

УДК 550.47

ЭВОЛЮЦИЯ ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЙ В ОТДЕЛЯЮЩИХСЯ ВОДОЁМАХ ЗАЛИВА ПОРЬЯ ГУБА И КАНДАЛАКШСКОГО БЕРЕГА БЕЛОГО МОРЯ

© 2024 г. Н. М. Кокрятская^{1,*}, Г. Н. Лосюк^{1,**}, Е. Д. Краснова²,
С. С. Попов¹, К. В. Титова¹, Д. А. Воронов³

¹ *Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
им. академика Н.П. Лаверова УрО РАН, г. Архангельск*

² *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва*

³ *Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН г. Москва*

* e-mail: nkokr@yandex.ru

** e-mail: glosyuk@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.04.2023 г.

После доработки 04.06.2023 г.

Принята к публикации 18.07.2023 г.

Приведены результаты гидрохимических исследований водоемов с разной степенью развития анаэробных условий (вплоть до появления меромиксии с сульфидной аноксией), расположенных в Кандалакшском заливе Белого моря (залив Порья Губа, Кандалакшский государственный природный заповедник). Показано, что эти водоемы, находящиеся на разных стадиях изоляции от моря, имеют уникальную гидрологическую и гидрохимическую структуру, формирующуюся на определенном этапе их эволюции. Вертикальная стратификация вод с развитием всех сопутствующих стагнации явлений, сильнее выражена в наиболее удаленных от моря частях их акватории, где в придонных анаэробных водах отмечено повышенное содержание сероводорода (до 16.5 мг/л), фосфатов, кремния, нитритного и аммонийного азота. Однако, концентрации всех основных ионов сравнимы с аналогичными показателями в морских водах и практически не изменяются по вертикали. Анализ распределения гидрохимических параметров дальнего плеса лагуны Озерки позволил заключить, что, в результате изменений произошедших с этим водоемом за последние 90 лет, в настоящее время его, скорее всего, можно отнести к меромиктическим.

Ключевые слова: Белое море, отделяющийся водоем, стратификация, сероводород, биогенный элемент, ионный состав

DOI: 10.31857/S0030157424030057, EDN: QCKSJL

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования биогеохимических процессов, протекающих в водных объектах, определяется, прежде всего, их важностью для оценки экологического состояния водоемов. Особенно актуальны исследования водных экосистем со стратифицированной водной толщей и сульфидной аноксией (эвксинией) в придонных водах. Отличной моделью для изучения формирования эвксинии при усилении стратификации могут служить морские акватории, изолирующиеся от моря в результате, как естественных причин, так и хозяйственной деятельности человека. По мере увеличения степени изоляции эти водоемы проходят несколько стадий развития, включая меромиктическую, которые сопровождаются коренной перестрой-

кой их гидрохимической и гидробиологической структуры.

На побережье Кандалакшского залива Белого моря в ходе постледникового поднятия берега образовалось множество водоемов, в разной степени изолированных от моря [6, 7, 21]. По мере нарастания изоляции, морские заливы проходят стадию лагун с ассиметричными приливами и сезонной стратификацией, затем через стадию водоемов с периодическим забросом морской воды, и далее — меромиктическую стадию, по окончании которой, они превращаются в пресноводные озера [5]. За это время уменьшается влияние моря и поступление соленой воды, изменяется промывной режим, опресняется верхний горизонт водоема за счет атмосферных осадков и поверхностных вод с суши, устанавливается сезонная или посто-

янная стратификация. В условиях стратификации кислород придонных вод полностью расходуется на окисление автохтонного и аллохтонного органического вещества. В анаэробных солёных водах активизируется деятельность сульфатредуцирующих бактерий, что приводит к появлению и накоплению сероводорода. Одновременное наблюдение за водоемами, находящимися на разных этапах отделения от моря, позволяет не ждать сотни лет последовательной смены стадий сукцессии, а в настоящий момент изучать специфику протекающих биогеохимических процессов, их влияние на внутриводоемные процессы и в целом на экологическое состояние этих водоемов.

Несколько водоемов, находящихся на разных стадиях естественного отделения от Белого моря, обнаружены недалеко от Беломорской биологической станции имени Н.А. Перцова биологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (Карельский берег, Кандалакшский залив Белого моря) [8, 23–24], и, начиная с 2012 г. [11], за ними ведутся мониторинговые комплексные наблюдения [1, 12, 14, 15, 20, 25, 26]. В 2019–2022 гг. аналогичными исследованиями были охвачены несколько полуизолированных водоемов на противоположном берегу Кандалакшского залива Белого моря в заливе Порья Губа [13], где основное внимание было уделено изучению лагуны с местным названием Озерки. Лагуна Озерки, так же как и остальная акватория Порьей губы относится к Кандалакшскому государственному природному заповеднику, который дал разрешение на выполнение данного исследования. Интерес к этому водоему обусловлен тем, что работы по его изучению были начаты еще в 1930-х годах научной группой Беломорской методической станции Государственного гидрологического института [3] и их удалось повторить через 90 лет в 2019–2022 гг. [9, 10]. В сравнительных исследованиях было установлено, что из-за продолжающегося послеледниковой подъема берега пороги, отделяющие Озерки от моря, обмелели, в результате чего

усилилась изоляция лагуны от моря, что привело к возникновению вертикальной стратификации в её отдельных частях, особенно в наиболее удаленном от моря плесе. Кроме того, в 2021–2022 гг. были обследованы ещё два водоема: лагуна за Тихими островами и оз. Йоканское (Ёканское), особенности расположения которых позволяли предполагать наличие в них стратификации.

Целью настоящей работы было проведение гидрохимических исследований водоемов с разным уровнем развития стратификации, расположенных в заливе Порья Губа и на Кандалакшском берегу Кандалакшского залива Белого моря.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектами настоящего исследования являлись расположенные в Порьей губе реликтовая лагуна с местным названием “Озерки” (N66° 46.00'; E33° 46.00') и лагуна за Тихими островами (N66° 45.23'; E33° 36.10'), а также озеро Йоканское (N66° 45.2' E33° 25') (рис. 1, табл. 1). Работы по изучению лагуны Озерки начаты в августе 2019 [13] и продолжены в последующие три года. В настоящей работе приведены результаты полевых комплексных исследований, выполненных в августе 2021 и 2022 гг., дополненные ранее полученными данными.

Лагуна Озерки расположена в восточной части Порьей губы. Она 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. В куттовую часть I плеса впадают р. Порья и небольшой ручей.

Таблица 1. Морфометрические характеристики исследуемых водоемов

Водоём		Площадь водоема, км ²	Средняя глубина, м	Максимальная глубина, м
Лагуна Озерки:	I – дальний плес	0.189	5.0	8.5
	II – средний плес	0.069	4.4	7.7
	III – ближний плес, Умбский порог	0.053	4.4	8.2
	III – ближний плес, Варничный порог			7.0
Лагуна за Тихими островами		0.160	2.8	6.0
Оз. Йоканское		0.960	4.7	12.0

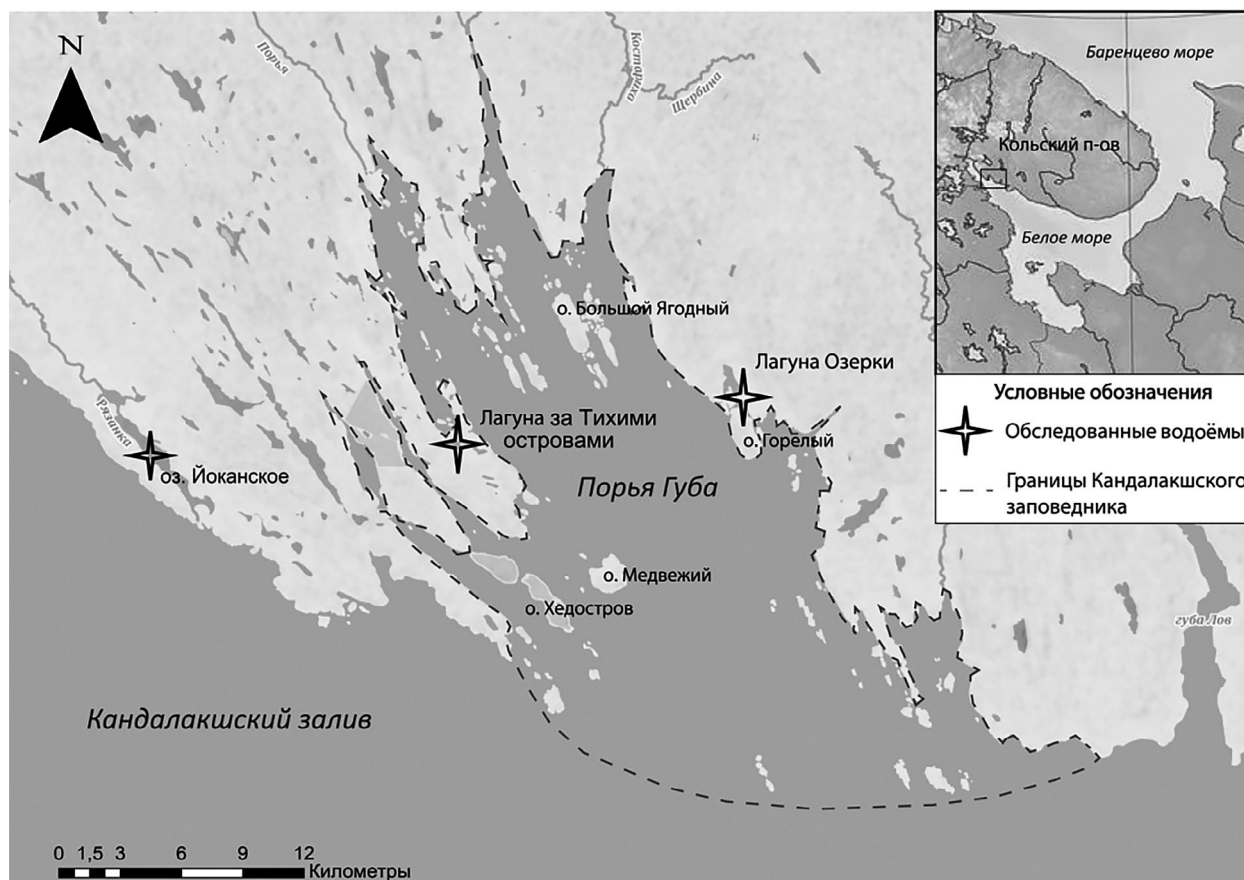


Рис. 1. Карта-схема расположения объектов исследования.

Лагуна за Тихими островами расположена в западной части Порьей губы и представляет собой вытянутый залив, отгороженный от моря береговым выступом и небольшим островом, а в месте соединения с морем – подводным порогом с глубиной 0.5 м во время отлива. В наиболее глубоком месте этого водоема в 2020 году зафиксирована стратификация с признаками аноксии.

Озеро Йоканское находится в Кандалакшском заливе к западу от Порьей губы. Это сильно вытянутый водоём (возможно бывший морской залив), отделенный от моря порогом, с сильным течением, направленным из озера в море. Течение обусловлено рекой Рязанка, впадающей в наиболее отдаленную от моря часть озера.

Пробы для гидрохимических анализов отбирали по всему водному столбу от поверхности до дна, горизонты опробования выбирались с учетом гидрологических особенностей изучаемых водоемов. Станции отбора проб располагались в наиболее глубокой точке каждого водоема, а в лагуне Озерки – в каждом из трех плесов. В III плесе пробы отбирались в двух донных ямах: глубиной 8.2 м возле Умбского порога ($N66^{\circ}45.91'$, $E33^{\circ}46.29'$) (на рис. 2 – III у) и глубиной 7.8 м возле Варнич-

ного порога ($N66^{\circ}45.88'$, $E33^{\circ}46.11'$) (на рис. 2 – III в). Отбор осуществляли погружным насосом “Whale Premium Submersible Pump GP1352” (США) или горизонтальным поликарбонатным батометром (США) объемом 2 л. Температуру, соленость и величину редокс-потенциала определяли зондом YSI PRO 30 (YSI, USA), концентрацию растворенного кислорода – зондом ProODO Optical Dissolved Oxygen Instrument (YSI, USA).

Для лагуны Озерки сделана батиметрическая съемка с использованием эхолота Lowrance Elite 7 Ti2, построена карта глубин [10].

В полевых условиях были получены данные по содержанию сероводорода (H_2S), биогенных элементов: фосфатов ($P-PO_4$), кремния (Si), аммонийного ($N-NH_4$) и нитритного азота ($N-NO_2$) [19, 22]. Ионный состав (сульфаты, хлориды, натрий, калий, магний, кальций) определяли на жидкостном хроматографе LC-20 Prominence (Shimadzu, Япония) с кондуктометрическим детектором [16, 17]. Идентификацию ионов проводили по времени удерживания, количественное определение – по площадям пиков методом абсолютной калибровки с использованием ГСО на все определяемые ионы.

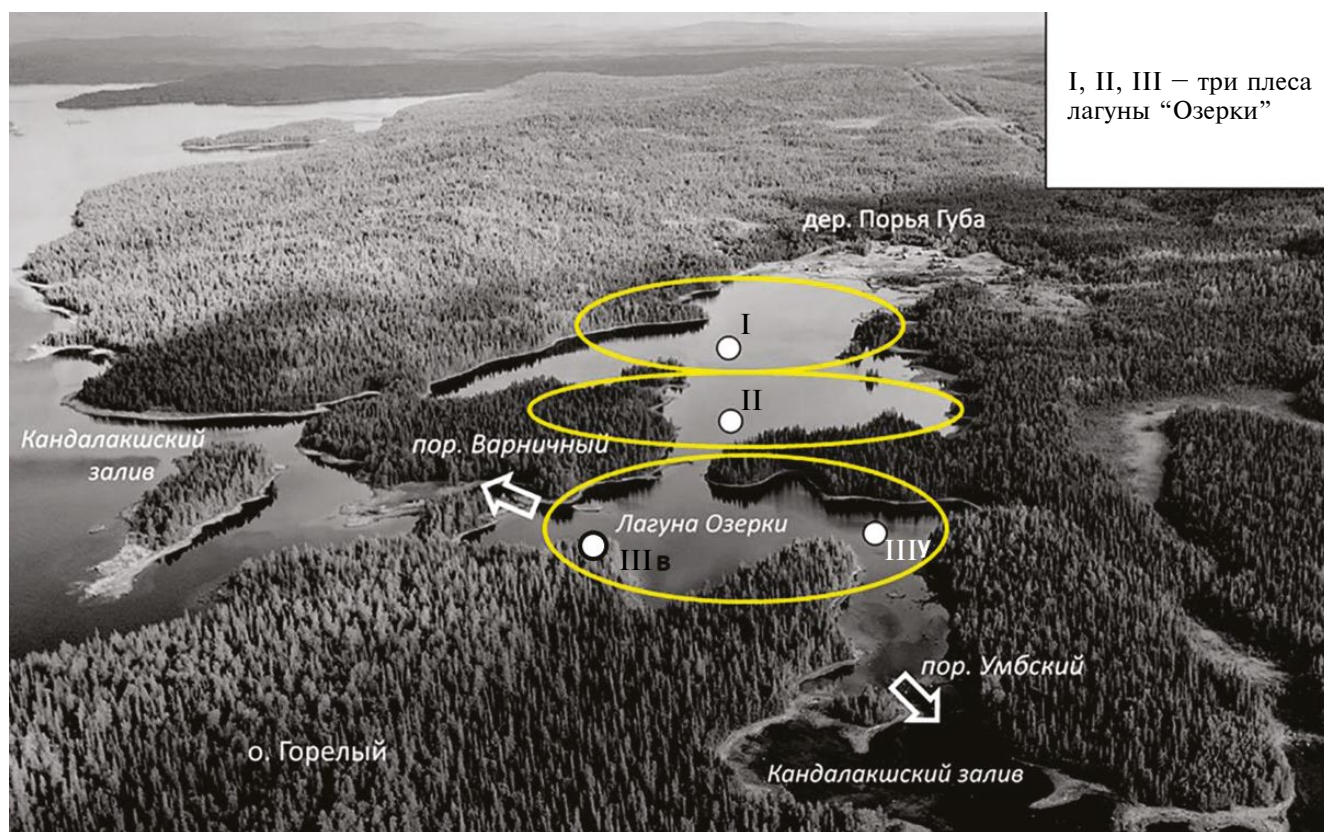


Рис. 2. Карта — схема лагуны Озерки: I — дальний от моря плес (кутовой), II — средний плес, III — плес, сообщающийся с морем во время прилива (III в — станция возле Варничного порога, III у — станция у Умбского порога).

Обработка полученных результатов проводилась с помощью программы LC Solution. Погрешность определения от 15 до 20%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ данных вертикальных профилей основных гидрологических характеристик (температура (T), солёность (S), содержание кислорода (O_2)), представленных на рис. 3, позволяет отметить постоянство вертикальной стратификации в лагуне Озерки и в оз. Йоканском, несмотря на колебания параметров. В лагуне за Тихими островами отмечена значительная межгодовая вариабельность параметров.

Во всех трёх плёсах лагуны Озерки и оз. Йоканском поверхностный слой, подверженный ветровому перемешиванию и опреснению, имеет толщину не более 1 м. В лагуне за Тихими островами перемешиваемый слой больше, так как в лагуне наблюдаются приливы, амплитуда которых на внешней стороне порога, отделяющего лагуну от моря, составляет 1.5–2.0 м.

В перемешиваемом слое лагуны Озерки солёность воды значительно варьирует, в том числе от года к году (табл. 2), причем во всех трех пле-

сах она меняется синхронно. Наименьшая солёность зарегистрирована в 2021 г., в I и II плесах она была минимальной, (2.7–3.2 епс). В ближнем к морским порогам плесе (III) солёность поверхностного слоя в этот момент была немного больше (5.5 епс). В 2019 г. солёность поверхностного во всех плесах слоя была высокой, но в связанном с морем плесе она была несколько ниже, чем в плесах I и II. По всей вероятности, в III плесе из-за приливных течений происходит смешение соленой морской и опресненной поверхностной воды. В придонном слое всех трех плесов солёность значительно выше (22.4–26.8 епс), что обеспечивает устойчивую вертикальную стратификацию. В придонной зоне солёность воды уменьшается от плеса, соединяющегося с морем (III) к кутовому (I). Обращает на себя внимание, что значения придонной солёности в лагуне Озерки в большинстве случаев выше, чем в поверхностном слое моря, который сообщается с лагуной (19.2–25.0 епс) (табл. 2). Низкая температура придонных вод и солёность, на две единицы превышающая солёность на соседней морской акватории [10], позволяют предположить, что нижняя часть лагунных ковшей заполнена водой, поступившей

Таблица 2. Межгодовые вариации солёности исследуемых водоемов

Водоем	Солёность, епс.			
	08.08.2019	04–13.08.2020	06–13.08.2021	04–10.08.2022
Лагуна Озерки				
I (дальний от моря плес)	21.4 25.8	15.6 25.8	3.9 24.5	3.2 22.4
II (средний плес)	21.5 24.9	19.1 26.3	11.2 23.4	2.7 22.5
III (ближний к морю плес)	20.7 26.4	19.5 26.8	5.5 25.9	7.2 25.1
Лагуна за Тихими островами	—	22.7 24.6	23.4 24.6	22.3 22.5
Оз. Йоканское	—	—	1.2 25.1	1.0 23.0
Море (Порья Губа)	—	—	22.9 23.8	19.2 25.0

Примечание. В числителе солёность у поверхности, в знаменателе – у дна. Прочерк – отсутствие данных.

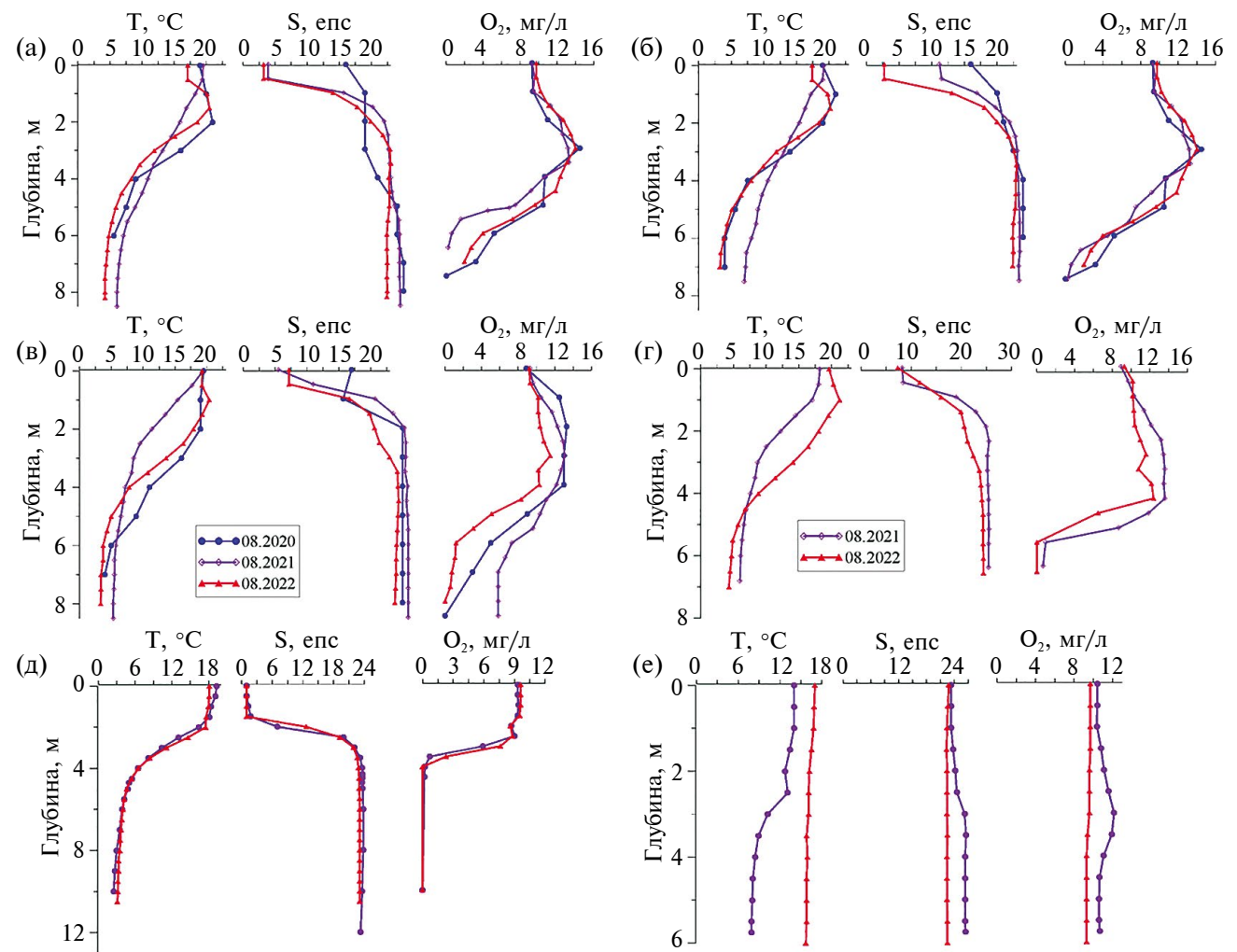


Рис. 3. Вертикальные профили некоторых гидрологических параметров: а) I плес; б) II плес; в) III плес (Умбский порог); г) III плес (Варничный порог); д) оз. Йоканское; е) Лагуна за Тихими островами.

туда в зимнее время (зимой соленость воды в Белом море увеличивается [21]). В плесе I (в куте лагуны) вода, по всей вероятности, или не обновляется вовсе, или это происходит не каждый год.

Для озера Йоканского оба года наблюдений отмечено наличие устойчивой плотностной стратификации — верхние 2 м водной толщи — слабоминерализованные (1.0–3.4 епс), потом следует резкий скачок солености (галоклин), и, начиная с глубины 2.5 м, вода имеет соленость, аналогичную таковой в море. Небольшие межгодовые различия в глубине переходных горизонтов вполне могут объясняться колебаниями уровня озера из-за активного водообмена с морем при каждом приливе или из-за различий в мощности пресного стока в разные годы.

Лагуна за Тихими островами характеризуется слабым вертикальным градиентом солености, разница между поверхностным и придонным горизонтами составляет всего 1–2 единицы солености, и примерно такая же, как в море. Поэтому неудивительно, что стратификация здесь неустойчивая, и аноксия возникает не каждый год. За время наших наблюдений придонная аноксия была зафиксирована только однажды в 2020 году, в августе 2021–2022 годов её не было.

Концентрация растворенного кислорода во всех трех ковшах лагуны Озерки в поверхностном слое воды соответствует 100% насыщения, ниже — сначала нарастает, достигает максимума под зоной пикноклина, а далее с глубиной убывает до минимальных значений и/или полного исчерпания в придонном слое. Столь высокое содержание кислорода в срединном слое воды происходит вследствие активности фитопланктона, и накопления выработанного им кислорода под пикноклином ввиду отсутствия конвекции. Подобная гидрохимическая особенность отмечена ранее для оз. Кисло-Сладкого (Карельский берег Кандалакшского залива), в срединном слое которого насыщение вод кислородом могло достигать 200–300% [8, 23, 24]. Поверхностные воды оз. Йоканского также насыщены кислородом, однако ниже галоклина водная толща уже полностью анаэробна. В лагуне за Тихими островами в годы без придонной аноксии вся водная толща хорошо обеспечена кислородом, а в 2020 г. кислород распространялся вплоть до глубины 5.5 м.

Выполненные исследования показали присутствие сероводорода в воде всех трех плесов лагуны Озерки (рис. 4, табл. 2). Но, если в гидродинамически более активных водах II плеса и умбско-го порога III плеса сероводород обнаруживался эпизодически в следовых количествах (не более

0.03 мг/л) и только в придонных горизонтах, то в водах станции около Варничного порога III плеса и, особенно, в дальней яме I плеса он появляется по мере усугубления стратификации, достигая максимальных значений в анаэробных придонных горизонтах. Наиболее высокие значения концентраций сероводорода (13.27 и 16.45 мг/л) отмечены в придонных горизонтах наиболее удаленного от прямого сообщения с морем I плеса. Основываясь на данных прошлых лет, мы предполагали, что стратификация вод в “дальней яме” носит устойчивый характер и возможно уже не нарушается в межсезонье, а если и нарушается, то затем быстро восстанавливается. Наблюдавшееся в 2022 году значительное уменьшение концентрации сероводорода указывает на возможность, по крайней мере, частичного освежения воды зимой за счет поступления воды из соседнего плеса и ее подмешивания к застойным придонным водам.

В оз. Йоканском сероводород появляется сразу под границей распространения кислорода. В 2021 г. переход от аэробной зоны к анаэробной находился на глубине 4.75 м, в 2022 г. — на глубине 5.1 м. В этом водоеме галоклин совпадает с редокс-клином. В зоне скачка, как на “ложном дне”, скапливается свежее отмершее органическое вещество, которое и запускает бактериальный процесс генерации сероводорода. Ниже 6 метров его содержание стабилизируется на уровне 4.2–6.3 мг/л (в оба года исследований). Относительная стабильность данных вертикального распределения основных гидрологических и гидрохимических параметров, полученных в течение двух лет наблюдений, позволяет предполагать меромиктический статус этого водоема.

О развитии застойных явлений в придонных анаэробных горизонтах лагуны Озерки и оз. Йоканского кроме сероводородного заражения свидетельствует и увеличение содержания биогенных элементов (табл. 3, рис. 5). В нормально аэрируемых водах Лагуны за Тихими островами по всему водному столбу содержание биогенных элементов сопоставимо с данными для открытой морской акватории, а их вертикальное распределение было достаточно однородным от поверхности до дна.

Содержание кремния в поверхностных водах всех плесов лагуны Озерки, как видно из рис. 5, всегда выше, чем на глубине 2–4 м, что представляется вполне закономерным, т. к. основным поставщиком кремния в море является сток с суши. Можно отметить, что поверхностные воды всех четырех станций близки между собой по содержанию биогенных элементов, а их количество в целом несколько выше, чем в морских водах (табл. 3).

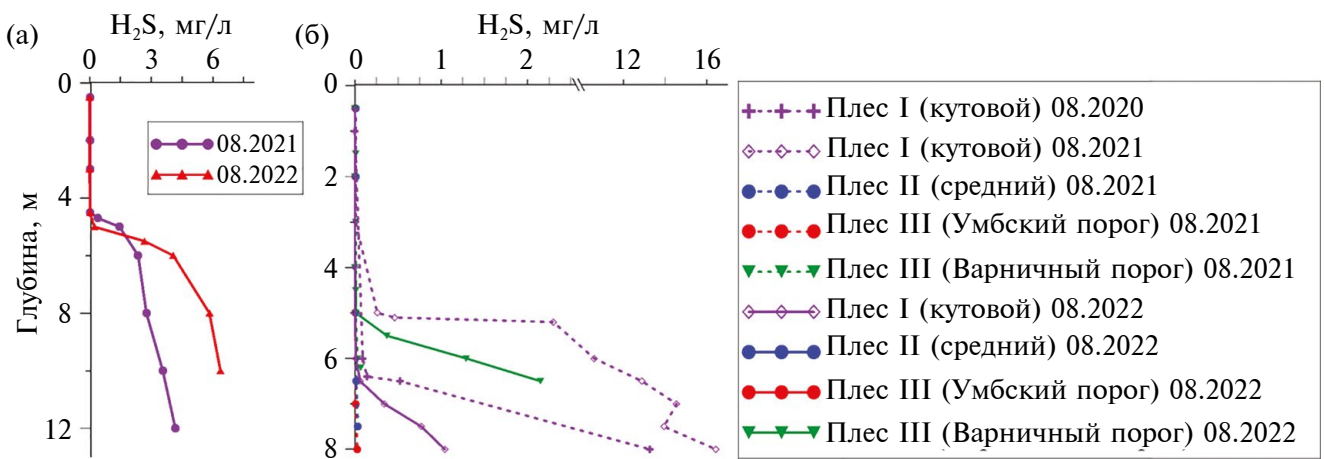


Рис. 4. Распределение сероводорода в а) оз. Йоканском и б) лагуне Озерки.

Таблица 3. Содержание сероводорода и биогенных элементов (сравнение по годам)

Наименование и горизонт	Сероводород, мг/л			Кремний, мг/л		Р-PO ₄ , мкг/л		N-NO ₂ , мкг/л		N-NH ₄ , мкг/л
	08.2020	08.2021	08.2022	08.2021	08.2022	08.2021	08.2022	08.2021	08.2022	08.2022
Море (Поря Губа), 0.5 м	н.о.	н.о.	н.о.	0.14	0.42	0.39	4.81	0.14	0.48	19.6
III плес (Ум), 0.5 м	—	н.о.	н.о.	1.54	2.24	7.11	2.10	3.54	2.46	0
2–4 м	—	н.о.	н.о.	0.32	0.71	24.0	3.32	2.29	1.10	18.2
7–8 м	—	0.02	н.о.	0.92	2.18	59.0	40.9	3.82	3.73	147
III плес (Вар), 0.5 м	—	н.о.	н.о.	1.40	1.82	5.97	0.90	2.53	2.13	8.00
2–4 м	—	0.01	н.о.	0.74	0.90	20.7	18.3	1.64	1.80	23.1
6–6.5 м	—	0.05	1.72	1.43	5.39	64.9	713	6.66	12.2	518
II плес, 0.5 м	—	н.о.	н.о.	1.62	3.78	7.52	5.56	2.64	3.90	3.99
2–4 м	—	—	н.о.	0.74	1.15	23.4	16.0	2.72	1.26	31.5
7–7.5 м	—	0.02	н.о.	2.61	2.62	364	37.5	6.68	2.86	197
I плес, 0.5 м	н.о.	н.о.	н.о.	1.21	3.96	3.59	7.87	1.58	5.13	4.94
2–4 м	—	0.01	н.о.	0.65	1.04	10.3	15.7	1.59	1.88	12.7
6 м	0.09	10.6	0.01	6.33	3.87	565	312	22.6	4.34	806
7 м	0.52	14.6	0.34	6.49	4.23	710	559	35.3	7.28	923
8 м	13.3	16.4	1.04	6.51	4.69	705	646	18.7	9.96	1046
Лагуна за Тихими о-вами 0.5 м	—	н.о.	н.о.	0.07	0.27	3.46	6.93	0.89	0.27	15.1
2–4 м	—	0.01	н.о.	0.41	0.30	9.49	8.35	1.06	0.67	15.5
5.5 м	—	0.01	н.о.	0.78	0.32	20.0	9.90	2.00	0.75	16.2
Оз. Йоканское, 0.5 м	—	0.01	н.о.	1.98	2.62	8.67	9.27	—	5.02	0
2–4 м	—	0.01	н.о.	2.62	2.58	15.8	15.2	—	3.51	18.4
11.5–12 м	—	4.17	6.37	4.99	5.91	238	392	—	9.58	637

Примечание: н. о. – не обнаружено.

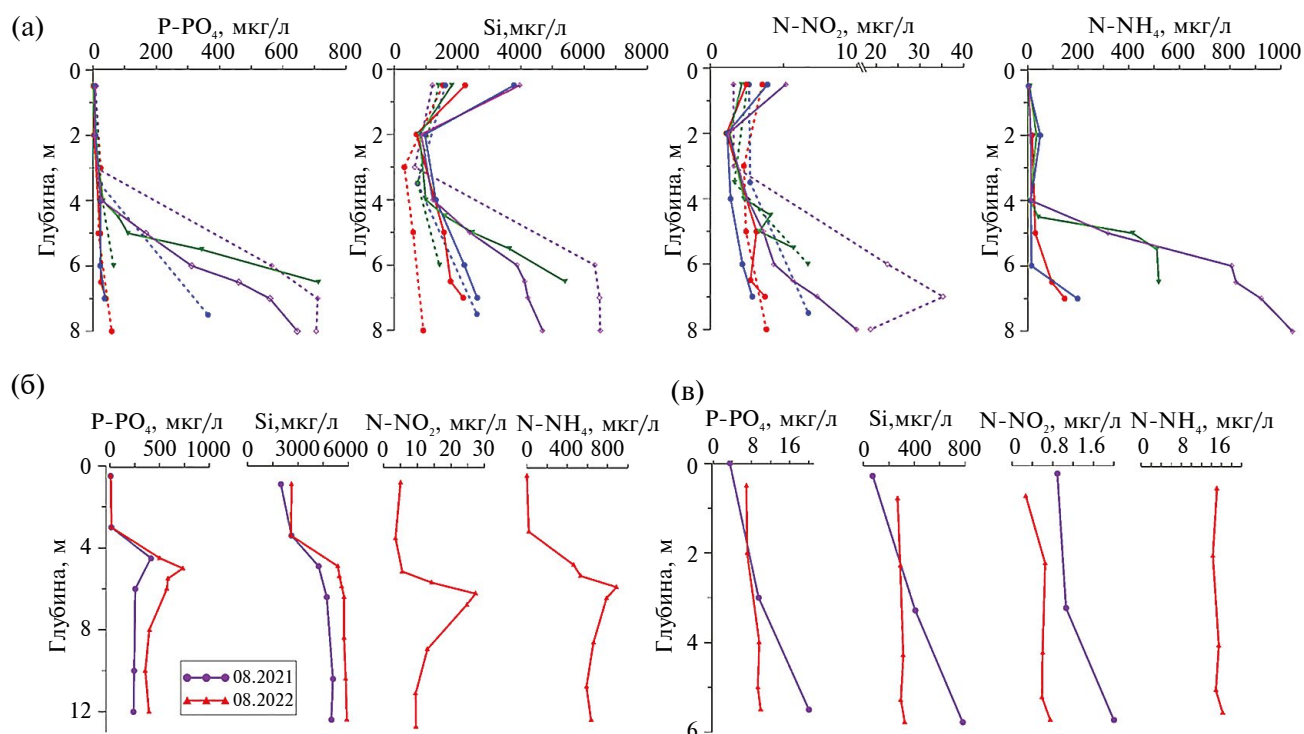


Рис. 5. Распределение биогенных элементов: а) лагуна Озерки (легенда см. рис. 4), б) оз. Йоканское и в) лагуна за Тихими островами.

В 2021 и 2022 гг. во всех водоемах фиксировалось увеличение содержания минерального фосфора в придонных горизонтах, который при отсутствии потребителей (фитопланктона) в анаэробных водах начинает накапливаться. Можно отметить, что уже в II (среднем) плесе анаэробные процессы выражены более отчетливо, чем в III (первом от моря), и содержание всех определяемых биогенных элементов в придонных водах существенно превышает их количество в аэробной зоне. Наиболее сильно вертикальная стратификация вод с развитием всех сопутствующих стагнации явлений, выражена в I плесе, где в придонных анаэробных водах отмечен наиболее высокий уровень содержания не только сероводорода, фосфатов и кремния, но и нитритов. В кислородных водах нитриты окисляются до нитратов, тогда как в анаэробных условиях они восстанавливаются до аммония, способствуя накоплению последнего. Концентрация их в морской воде невелика и обычно составляет доли или единицы мкг/л. Ионы аммония появляются в воде и как первичный продукт обмена веществ, и на последней стадии полной минерализации органических остатков. Содержание аммонийного азота, определенное во время полевых работ в августе 2022 года было минимально в поверхностных водах и во всех случаях возрастало в придонных горизонтах, достигая максималь-

ных значений — 1050 и 636 мкг/л в дальней яме I плеса лагуны Озерки и в оз. Йоканском соответственно.

Сравнивая полученные нами данные по содержанию биогенных элементов в лагуне Озерки с результатами наших предшественников [3], можно заключить, что в дальнейшем ковше за прошедшие 90 лет в распределении гидрохимических параметров этого водоема произошли существенные изменения. В 1932 году разница в содержании фосфатов по водным горизонтам там была незначительной: 3.7–5.2 мкг/л на глубине 1.0–2.5 м и 6.6 мкг/л возле дна. По данным наших исследований при сопоставимых количествах фосфатов в поверхностных водах (табл. 3), их концентрация в придонных слоях воды выросла в сто раз. Этот факт вкупе с данными о постоянном присутствии в анаэробных водах сероводорода и накоплением не только фосфора, но также кремния и аммония, позволяет говорить, что вертикальная стратификация с полным исчерпанием кислорода в придонных горизонтах в этом водоеме сохраняется не только в течение года, но устойчива уже довольно длительное время. Причиной этого является значительное уменьшение поступления свежей морской воды в кутовый плес лагуны вследствие подъема порогов, отделяющих её от моря [10]. По данным первых исследователей дефицит кислорода у дна (иногда с “падением до

ничтожных величин и даже до нуля”) был характерен для этого водоема только зимой и весной, однако, летом и особенно осенью он активно промывался свежей морской водой, при этом содержание кислорода в придонных слоях достигало максимальной за год величины. Налицо появление эвксинии вследствие усиления изоляции за последние 90 лет.

Рассматривая данные по содержанию основных ионов, приведенные в таблице 4, можно отметить, что по химическому составу воды всех исследованных водоемов относятся к хлоридно-натриевым. Концентрации всех основных ионов как в плёсах лагуны Озерки, так и в оз. Йоканском сравнимы с данными для морских вод. Поскольку в придонных водах I (кутового) плёса лагуны Озерки и оз. Йоканского все годы наблюдений мы обнаруживали сероводород, особый интерес вызывали результаты вертикального распределения сульфат-ионов. Как известно [2, 4], появление сероводорода в водных экосистемах, особенно обеспеченных сульфатами, связано с деятельностью особой группы анаэробных микроорганизмов — сульфатредукторов, которые (совместно с метаногенами) принимают участие на заключительных этапах разложения

органического вещества. В ходе бактериального восстановления сульфаты расходуются, что отражается на соотношении их количества по отношению к хлору. Данные табл. 4 свидетельствуют, что содержание всех основных ионов как в плёсах лагуны Озерки, так и в оз. Йоканском практически не изменяется по вертикали, также остается неизменным и близким к морскому отношение SO_4/Cl . Напротив, расход сульфата в процессе сульфатредукции отчетливо выражен в придонных слоях меромиктического озера Трёхцветного, вертикальный профиль концентраций основных ионов которого, полученный в 2022 г., также приведен в табл. 4. В мнимомolimнионе этого водоема, расположенного на Карельском берегу Белого моря недалеко от Беломорской биостанции МГУ им. М.В. Ломоносова, полностью отделившегося от моря 350–400 тыс. лет назад [18], активное микробное восстановление сульфатов ($35 \mu mol S \text{ л}^{-1} \text{ сут}^{-1}$ [25]) приводит к накоплению огромных количеств сероводорода — до 600 мг/л [14]. При этом отчетливо прослеживается и уменьшение сульфат-хлорного коэффициента, отмеченное для этого водоёма также в работах [1, 25]. То, что в анаэробных водах устойчиво стратифицированного кутового плёса лагуны Озерки

Таблица 4. Содержание основных ионов в море, плёсах лагуны Озерки, озёр Йоканское и Трёхцветное в 2022 г.

Место отбора	Глубина, м	Содержание, мг/л					
		Хлорид	Сульфат	Натрий	Калий	Кальций	Магний
Море (Порья Губа)	0.5	14 200	1910	7970	180	594	1250
Лагуна Озерки							
Плес III (Умбский порог)	2	13 400	1790	7700	272	894	1170
	6.5	13 100	1820	7140	250	480	1140
Плес III (Варничный порог)	4	10 700	1530	6310	220	460	1000
	6	13 400	1850	7600	228	518	1210
Плес II	7	14 700	2030	7750	291	503	1230
Плес I	2	11 300	1580	6780	215	521	1080
	6	16 100	2000	8670	264	522	1260
	8	14 900	2050	8150	277	520	1250
Оз. Йоканское	3	13 200	1780	7310	204	636	1130
	5.5	14 700	1410	8060	265	625	1250
	11.5	15 300	2050	8650	232	597	1330
Оз. Трёхцветное	1.5	87	29	62	5	16	14
	2.5	4560	564	2630	79	268	470
	3.5	8370	525	4530	140	324	688
	5	9440	307	5080	157	328	751
	7	10 100	72	5360	159	371	831

и меромиктического озера Йоканского мы не выявили явного расходования сульфатов в ходе бактериального продуцирования сероводорода, свидетельствует о том, что процесс их изоляции от моря далеко не закончен. Все еще возможен заброс в придонные горизонты этих изолированных от моря водоемов свежей морской воды (высокие приливы в сочетании с нагонным ветром), пополняющий запас сульфатов в придонных водах.

ВЫВОДЫ

Установлено, что все исследованные водоемы имеют уникальную гидрологическую и гидрохимическую структуру, формирующуюся на определенном этапе их эволюции по мере усиления их изоляции от моря.

Три плеса лагуны Озерки можно рассматривать как разные стадии изоляции водоемов от моря. Наиболее близкие к морю II и III плесы находятся на ранней стадии отделения и стратификация в них, возможно, имеет сезонный характер. Наиболее сильно вертикальная стратификация вод с развитием всех сопутствующих стагнации явлений, выражена в частях акваторий с наибольшим опреснением поверхностного слоя воды: в I плесе лагуны Озерки и в оз. Йоканском. В их придонных анаэробных водах отмечен повышенный уровень содержания сероводорода и накопление биогенных элементов (фосфатов, кремния, нитритного и аммонийного азота).

Показано, что концентрации всех основных ионов во всех исследованных водоемах, в том числе в дальнем плесе лагуны Озерки и в оз. Йоканском сравнимы с аналогичными параметрами в морской воде и практически не изменяются по вертикали, также как и отношение SO_4/Cl , близкое к морскому.

Установлено, что в наиболее удаленном от моря I плесе лагуны Озерки за прошедшие 90 лет в распределении гидрохимических параметров произошли существенные изменения. Хотя этот водоем не полностью утратил связь с морем, однако, присутствие сероводорода в анаэробной придонной зоне и накопление не только минерального фосфора, но также кремния и аммония, позволяют заключить, что вертикальная стратификация с сульфидной аноксией (эвксинией) в этом водоеме сохраняется не только в течение года, но устойчива уже довольно длительное время. Причиной этого является значительное уменьшение поступления в лагуну свежей морской воды вследствие подъема порогов, отделя-

ющих её от моря и опреснение поверхностного слоя воды.

Благодарности. Авторы признательны администрации Кандалакшского заповедника за возможность работать на его акватории.

Источники финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ проект FUUW-2022-0026 “Изучение закономерностей биогеохимических процессов циклов серы и хлора в экосистемах Европейского Севера России”, № гос. регистрации 122011300473-4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильчук Ю.К., Фролова Н.Л., Краснова Е.Д. и др. Изотопно-геохимический состав воды в меромиктическом озере Трёхцветном на Беломорском побережье // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 5. С. 555–566.
2. Волков И.И. Геохимия серы в осадках океана. М.: Наука, 1984. 272 с.
3. Гурвич Г.С., Соколова Е.В. К познанию реликтовых водоемов Белого моря // Тр. ГГИ. 1939. Вып. 8. № 15. С. 142–161.
4. Иванов В.М. Распространение и геохимическая деятельность бактерий в осадках океана // Океанология. Химия океана. Т. 2. Геохимия донных осадков М.: Наука, 1979. С. 312–349.
5. Иванов М.В., Русанов И.И., Пименов Н.В. и др. Микробные процессы цикла углерода и серы в озере Могильном // Микробиология. 2001. Т. 70. № 5. С. 675–686.
6. Колька В.В., Евзеров В.Я., Мёллер Я.Й. и др. Перемещение уровня моря в позднем плейстоцене – голоцене и стратиграфия донных осадков изолированных озер на южном берегу Кольского полуострова, в районе поселка Умба // Изв. РАН. Серия географ. 2013. № 1. С. 73–88.
7. Колька В.В., Корсакова О.П., Шелехова Т.С. и др. Перемещение береговой линии Белого моря и гляциоизостатическое поднятие суши в голоцене (район поселка Кузема, северная Карелия) // Докл. Акад. наук. 2012. Т. 442. № 2. С. 263–267.
8. Краснова Е.Д., Воронов Д.А., Демиденко Н.А. и др. К инвентаризации реликтовых водоемов, отделяющихся от Белого моря // Комплексные исследования Бабьего моря, полуизолированной беломорской лагуны: геология, гидрология, биота – изменения на фоне трансгрессии берегов (Труды Беломорской биостанции МГУ. Т. 12). М.: Изд-во КМК, 2016. С. 211–241.
9. 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 Кандалакшском берегу Белого моря // Морские исследования и образование (MARESEDU-2019), 2020. С. 310–313.

10. Краснова Е.Д., Воронов Д.А., Фролова Н.Л. и др. Реликтовый водоем в Порьей губе (Белое море, Канда拉克шский залив): что изменилось за последние 90 лет? // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2022. Т. 86. № 6. С. 972–984.
11. Краснова Е.Д., Пантюлин А.Н., Белевич Т.А. и др. Комплексные исследования отделяющихся водоемов на разных стадиях изоляции от Белого моря в марте 2012 г. // Океанология. 2013. Т. 53. № 5. С. 714–717.
12. Краснова Е.Д., Пантюлин А.Н., Маторин Д.Н. и др. Цветение криптофитовой водоросли *Rhodomonas* sp. (Cryptophyta, Pyrenomonadaceae) в редокс зоне водоемов, отделяющихся от Белого моря // Микробиология. 2014. Т. 83. № 3. С. 346–354.
13. Краснова Е.Д. В поисках реликтовой лагуны // Наука и жизнь. 2020. Т. 5. С. 76–80.
14. 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.
15. Лунина О.Н., Саввичев А.С., Бабенко В.В. и др. Сезонные изменения структуры сообщества анаэробных фототрофных бактерий меромиктического озера Трёхцветное (Канда拉克шский залив Белого моря) // Микробиология. 2019. Т. 88. № 1. С. 100–115.
<https://doi.org/10.1134/S0026365619010051>
16. ПНД Ф 14.1:2:4.131-98. Методика выполнения измерения массовых концентраций ионов натрия, калия, магния, кальция, бария и аммония в пробах питьевой, природной и сточной воды методом ионной хроматографии.
17. ПНД Ф 14.1:2:4.132-98. Методика выполнения измерений массовой концентрации анионов: нитрита, нитрата, хлорида, фторида, сульфата и фосфата в пробах природной питьевой и сточной воды методом ионной хроматографии: введен 1998-04-02. Переиздан 2008-01-01. Москва, 2008. 21с.
18. Романенко Ф.А., Шилова О.С. Последнее поднятие Карельского берега Белого моря по данным радиоуглеродного и диатомового анализов озерно-болотных отложений п-ова Киндо // Докл. Акад. наук. 2012. Т. 442. С. 544–548.
19. 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.
20. Саввичев А.С., Лунина О.Н., Русанов И.И. и др. Микробиологические и изотопно-геохимические исследования озера Кисло-Сладкое – меромиктического водоема на побережье Канда拉克шского залива Белого моря // Микробиология. 2014. Т. 83. № 2. С. 191–203.
21. Система Белого моря. Т. 1. / Российская академия наук, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Москва: Научный мир, 2010. 474 с.
22. Современные методы гидрохимических исследований океана. М.: ИОАН СССР, 1992. 200 с.
23. 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.
24. Шапоренко С.И., Корнеева Г.А., Пантюлин А.Н. и др. Особенности экосистем отшнуровывающихся водоемов Канда拉克шского залива Белого моря // Водные ресурсы. 2005. Т. 32. № 5. С. 517–532.
25. Savvichev A.S., Babenko V.V., Lunina O.N. et al. Sharp water column stratification with an extremely dense microbial population in a small meromictic lake Trekhtzvetnoe // Environmental Microbiology. 2018. V. 20. № 10. P. 3784–3797.
<https://doi.org/10.1111/1462-2920.14384>
26. Krasnova E.D., Kharcheva A.V., Milutina L.A. et al. Study of microbial communities in redox zone of meromictic lakes isolated from the White Sea using spectral and molecular methods // Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom. 2015. V. 95. No 8. P. 1579–1590.

THE EVOLUTION OF REDOX CONDITIONS IN STRATIFIED WATER BODIES OF PORIA GUB BAY AND KANDALAKSH COAST OF THE WHITE SEA

N. M. Kokryatskaya^{a,*}, G. N. Losyuk^{a,**}, E. D. Krasnova^b,
S. S. Popov^a, K. V. Titova^a, D. A. Voronov^c

^a N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research UrB RAS, Arkhangelsk

^b M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow

^c Institute for Information Transmission Problems, RAS, Moscow

* e-mail: nkokr@yandex.ru

** e-mail: glosyuk@yandex.ru

The results of hydrochemical studies of water bodies with varying degrees of development of anaerobic conditions (up to the appearance of meromixia with sulfide anoxia) located in the Porya Bay (Kandalaksha Bay of the White Sea, Kandalaksha State Nature Reserve) are presented. It is shown that these reservoirs, which are at different stages of isolation from the sea, have a unique hydrological and hydrochemical structure, which is formed at a certain stage of their evolution. The vertical stratification of waters, with the development of all phenomena accompanying stagnation, is more pronounced in the most distant parts of their water area from the sea, where an increased content of hydrogen sulfide (up to 16.5 mg/l), phosphates, silicon, nitrite and ammonium nitrogen is noted in the near-bottom anaerobic waters. However, the concentrations of all major ions are comparable to those in sea waters and practically do not change vertically. An analysis of the distribution of hydrochemical parameters of the distant reach of the Ozerki lagoon made it possible to conclude that, as a result of changes that have occurred with this reservoir over the past 90 years, it can now most likely be classified as meromictic.

Keywords: White Sea, separating reservoir, stratification, hydrogen sulfide, biogenic element, ionic composition