным небольшим приливам (Краснова и др., 2016). В 1930-е годы, когда существовала деревня, антропогенная нагрузка на водоем не приводила к аноксии. В данный момент аноксийная зона существует, несмотря на то, что деревни нет уже более полувека.

4. Существенные изменения произошли в вертикальном распределении биогенных элементов в I плесе. В 1930-х годах разница в содержании фосфатов между слоями там была незначительной: 3.7–5.2 мкг/л в слое 1–2.5 м и 6.6 мкг/л возле дна. В настоящее время в придонной зоне содержание минерального фосфора на два порядка больше — 250–700 мкг/л. Это характеризует дальний от моря плес как водоем с устойчивой стратификацией, в придонной зоне которого накапливается органика и активно происходит ее деградация.

5. О том же свидетельствует высокое содержание в нем сероводорода, сравнимое с величинами в других беломорских полуизолированных водоемах (Krasnova et al., 2018; Лосюк и др., 2021), и повышенная концентрация растворенных органических веществ.

Оценка высоты поднятия порога

Поскольку в нашем распоряжении есть данные предшественников о том, при какой высоте воды в море в лагуне начинался прилив, мы попробовали определить ту же величину с помощью логгеров, которые регистрируют давление и тем-

пературу воды. Логгер, установленный в море, показал полусуточные приливные колебания амплитудой около 1.6–1.7 м. В III плесе амплитуда колебаний составляла от 2 до 12 см (в среднем 7.5 см); в 1930-х годах она была от 3.5 до 12 см. Данные, приведенные в статье наших предшественников, относятся к квадратуре, и наши измерения также пришлось на квадратуру, следовательно наши измерения сравнимы. Согласно показаниям логгеров, поступление воды из моря в лагуну начинается на отметке 2.2 м (см. рис. 5). Если минимальный уровень воды в море (во время наших измерений он был на отметке 0.7–0.8 м) принять за локальный ноль (как это было сделано в статье предшественников), то прилив в лагуне начинается при уровне моря 1.4–1.5 м. В 1930-х годах это происходило на отметке 1.2 м. По всей видимости, разница в 20–30 см отражает высоту, на которую за это время поднялся Умбский порог, который служит основным путем водообмена с морем.

Пока существовало село Порья губа, его жители расчищали пороги для свободного прохода в море, но теперь Умбский порог полностью утратил судоходность не только для карбасов, но и для плоскодонных надувных лодок. С исчезновением антропогенного влияния все изменения обусловлены природными факторами: поднятием порога и ледовыми перемещениями валунов. Полученная нами величина хорошо согласуется с оценкой скорости поднятия, полученной геоморфологами для полуострова Киндо на Карельском берегу путем датирования отложений с диатомовыми остатками радиоуглеродным методом (Романенко, Шилова, 2012). По их данным вероятная скорость текущего поднятия — чуть более 30 см за столетие. Терский и Карельский берега находятся по разные стороны Кандалакшского грабена, и могут подниматься с разной скоростью. Но в данном случае они совпали.

ВЫВОДЫ

1. Лагуна Озерки представляет собой три плеса, в разной степени изолированных от моря.

2. За почти 90 лет, прошедшие со времени предыдущих исследований, в результате прогрессирующего подъема берега усилилась изоляция от моря лагуны Озерки в Порьей губе.

3. Наибольшие изменения произошли в кутовом плесе (I). В нем сформировалась устойчивая вертикальная стратификация с типичными для прибрежных меромиктических водоемов слоями воды.

4. В придонной зоне плеса I отмечен тренд к возрастанию солености и уменьшению ее изменчивости. На два порядка возросла концентрация минерального фосфора.

5. Появилась аноксийная зона с высоким содержанием сероводорода, которая занимает треть глубины водоема.

6. На границе аэробной и анаэробной зон в зоне хемоклина образовался слой из аноксигенных фототрофных бактерий.

7. В последовательности плесов по мере удаления от моря прослеживается тенденция к увеличению суммарной численности зоопланктона и появлению дополнительной экологической ниши — хемоклина, в котором на ранних стадиях изоляции доминируют морские коловратки, а после формирования постоянной сероводородной зоны — личинки Spionidae.

8. Прилив в лагуне начинается при уровне воды в море на 20–30 см выше, чем в 1930-х годах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена по государственной теме “Разнообразие, структура и функционирование морских и прибрежных экосистем” (номер ЦИТИС 121032500077-8) при поддержке РФФИ (грант № 19-05-00377).

FUNDING

The work was carried out under the state budget theme “Diversity, structure and functioning of marine and coastal ecosystems” (CITIS no. 121032500077-8) with the support of the Russian Foundation for Basic Research (grant no. 19-05-00377).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны администрации Кандалакшского государственного природного заповедника за возможность работать на его акватории, а также инспектору А.Н. Нестерову за постоянную помощь в работе.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to the administration of the Kandalaksha State Nature Reserve for the opportunity to work in its water area, as well as to inspector A.N. Nesterov for his help in our work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гурвич Г.С., Соколова Е.В. К познанию реликтовых водоемов Белого моря // Тр. ГТИ. 1939. Вып. 8. № 15. С. 142–161.
- Дерюгин К.М. Беломорская станция Гос. Гидрологического института // Природа. 1935. № 10. С. 83–85.
- Дерюгин К.М. Реликтовое озеро Могильное: (остров Кильдин в Баренцовом море): Монограф. очерк. Л.: Главнаука, 1925. 112 с.
- Комплексная научно-образовательная экспедиция “Арктический плавучий университет-2021”: Мате-

- риалы экспедиции. В 2-х ч. / отв. ред. К.Г. Боголицын. Архангельск: ИПЦ САФУ, 2021. Ч. II. 394 с.
- Краснова Е.Д. В поисках реликтовой лагуны // Наука и жизнь. 2020. № 5. С. 76–80.
- Краснова Е.Д. Экология меромиктических озер России. 1. Прибрежные морские водоемы // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 3. С. 322–333.
<https://doi.org/10.31857/S0321059621030093>
- Краснова Е.Д., Воронов Д.А. Влияние хемоклина на вертикальную неоднородность зоопланктона в прибрежных стратифицированных водоемах, отделившихся от Белого моря: Тр. X Междунар. науч.-практ. конф. “Морские исследования и образование (MARESEDU-2021)”. Тверь: ООО ПолиПРЕСС, 2022. Т. 2. С. 82–86.
- Краснова Е.Д., Воронов Д.А., Демиденко Н.А., Кокрятская Н.М., Пантюлин А.Н., Рогатых Т.А., Самсонов Т.Е., Фролова Н.Л., Шапоренко С.И. К инвентаризации реликтовых водоемов, отделяющихся от Белого моря / Комплексные исследования Бабьего моря, полу-изолированной беломорской лагуны: геология, гидрология, биота — изменения на фоне трансгрессии берегов. Труды Беломорской биостанции МГУ. М: Тов-во научных изданий КМК, 2016. Т. 12. С. 211–241.
- Краснова Е.Д., Воронов Д.А., Кожин М.Н. В поисках реликтовой лагуны, изученной 85 лет назад: исследование ковшовых губ Восточная Порья, Педуниха и Малая Пирья на Канда拉克шском берегу Белого моря: Тр. VIII Междунар. науч.-практ. конф. Морские исследования и образование (MARESEDU-2019). Тверь: ООО ПолиПРЕСС, 2020. Т. 2. С. 310–313.
- Кренс Е.М. Гидрологический очерк Черной губы на Новой Земле и реликтовых озер, к ней примыкающих // Исследования морей СССР. Л.: ГГИ, 1927. Вып. 5. 80 с.
- Лосюк Г.Н., Кокрятская Н.М., Краснова Е.Д. Сероводородное заражение прибрежных озер на разных стадиях изоляции от Белого моря // Океанология. 2021. Т. 61. № 3. С. 401–412.
<https://doi.org/10.31857/S003015742102012X>
- Мардашова М.В., Воронов Д.А., Краснова Е.Д. Бентосные сообщества прибрежных водоемов на разных стадиях изоляции от моря в окрестностях Беломорской биостанции МГУ (Канда拉克шский залив Белого моря) // Зоологический журн. 2020. Т. 99. № 7. С. 819–837.
<https://doi.org/10.31857/S0044513420070077>
- Романенко Ф.А., Шилова О.С. Последледниковое поднятие Карельского берега Белого моря по данным радиоуглеродного и диатомового анализов озерно-болотных отложений п-ова Киндо // ДАН. 2012. Т. 442. С. 544–548.
- Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.
- Шапоренко С.И. Гидролого-гидрохимическая характеристика отшнуровывающихся водоемов района ББС (Канда拉克шский залив Белого моря) // Тр. Беломорской биол. станции. 2003. Т. 9. С. 184–190.
- Carlson R.E. A trophic state index for lakes // Limnol. and Oceanogr. 1977. Iss. 22. P. 361–369.
<https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.2.0361>
- Krasnova E., Matorin D., Belevich T., Efimova L., Kharcheva A., Kokryatskaya N., Losyuk G., Todorenko D., Voronov D., Patsaeva S. The characteristic pattern of multiple colored layers in coastal stratified lakes in the process of separation from the White Sea // Chinese J. of Oceanol. and Limnol. 2018. № 6. P. 1–16.
<https://doi.org/10.1007/s00343-018-7323-2>

A Relict Lagoon in the Porya Bay (White Sea, Kandalaksha Bay): What Has Changed over the Past 90 Years?

E. D. Krasnova^{1, *}, D. A. Voronov², N. L. Frolova³, A. N. Vasilenko³, V. A. Efimov³, L. E. Efimova³, N. M. Kokryatskaya⁴, G. N. Losyuk⁴, and S. V. Patsaeva⁵

¹Pertsov White Sea Biological Station of the Biological Department of Moscow State University, Primorskii, Russia

²Kharkevich Institute for the Information Transmission Problems of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

⁴Lavrov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (FECIAR UrB RAS), Arkhangelsk, Russia

⁵Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, Russia

*e-mail: e_d_krasnova@mail.ru

In the 1930s, a scientific group from the White Sea Methodological Station of the State Hydrological Institute studied in detail a relict reservoir in the eastern part of the Porya Bay under the local name “Ozerki.” It consists of three reaches, one is connected to the sea at high tide, the next is connected with the first through a narrow shallow strait, and the last, apex reach communicates with the middle one. A re-examination almost 90 years later showed that due to the ongoing post-glacial uplift of the coast, the thresholds separating the “Ozerki” from the sea became shallower. With the help of pressure loggers, it has been established that the tide in the lagoon now begins at a sea level 20–30 cm higher than in the 1930s. As a result of progressive isolation, a stable vertical stratification has developed in the apex reach indicating possible meromoxis, and an anoxic zone with a high hydrogen sulfide concentration has appeared, which occupies a third of the depth of

the reservoir; the concentration of mineral phosphorus increased by two orders of magnitude. In the reaches, an increase in the total abundance of zooplankton is traced with distance from the sea, an additional ecological niche appears—a chemocline, in which marine rotifers dominate in the early stages of isolation, and polychaete larvae from the order Spionidae dominate after the formation of a permanent hydrogen sulfide zone.

Keywords: marine lagoons, coast uplift, progressive isolation, centennial trend, stratification, anoxia, zooplankton, White Sea

REFERENCES

- Carlson R.E. A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.*, 1977, vol. 22, pp. 361–369.
<https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.2.0361>
- Deryugin K.M. White Sea station of the State Hydrological Institute. *Priroda*, 1935, no. 10, pp. 83–85. (In Russ.).
- Deryugin K.M. *Reliktovoe ozero Mogilnoe (ostrov Kildin v Barentzevom more)* [The Relict Lake Mogilnoe, Island Kildin in the Barents Sea]. Leningrad: Glavnauka Publ., 1925. 112 p.
- Gurvich G.S., Sokolova E.V. To the knowledge of the relict reservoirs of the White Sea. *Tr. Gos. Gidrol. Inst.*, 1939, vol. 8, no. 15, pp. 142–161. (In Russ.).
- Kompleksnaya nauchno-obrazovatel'naya ekspeditsiya "Arkticheskiy plavuchiy universitet-2021"* [Proceedings of the Integrated Scientific and Educational Expedition "Arctic Floating University-2021]. Bogolitzyn K.G., Ed. Arkhangelsk: NARFU, 2021, vol. 2, 394 p.
- Krasnova E.D. Ecology of meromictic lakes of Russia. 1. Coastal marine waterbodies. *Water Resour.*, 2021, vol. 48, no. 3, pp. 427–438.
<https://doi.org/10.1134/S009780782103009X>
- Krasnova E.D. In search of a relict lagoon. *Nauka i Zhizn'*, 2020, no. 5, pp. 76–80. (In Russ.).
- Krasnova E., Matorin, D., Belevich T., Efimova L., Kharcheva A., Kokryatskaya N., Losyuk G., Todorenko D., Voronov D., Patsaeva S. The characteristic pattern of multiple colored layers in coastal stratified lakes in the process of separation from the White Sea. *Chin. J. Oceanol. Limnol.*, 2018, no. 6, pp. 1–16.
<https://doi.org/10.1007/s00343-018-7323-2>
- Krasnova E.D., Voronov D.A. Influence of chemocline on vertical unevenness of zooplankton in coastal stratified water bodies separated from the White Sea. In *Tr. X Mezhdunar. nauchn.-prakt. konf. "Morskie issledovaniya i obrazovanie (MARESEDU-2021)"* [Proc. X Int. Conf. "Marine Research and Education" MARESEDU-2021]. Tver: PolyPRESS, 2022, vol. 2, pp. 82–86. (In Russ.).
- Krasnova E.D., Voronov D.A., Demidenko N.A., Kokryatskaya N.M., Pantulin A.N., Rogatykh T.A., Samsonov T.E., Frolova N.L., Shaporenko S.I. For inventory of relict basins separated from the White Sea. In *Kompleksnye issledovaniya Babiego morya, polu-izolirovannoi belomorskoj laguny: geologiya, gidrologiya, biota* [Integrated Research of the Babie More, Semi-Isolated White-Sea Lagoon: Geology, Hydrology, Biota]. Tr. Belomorskoj biostantsii MGU [Proc. White Sea Biol. Station of Lomonosov Moscow State Univ.], vol. 12. Moscow: KMK Publ., 2016, pp. 211–241. (In Russ.).
- Krasnova E.D., Voronov D.A., Kozhin M.N. In search of a relict lagoon studied 85 years ago: EXPLORING the Vostochnaya Poriya, Pedunikha, and Malaya Piriya scoop-like bays on the Kandalaksha coast of the White Sea. In *Tr. VIII Mezhdunar. nauchn.-prakt. konf. Morskie issledovaniya i obrazovanie (MARESEDU-2019)* [Proc. VIII Int. Conf. "Marine Research and Education" Moscow, 28–31 October 2019 MARESEDU-2019]. Tver: PolyPress, 2020, vol. 2, pp. 310–313. (In Russ.).
- Kreps E.M. *Gidrologicheskii ocherk Chernoi guby na Novoy Zemle i reliktovykh ozer, k nei primykayushchikh* [Hydrological Sketch of the Chernaya Bay on Novaya Zemlya and Relict Lakes Adjacent to It]. *Issledovaniya morei SSSR* [Studies of the Seas of the USSR], vol. 5. Leningrad: Gos. Gidrol. Inst., 1927. 80 p.
- Losyuk G.N., Kokryatskaya N.M., Krasnova E.D. Hydrogen sulfide contamination of coastal lakes at different stages of isolation from the White sea. *Oceanol.*, 2021, vol. 61, pp. 351–361.
<https://doi.org/10.1134/S0001437021020120>
- Mardashova M.V., Voronov D.A., Krasnova E.D. Benthic communities of coastal water bodies at different stages of isolation from the White Sea in the vicinity of the White Sea Biological Station. *Biol. Bull.*, 2020, vol. 47, no. 9, pp. 1133–1152.
<https://doi.org/10.1134/S1062359020090095>
- Romanenko F.A., Shilova O.S. The postglacial uplift of the Karelian Coast of the White Sea according to radiocarbon and diatom analyses of lacustrine boggy deposits of kindo peninsula. *Dokl. Earth Sci.*, 2012, vol. 442, pp. 242–246.
- Rukovodstvo po khimicheskomu analizu morskikh i presnykh vod pri ekologicheskom monitoringe rybnokhozyaystvennykh vodoemov i perspektivnykh dlya promysla raionov Mirovogo okeana* [Guidance on the Chemical Analysis of Marine and Fresh Waters in the Ecological Monitoring of Fishery Reservoirs and Promising Areas for Fishing in the World Ocean]. Moscow: VNIRO, 2003. 202 p.
- Shaporenko S.I. Hydrological and hydrochemical characteristics of separating water bodies in the WSBS area (Kandalaksha Bay of the White Sea). In *Tr. Belomorskoj Biol. Stantsii* [Proc. of the White Sea Biological Station], 2003, vol. 9, pp. 184–190. (In Russ.).