

МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ОЗЕРА КИСЛО-СЛАДКОГО – ПОЛУИЗОЛИРОВАННОЙ ЛАГУНЫ НА БЕРЕГУ БЕЛОГО МОРЯ

Е.Д. Краснова*, Д.А. Воронов**, М.В. Мардашова***

*Биологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, e_d_krasnova@mail.ru

** Институт физико-химической биологии МГУ им. М.В. Ломоносова и Институт проблем
передачи информации РАН, г. Москва, da_voronov@mail.ru

*** Центр морских исследований МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, buccinum@mail.ru

LONG-TERM DYNAMICS OF THE HYDROLOGICAL STRUCTURE OF LAKE KISLO-SLADKOE – A SEMI-ISOLATED LAGOON ON THE WHITE SEA COAST

E.D. Krasnova*, D.A. Voronov**, M.V. Mardashova*

*Faculty of Biology, Lomonosov Moscow State University, Moscow

**Institute of Physico-Chemical Biology of Lomonosov Moscow State University and Institute for
Information Transmission Problems of Russian Academy of Sciences, Moscow

*** Marine Research Center of Lomonosov Moscow State University, Moscow

Аннотация. В работе обсуждаются результаты начатых в 2010 году наблюдений за изменениями солености и положением редокс-границы в озере Кисло-Сладком – небольшой лагуне, частично изолированной от Белого моря.

Ключевые слова: вертикальная стратификация, мониторинг, соленость, хемоклин, изоляция от моря, Белое море

Введение

При трансгрессии или регрессии моря водные экосистемы испытывают значительные перестройки. Один из регионов, где происходит быстрое поднятие берега и связанные с ним преобразования водных объектов – побережье Белого моря. В результате постгляциального подъема многие заливы, один за другим, отделяются от моря и постепенно превращаются в пресные водоемы, и здесь их можно найти на любых стадиях изоляции. Это дает возможность реконструировать экологическую сукцессию, прежде не описанную. На промежуточной стадии водоем превращается в меромиктический – с соленой водой внизу, которая перекрыта разбавленной морской водой, минерализация которой постепенно уменьшается вплоть до полного опреснения.

Один из таких водоемов – озеро Кисло-Сладкое (66°32'54"; 33°08'05") в 1,5 км к востоку от Беломорской биологической станции (ББС) МГУ им. М.В. Ломоносова (пос. Приморский, Лоухский р-н, Республика Карелия) с площадью зеркала 1,6 га и максимальной глубиной 4,5 м. В типологическом ряду разных стадий изоляции этот водоем находится близко к началу. Уровень озера на 40 см поднят над уровнем моря [1], поэтому в летнее время морская вода по-

ступает только во время сизигийных приливов. Зимой водоем может оказываться в полной изоляции от моря из-за ледового барьера.

В окрестностях ББС МГУ озеро Кисло-Сладкое было первым исследованным водоемом из числа отделяющихся от Белого моря [4, 5]. Верхний поверхностный слой озера тогда был опреснен, под ним располагался более соленый, а ниже узкого (всего 15-20 см) хемоклина залегала холодная глубинная вода с соленостью выше, чем в море, и насыщенная сероводородом. Озеро было квалифицировано как меромиктическое.

Постоянные наблюдения за этим водоемом проводятся на базе Беломорской биостанции МГУ им. М.В. Ломоносова с 2010 года. В данной статье мы подводим некоторые итоги 10 лет наблюдений за гидрологической структурой озера.

Объекты и методы

Измерения физико-химических параметров в оз. Кисло-Сладком производили в одной и той же точке – над самой большой глубиной. В летнее время измерения проводили ежемесячно, а иногда и несколько раз в месяц, и несколько раз за ледовый период. Соленость и температуру на разной глубине определяли *in situ* зондами WTW Cond 197i или YSI Pro, либо в пробах, отобранных с помощью погружного насоса Whale Premium Submersible Pump GP1352, прямо в ходе их отбора. Границу сероводорода определяли по запаху в комплексе с определением окислительно-восстановительного потенциала портативным прибором WaterLiner WMM-73.

Результаты и обсуждение

Озеро соединяется с морем через каменистый порог, по которому большую часть времени идет сток из озера, а в сизигию на самой высокой фазе прилива вода течет из моря в озеро. Количество поступившей свежей морской воды обычно не настолько велико, чтобы нарушить стратификацию. Интрузионные линзы поступают на глубину с равной себе плотностью, которая летом соответствует слоям, расположенным выше хемоклина. Однако поздней осенью и в начале зимы, когда море охлаждается до отрицательных температур, и со стороны моря могут приходиться водные массы с повышенной соленостью, поступающая морская вода опускается на дно и может вытеснить придонную воду – происходит промывка водоема. Это случается не каждый год, а при сочетании обстоятельств, которые складываются примерно раз в два года. В обычные годы к моменту ледостава, который защищает водоем от забросов из моря, в озере сохраняется стратификация, которая установилась летом. Эти два противоположных сюжета чередуются, и в озере наблюдалась двухгодичная квазициклическая с сохранением стратификации на протяжении двух лет и зимней промывкой раз в два года (табл. 1).

В летнее время озеро Кисло-Сладкое всегда стратифицировано. Верхний пикноклин расположен в пределах одного метра глубины. Он отделяет миксолимнион – опреснённый слой, сформированный при таянии льда и снега на во-

досборном бассейне, от нижележащей солёной воды. Аналогичный механизм лежит в основе формирования меромиксии в соленых озерах Хакасии [3].

Таблица 1

Периодичность зимних промывок озера Кисло-Сладкого в 2012-20 гг. и формирование следующим летом слоя с массовым развитием криптофитовых жгутиконосцев *Rhodomonas sp.*

Год (зима)	2011/ 2012	2012/ 2013	2013/ 2014	2014/ 2015	2015/ 2016	2016/ 2017	2017/ 2018	2018/ 2019	2019/ 2020
Была ли промывка	+	–	Частичная	–	+	Частичная	–	+	+
Красный слой с <i>Rhodomonas sp.</i>	–	+	+	+	–	+	+	–	

Однако в прибрежных беломорских озерах есть еще и второй (нижний) пикноклин, плотностной скачок в котором обусловлен сохранением в донном углублении холодной воды от предыдущего зимнего заброса с повышенной соленостью, обогащенной рассолом, который образуется при замерзании морской воды и концентрируется возле дна. С этим пикноклином примерно совпадает хемоклин – зона перехода редокс-потенциала от положительных к отрицательным значениям. Различия в химизме обусловлены активностью микроорганизмов: в среднем слое воды застой благоприятствует массовому развитию фитопланктона и активному кислородному фотосинтезу, обогащающему воду кислородом вплоть до 300% насыщения, тогда как в нижнем слое в условиях аноксии и накопления органических осадков на дне происходит бактериальная сульфатредукция. На границе этих контрастных слоев в оз. Кисло-Сладком нередко возникает прослойка воды красного цвета с массовым развитием криптофитовых жгутиконосцев *Rhodomonas sp.* [6], численность которых может быть столь велика, что квалифицируется как гиперцветение. Однако в этом отношении озеро Кисло-Сладкое нестабильно: после зимних промывок в следующем вегетационном сезоне слой с криптофитовыми не образуется (табл. 1).

Сообщества разных слоев различаются не только микроорганизмами, но и макрофауной. Верхний слой омывает мелководья, фауна которых представляет собой несколько обедненную фауну морской литорали, но при этом обогащенную за счет личинок насекомых, главным образом – двукрылых [2]. Средний слой воды контактирует с более глубокими участками, где доминирует два вида морских гидробионтов (брюхоногие моллюски *Hydrobia ulvae* и олигохеты *Tubificoides benedeni*) и личинки *Chironomus gr. salinarius* с широким диапазоном толерантности к солености, и эти виды достигают очень высокой биомассы, превышающей таковую на соседних морских акваториях.

Средняя численность бентоса составляла 4100 ± 800 экз./м², в основном за счет гидробий (78%) и *Ch. gr. salinarius* (13%). Биомасса составляла 50 ± 10 г/м²; на глубинах до 3 м более 90% биомассы приходилось на гидробий, глубже больший вклад начинают вносить *Ch. gr. salinarius*, а в отдельные годы и *T. benedeni*.

В нижнем анаэробном слое в живом состоянии встречаются лишь единичные особи устойчивых к сероводороду нематод.

Условия обитания на разной глубине различаются не только по кислородному режиму, но и по диапазону изменчивости физико-химических параметров.

Поверхностный слой воды испытывает наибольшие сезонные колебания всех параметров, в том числе – солености (табл. 2). Соленость в нём минимальна сразу после таяния льда и поступления талых вод с водосбора, в течение лета она обычно постепенно увеличивается. В дождливые периоды соленость в поверхностном слое может на некоторое время заметно уменьшаться. Максимальные значения солености в этом слое зарегистрированы после зимних промывок. На глубине 1 м сезонный и многолетний ход солености такой же, как на поверхности, но с несколько меньшим размахом (рис. 1). За счет меньшего влияния опреснения средняя соленость на этой глубине больше, чем у поверхности. На глубинах 2 м, 3 м и 4 м колебания солености небольшие, это ослабленное отражение тех колебаний, что происходят наверху. Наибольшей стабильностью характеризуется придонный слой, где за последние 10 лет соленость никогда не опускалась ниже 22‰.

Таблица 2

Диапазон солености на разной глубине оз. Кисло-Сладкого

Глубина/ показатель	Соленость, ‰		
	min	max	средняя
0 м	3,7	28,2	16,3
1 м	10,0	29,1	21,9
2 м	21,2	29,5	24,9
3 м	22,0	29,5	25,0
4 м	22,0	29,6	25,5
В море	19,1	28,0	24,9

Положение редокс-границы в этом водоеме зависит от зимних промывок и от сезона (рис. 2). На следующий сезон после промывок мощность сероводородного слоя меньше, чем после зимней изоляции, и хемоклин обычно формируется на полметра глубже. При особенно интенсивных промывках сероводородный слой может полностью исчезнуть, и весь водоем оказывается заполненным водой с отрицательной температурой, насыщенной кислородом водой и с высокой соленостью. Наоборот, в момент в нижней части водоема остается положительной, сероводород поднимается до самого льда или почти до него; после схода льда хемоклин оказывается в новом положении, обычно чуть выше, чем в предыдущий сезон.

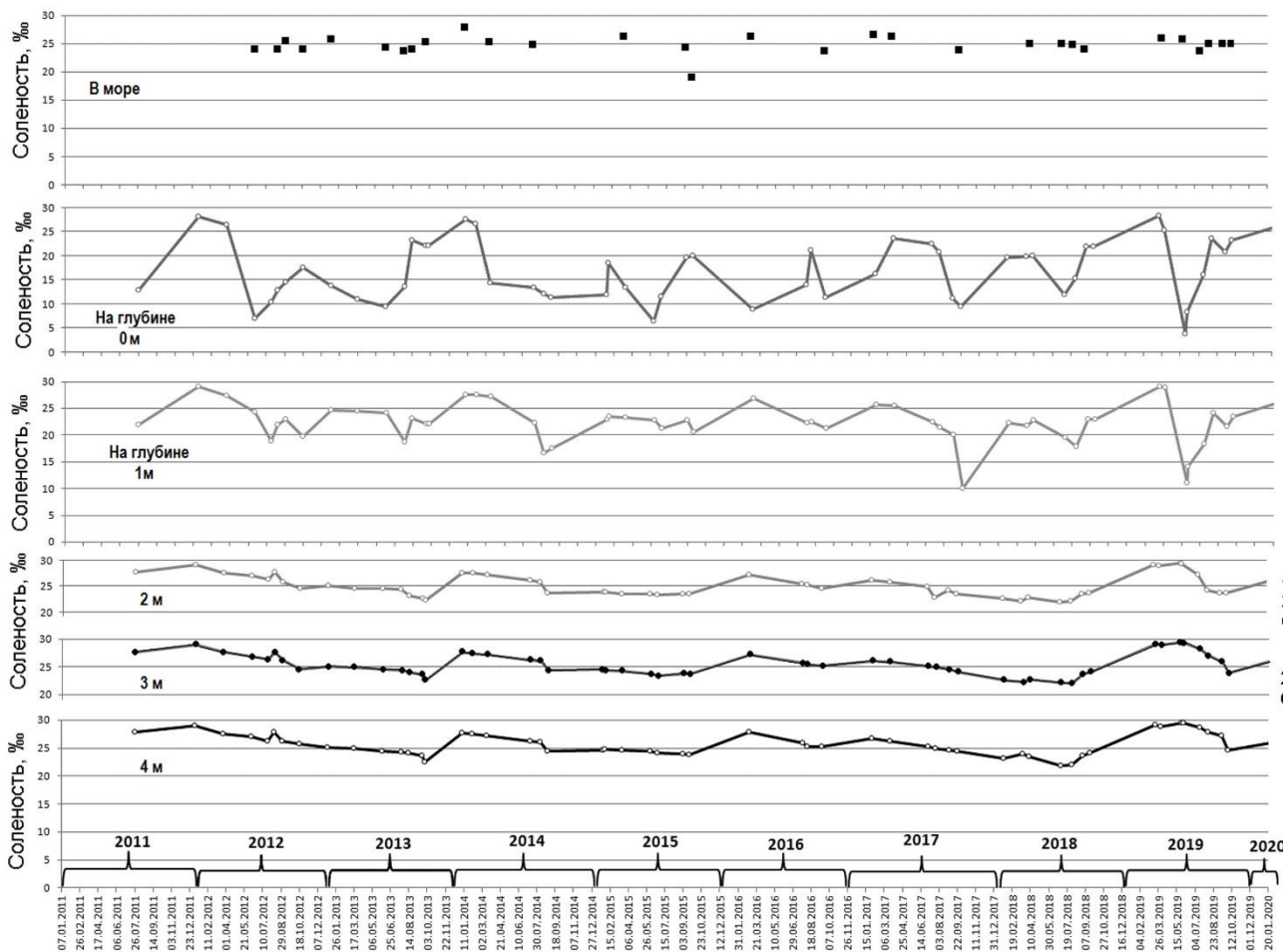


Рис. 1. Соленость воды на разной глубине оз. Кисло-Сладкого в 2011-2020 гг.

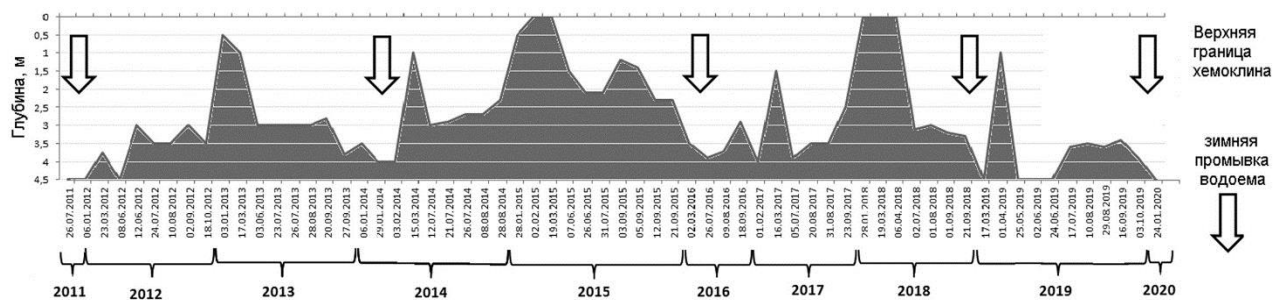


Рис. 2. Динамика верхней границы распространения сероводорода в 2011-2020 гг.

Выводы

1. Вертикальная гидрологическая структура оз. Кисло-Сладкого в летнее время включает миксолимнион мощностью 0,5-1 м, застойную соленую аэробную зону с активным кислородным фотосинтезом и нижнюю анаэробную зону с повышенной соленостью, разделенные двумя переходными зонами: галоклином и хемоклином.
2. Диапазон сезонных колебаний солености уменьшается от поверхности ко дну.

3. Наибольшей стабильностью характеризуется придонный анаэробный слой, где за последние 10 лет соленость никогда не опускалась ниже 22‰.
4. Зимние промывки водоема нарушают стратификацию со средней периодичностью раз в два года.
5. В следующем за зимней промывкой сезоне слой с массовым развитием криптофитовых жгутиконосцев *Rhodomonas* не возникает.

Благодарности

Работа поддержана РФФИ (грант №19-05-00377).

Литература

- [1] 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, 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.
- [2] Мардашова М.В., Воронов Д.А., Краснова Е.Д. Характеристика бентосных сообществ отделяющихся водоемов окрестностей ББС МГУ (Кандалакшский залив Белого моря). // Зоологический журнал. — В печати.
- [3] Рогозин Д.Ю. Меромиктические озера Северо-Минусинской котловины: закономерности стратификации и экология фототрофных серных бактерий. — Красноярск: Изд-во ИФ СО РАН, 2019. 241 с.
- [4] Шапоренко С.И. Гидролого-гидрохимическая характеристика отшнуровывающихся водоемов района ББС (Кандалакшский залив Белого моря). // Труды Беломорской биологической станции, 2003. Т. 9. С. 184–190.
- [5] Шапоренко С.И., Корнеева Г.А., Пантюлин А.Н., Перцова Н.М. Особенности экосистем отшнуровывающихся водоемов Кандалакшского залива Белого моря // Водные ресурсы, 2005. Т. 32. № 5. С. 517–532.
- [6] Krasnova E.D., Kharcheva A.V., Milutina I.A., Voronov D.A., Patsaeva S.V. 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, special issue – EMBS European Marine Biology Symposium. 2015. 95 (8). Pp. 1579-1590.

S u m m a r y. The paper examines the results of observations on salinity and the position of the redox boundary in the Kislo-Sladkoye lake, a small lagoon partially isolated from the White Sea, beginning with 2010.

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. А.И. ГЕРЦЕНА
ФАКУЛЬТЕТ ГЕОГРАФИИ
НОЦ «ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ»
ИНСТИТУТ ОЗЕРОВЕДЕНИЯ РАН
РУССКОЕ ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО

RUSSIAN STATE PEDAGOGICAL UNIVERSITY OF A.I. HERZEN
FACULTY OF GEOGRAPHY
REC «ECOLOGY AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT»
LIMNOLOGY INSTITUTE OF RAS
RUSSIAN GEOGRAPHIC SOCIETY

**География:
развитие науки и образования
Geography: Development of
Science and Education**

I

Коллективная монография
по материалам ежегодной международной научно-практической
конференции LXXIII Герценовские чтения 22-25 апреля 2020 года

Collective monograph
on the materials of Scientific-Practical Conference
LXXIII Herzen readings 22-25 April 2020

Санкт-Петербург
2020

Рецензенты:

Д.В. Севастьянов, Ал.А. Григорьев

Ответственные редакторы:

С.И. Богданов, Д.А. Субетто, А.Н. Паранина

Редакционная коллегия:

*Д.А. Гдалин, Ю.Н. Гладкий, С.В. Ильинский, В.Ф. Куликов, С.И. Махов, Л.Г. Мачавариани,
В.Г. Мосин, Е.М. Нестеров, Л.А. Пестрякова, В.Д. Сухоруков*

Техническое редактирование:

*А.С. Баранов, М.А. Бахир, В.В. Брылкин, И.М. Греков, А.А. Дмитриева, Ю.А. Кублицкий,
М. Морозова, Р. Паранин, А.Н. Паранина*

География: развитие науки и образования. Том I. Коллективная монография по материалам ежегодной международной научно-практической конференции LXXIII Герценовские чтения, Санкт-Петербург, РГПУ им. А.И. Герцена, 22-25 апреля 2020 года / Отв. ред. С.И. Богданов, Д.А. Субетто, А.Н. Паранина. – СПб: Астерион, Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2020. – 498 с.

Geography: development of science and education. Part I. Collective monograph on materials of the scientific and practical conference LXXIII Gertsenovskiy readings, St. Petersburg, RSPU of A.I. Herzen, on April 22-25, 2020 / by ed. S.I. Bogdanov, D.A. Subetto, A.N. Paranina. – St. Petersburg: Asterion, Publ. house of Herzen State Pedagogical University of Russia, 2020. – 498 p.

Коллективная монография «География: развитие науки и образования» отражает результаты работы научно-практической конференции 73 Герценовские чтения, посвященной важной географической дате – 200-летию открытия Антарктиды экспедицией Ф.Ф. Беллинсгаузена и М.П. Лазарева, а также людям, связанным с историей герценовского университета:

150-летию со дня рождения Э.Ф. Лесгафта, 145-летию со дня рождения Г.Г. Шенберга, 140-летию со дня рождения В.Н. Сукачева; 130-летию со дня рождения Б.Н. Городкова, 130-летию со дня рождения В.Н. Васильева, 120-летию со дня рождения А.Д. Гожева, 110-летию со дня рождения А.В. Даринского, 110-летию со дня рождения В.Г. Махлаева, 105-летию со дня рождения П.Г. Сутягина, 100-летию со дня рождения Ю.Д. Дмитриевского, 90-летию со дня рождения Е.В. Максимова, 90-летию со дня рождения И.В. Игнатенко, 90-летию со дня рождения Д.П. Финарова.

Материалы монографии сгруппированы в два тома. Том I включает вступительную теоретическую главу и разделы: 1. физическая география: направления, методы и междисциплинарные исследования; 2. полярные исследования и пути освоения Арктики и Антарктики; 3. современные проблемы теоретической и прикладной лимнологии и гидрологии; 4. эволюционная и историческая география, ритмика процессов и явлений. Том II включает разделы: 1. геоэкология, природопользование и охрана окружающей среды; 2. социально-экономические системы и географические аспекты глобализации; 3. развитие географического образования; 4. регионоведение, краеведение, туризм, природное и культурное наследие.

Материалы публикуются в авторской редакции

ООО «Астерион»

ISBN 978-5-00045-867-9 (общий)

ISBN 978-5-00045-868-6 (1 том)

Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена

ISBN 978-5-8064-2885-2

© Издательство «Астерион», 2020

© Издательство РГПУ им. А. И. Герцена, 2020

© Институт озероведения РАН, 2020

© РГО, 2020

© Авторы статей, 2020