СТРУКТУРА И ДИНАМИКА ФИТОПЛАНКТОНА ОЗЕРА КИСЛО-СЛАДКОЕ, ЧАСТИЧНО ИЗОЛИРОВАННОГО ОТ БЕЛОГО МОРЯ, В НАЧАЛЬНОЙ ФАЗЕ ИЗОЛЯЦИОННОЙ СУКЦЕССИИ

Иванова Д.А., Краснова Е.Д., Воронов Д.А., Радченко И.Г.

МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Введение. Кисло-Сладкое озеро является одним из меромиктических водоёмов, обнаруженных в окрестностях Беломорской биологической станции им. Н. А. Перцова (66°32′54”N, 33°08′05”E). Раньше оно было морским заливом, имеющим более глубокую центральную часть и отмели по краям, поэтому по мере постгляционального поднятия суши залив стал отделяться от Белого моря (Краснова, 2016). Сейчас это частично изолированный водный объект, то есть заплески беломорской воды происходят только в сизигию (Краснова и др., 2016). Опреснение поверхностного слоя происходит за счёт таяния льда, солёность которого меньше, чем солёность морской воды, и талых вод с водосбора, некоторый вклад вносит ручей, впадающий в Кисло-Сладкое озеро, а также дожди. Разница в солёности и, следовательно, в плотности воды по вертикали делает невозможным перемешивание водной толщи в летний сезон. Поздней осенью или в начале зимы иногда случается заброс большого количества холодной морской воды, что приводит к промывке водоёма. За последние 10 лет в озере наблюдалась двухгодичная квазицикличность с сохранением стратификации на протяжении двух лет и промывкой раз в два года. Изоляция и специфические гидрологические условия приводят к развитию биоты, отличной от беломорской. Исследования сукцессии фитопланктона в частично изолированных от Белого моря озёрах ранее не проводились. Настоящая работа посвящена исследованию динамики ледовых водорослей и фитопланктона в озере Кисло-Сладкое после промывки зимой 2018/19 гг. и представляет собой результаты качественного и количественного анализа ледовой флоры и фитопланктона в ледовый период (17.03.19, 01.04.19) и фитопланктона – после схода ледового покрова (25.05.19, 12.06.19), а также их анализ на основании физико-химических показателей.

Материалы и методы. Для исследования ледовых водорослей на одной станции Кисло-Сладкого озера отбирали керны льда с помощью ледовой пилы. Нижнюю 10-сантиметровую часть керна помещали в пластиковую ёмкость и растапливали при комнатной температуре. Пробу растаявшего льда (440-867 мл) фиксировали раствором формалина с конечной концентрацией 2%. Для исследования фитопланктона отбирали пробы воды объёмом около 2 л с нескольких горизонтов с помощью погружного насоса Whale Premium Submersible Pump GP1352 (США) и фиксировали формалином с конечной концентрацией 2%. Одновременно на разной глубине измеряли температуру и солёность (кондуктометром YSI Pro), содержание растворённого в воде кислорода (оксиметром YSI Pro ODO) и освещённость (бытовым люксметром AR813A, модифицированным для погружения под воду). Пробы концентрировали методом обратной фильтрации (диаметр пор 2 мкм). Все пробы просчитывали под микроскопом МИКМЕД-1 (ЛОМО, Россия) при увеличении x300 и с водной иммерсией при увеличении x600 в камере Нажотта (объём 0,05 мл). Просчитывали по 3-4 камеры для каждой пробы. Водоросли по возможности определяли до вида или рода. Для верификации видовой принадлежности диатомовые водоросли просматривали под электронным микроскопом (CAM-Scan). Расчёт биомассы в единицах углерода проводили по объёмам клеток, используя геометрическое подобие (Menden-Deuer, Lessard, 2000).

Результаты и обсуждение. Зимой 2018/2019 гг. в оз. Кисло-Сладкое произошла промывка в результате поступления в него из моря большого объёма воды с необычно высокой для этого района солёностью. Солёность воды во всей толще озера в марте превысила 28‰. В апреле

лёд начал подтаивать, что привело к уменьшению солёности подлёдного слоя и увеличению в нём содержания кислорода. Температура воды и в марте, и в апреле была отрицательной по всему столбу, с минимумом в зоне контакта воды со льдом. В марте вся толща воды была аэробной (начиная с 1 м – микроаэробной), а в апреле ниже 1 м сложились заморные условия, что подтверждалось отрицательным ОВП.

Всего во льду и в планктоне обнаружен 51 таксон водорослей, из них 26 – определены до вида или рода и принадлежали Bacillariophyta (19), Dinophyta (4), Chlorophyta (2), Cyanobacteria (1). Часть неидентифицированных клеток была отнесена к группе фототрофных коккоидных и жгутиковых видов (НКЖ), часть – к гетеротрофным жгутиковым, вероятно, эвгленовым и криптофитовым.

Наибольшая суммарная биомасса водорослей отмечалась во льду (табл. 1), в подлёдном планктоне она была значительно ниже и уменьшалась с глубиной. В марте во льду доминировали гетеротрофные жгутиковые и фототрофная пеннатная диатомовая водоросль *Navicula septentrionalis*. К началу апреля биомасса ледовых водорослей выросла больше чем в 60 раз, а доминирующим наряду с высоким обилием *N. septentrionalis* стал ледовый вид *Nitzschia frigida*. Фототрофная пеннатная диатомовая водоросль *N. frigida* присутствовала во льду и в марте, но высокого обилия не достигала.

Табл. 1. Суммарная биомасса (*B*) и доминирующие виды водорослей во льду и толще воды

Биотоп, глубина горизонта	*B*, мг С/м^3	Доминирующие виды, величина вклада в суммарную биомассу (%)
17.03.2019		
Лёд	12,99	Гетеротрофные жгутиковые (56), *Navicula septentrionalis* (18)
Вода, 0,5 м	5,84	*Micracanthodinium claytonii* (43), *Nitzschia frigida* (14)
Вода, 2,5 м	1,08	НКЖ (47), spp. (Cryptophyta) (26)
Вода, 3,5 м	2,62	*Peridiniella danica* (29), spp. (Cryptophyta) (26), НКЖ (22)
01.04.2019		
Лёд	791,49	*N. frigida* (68), *N. septentrionalis* (18)
Вода, 0,5 м	73,26	*N. frigida* (36), *N. septentrionalis* (33), *Chaetoceros* sp. (25)
Вода, 2,5 м	5,92	*N. frigida* (52), *N. septentrionalis* (26)
Вода, 3,5 м	0,51	*N. frigida* (34), *N. septentrionalis* (33), НКЖ (25)

Биомасса подлёдного фитопланктона также увеличилась с середины марта к началу апреля, при этом изменился состав доминирующих видов: в середине марта преобладали гетеротрофные динофлагелляты *Micracanthodinium claytonii, Peridiniella danica* и бесцветные криптофитовые водоросли, а также фототрофные НКЖ. В апреле в подлёдном планктоне так же, как и во льду, основную массу составляли *N. frigida, N. septentrionalis*, которые, по-видимому, поступали в толщу воды изо льда, и планктонная одиночная диатомовая водоросль *Chaetoceros sp.* Это характерно для начала весеннего подлёдного цветения в арктических морях (Leu et al., 2015). НКЖ были обильны только в придонном слое.

Биомасса ледовых водорослей была либо близка к значениям, полученным раннее в близлежащей морской акватории, либо превышала таковые, либо была значительно ниже Житина, Фёдоров, 2003; Ратькова и др., 2004; Ильяш и др., 2012; Кудрявцева и др., 2017). Обилие водорослей в подлёдном фитопланктоне озера в апреле было значительно выше такового, полученного в проливе Великая Салма (Ильяш и др., 2012), однако высокие биомассы наблюдали ранее в других районах Белого моря, например, в губе Чупа в 2002 г. (Ратькова и др., 2004). Пространственно-временная изменчивость обилия ледовых водорослей

и подлёдного фитопланктона характерна для арктических морей (Leu et al., 2015). Уменьшение обилия гетеротрофных форм с марта по апрель обусловлено увеличением падающей радиации и, соответственно, улучшением световых условий для фототрофных водорослей.

25 мая 2019 г. температура воды снижалась равномерно с глубиной от 10,8 до 2,6°С, а 12 июня её ход был аналогичным, но значения были выше в среднем на 3,6°С. Верхний метровый слой озера был опреснён до 8-9‰, а, начиная с 1,5 м, до дна солёность составляла около 28-29‰ и превышала значения в море. Эти данные показывают, что в мае в озере Кисло-Сладкое установилась стратификация водного столба, вызванная опреснением поверхностного слоя. Водная толща до дна была насыщена кислородом, и его содержание в большинстве случаев превышало 20 мг/л. Освещённость значительно снижалась в первых 0,5 м, а далее до дна держалась на относительно невысоком уровне.

В период после схода льда был определен 41 таксон водорослей, к принадлежали Bacillariophyta (18), Dinophyta (5), Cyanobacteria (15), Chlorophyta (1), Ebriidae (1) и Dictyochophyceae (1).

Суммарная биомасса фитопланктона 25 мая изменялась с глубиной неравномерно и, соответствуя весеннему цветению (Кокин и др., 1970), варьировала от 463 мг С/м^3 до 2,29 г С/м^3 с максимумом на 2,5 м. Фитопланктон был представлен большей частью морскими формами. Основу суммарной биомассы во всей толще воды составляла морская водоросль *Chaetoceros. invisibilis*, достигавшая высокого обилия даже в опреснённом слое. Высокое обилие водоросли способствовало обогащению водной толщи кислородом. Этот вид описан недавно (Gogorev, 2003) и был обнаружен только в Белом и Карском морях (Ратькова и др., 2004; Gogorev et al., 2016). В Белом море встречался в губе Чупа Кандалакшского залива в апреле-мае при температуре воды 3-5°С и ниже и солёности 25-27‰ (Диатомовые водоросли…, 2006). Высокая биомасса данного вида в озере Кисло-Сладкое в мае 2019 г. является результатом отсутствия лимитирования освещённостью и, вероятно, биогенными элементами. Максимум биомассы *C. invisibilis* приходился на более глубокие слои (начиная с 2,5 м), где солёность воды составляла около 29,5‰, а температура – 2,6-4,5°С. Эти физико-химические параметры воды, по-видимому, были оптимальными для данного вида. Скорее всего, границы солёности и температуры, при которых может расти *C. invisibilis,* шире описанных ранее. Есть вероятность, что *C. invisibilis* более широко распространён в Белом море, однако из-за мелких размеров не замечается исследователями при просмотре в световом микроскопе.

12 июня суммарная биомасса водорослей равномерно увеличивалась от поверхности ко дну – от 5,72 до 104,97 мг С/м^3 соответственно. Произошла смена видового состава фитопланктона, хотя *C. invisibilis* продолжал быть одним из субдоминантов почти на всех изучаемых горизонтах. На поверхности доминировали пресноводные *Microcystis ichtyoblabe* и *Cyclotella choctawhatcheeana*, вероятно, привнесённые впадающим в озеро ручьём. Глубже преобладали морские гетеротрофные виды *Ebria tripartita, Oblea rotunda, Micracanthodinium claytonii, Gyrodinium fusiforme* и фототрофный вид *Gymnodinium arcticum* (табл. 2). Суммарная биомасса фитопланктона значительно уменьшилась по сравнению с майскими показателями, в среднем в 45 раз, что предположительно связано с лимитированием биогенными элементами, концентрация которых в озере могла упасть после цветения *C. invisibilis.* С этим может быть связано и появление миксотрофных и гетеротрофных форм, которые активно питались автотрофными водорослями.

Табл. 2. Суммарная биомасса (*B*) и доминирующие виды водорослей на разных горизонтах оз. Кисло-Сладкое 12 июня 2019 г.

Глубина горизонта, м	*B*, мг С/м^3	Доминирующие виды, величина вклада в суммарную биомассу (%)
0,5	5,72	*Microcystis ichtyoblabe* (15), НКЖ 8μ*8μ (13), *Cyclotella choctawhatchee-ana* (12), *Chaetoceros invisibilis* (10)
1,5	28,47	*Oblea rotunda* (35), *Ebria tripartita* (22), *Gyrodinium fusiforme* (12)
2,5	30,94	*Ebria tripartita* (24), *Oblea rotunda* (12), *Chaetoceros invisibilis* (11)
3,5	70,81	*Ebria tripartita* (36), *Chaetoceros invisibilis* (29), *Gymnodinium arcticum* (14), *Micracanthodinium claytonii* (11)
4,3	104,97	*Ebria tripartita* (33), *Chaetoceros invisibilis* (14)

Выводы. 1) Развитие ледовых водорослей и подлёдного фитопланктона в Кисло-Сладком озере в марте-апреле происходило аналогично таковому морской акватории, что соответствует начальной, морской стадии изоляционной сукцессии. **2)** После схода ледового покрова в мае 2019 г. установилась стратификация водного столба с опреснённым верхним слоем, однако фитопланктон в озере был представлен в основном морскими формами со значительным преобладанием редко встречаемой в Белом море водоросли *C. invisibilis*, что соответствует началу изоляционной сукцессии в озере. **3)** Развитие солёностной стратификации привело в июне к расслоению сообществ фитопланктона. В поверхностном, опреснённом слое воды начали развиваться пресноводные фототрофные водоросли, в подповерхностных слоях развивались морские водоросли с преобладанием гетеротрофных и миксотрофных форм.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 19-05-00377).

Литература:

[1] *Житина Л.С., Федоров В.Д.* Ледово-планктонные водоросли прибрежья Белого моря // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 16. Биология. – 2003. – № 1. – С. 24-31.

[2] Диатомовые водоросли России и сопредельных стран: ископаемые и современные. Т II, вып. 4 / ред. Н. И. Стрельникова. – СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2006. – 180 с.

[3] *Ильяш Л. В., Житина Л. С., Кудрявцева В. А., Мельников И. А.* Сезонная динамика видового состава и биомассы водорослей в прибрежных льдах Кандалакшского залива Белого моря // ЖУРНАЛ ОБЩЕЙ БИОЛОГИИ. – 2012. – Т. 73, № 6. – С. 461-472.

[4] *Кокин К.А., Кольцова Т.И., Хлебович Т.В.* Состав и динамика фитопланктона Карельского побережья Белого моря // Ботанический журн. – 1970. – Т. 55, № 4. – С. 499-509.

[5] *Краснова Е.Д.* Как морские заливы превращаются в пресные озера. В кн.: Природное и культурное наследие Белого моря: перспективы сохранения и развития, материалы III междунар. науч.-практ. конф., Чупа. – 2016. – С. 30-34.

[6] *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.

[7] *Кудрявцева В.А., Белевич Т.А., Житина Л.С.* Видовой состав диатомовых водорослей во льду пролива Великая Салма Белого моря перед весенним цветением // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 16. Биология. – 2017. – Т. 72, № 2. С. 63-69.

[8] *Ратькова Т.Н., Сажин А.Ф., Кособокова К.Н.* Одноклеточное население беломорской пелагиали подо льдом в ранне-весенний период // Океанология. – 2004. – Т. 44, № 2. – С. 259-266.

[9] *Gogorev R.M.* A new Chaetoceros species (Bacillariophyta) from Plankton of the Russian Arctic seas and its comparison with species of the section Simplicia // Бот. журн. – 2003. – Vol. 88, № 4. – P. 82-100.

[10] *Gogorev R.M., Samsonov N.I.* The genus Chaetoceros (Bacillariophyta) in Arctic and Antarctic // Novosti Sist. Nizsh. Rast. – 2016. – Vol. 50. – P. 56-111.

[11] *Leu, E., Mundy C.J., Assmy P., Campbell K., Gabrielsen T.M., Gosselin M., Juul-Pedersen T., Gradinger R.* Arctic spring awakening – Steering principles behind the phenology of vernal ice algal blooms // Prog. Oceanogr. – 2015.

[12] *Menden-Deuer S., Lessard E.J.* Carbon to volume relationships for dinoflagellates, diatoms, and other protist plankton // Limnol. Oceanogr. – 2000. – Vol. 45, № 3. – P. 569-579.

IX Международная научно-практическая конференция

«Морские исследования и образование»

IX International conference
«Marine Research and Education»

MARESEDU-2020

ТРУДЫ КОНФЕРЕНЦИИ / CONFERENCE PROCEEDINGS
Том I (III) / Volume I (III)

26-30 октября 2020 г.

УДК [551.46+574.5](063)

ББК 26.221я431+26.38я431+28.082.40я431

Т78

Труды IX Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2020)» Том I (III): [сборник]. Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2020, 362 с.: ISBN 978-5-6045536-3-3.

Сборник «Труды IX Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2020)» представляет собой книгу тезисов докладов участников конференции, состоящую из трех томов. Сборник включает в себя главы, соответствующие основным секциям технической программы конференции: океанология, гидрология, морская геология, морская биология, геофизические исследования на акваториях, геофизика, рациональное природопользование и подводное культурное наследие.

Все тезисы представлены в редакции авторов.

В рамках конференции участники обсудили состояние и перспективы развития комплексных исследований Мирового океана, шельфовых морей и крупнейших озер, актуальные проблемы рационального природопользования и сохранения биоразнообразия в водных пространствах, проблемы освоения ресурсов континентального шельфа, достижения науки в области морской геологии, современные подходы к исследованиям обширных акваторий дистанционными методами, проблемы устойчивого развития экосистем моря и прибрежной зоны, организацию и проведение комплексных экспедиционных исследований, преподавание «морских дисциплин», вопросы организации полевых практик студентов.

Мероприятия проведено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект №20-05-22025.

Подготовлено к выпуску издательством ООО «ПолиПРЕСС» по заказу ООО «Центр морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова».

ООО «ПолиПРЕСС»

170041, Россия, г. Тверь, Комсомольский пр-т, д. 7, пом. II polypress@yandex.ru

ООО «Центр морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова».

РФ, 119234, г. Москва, ул. Ленинские Горы, д. 1, стр. 77

(495) 648-65-58/ 930-80-58

Все права на издание принадлежат ООО «Центр морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова».

© ООО «Центр морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова», 2020
© ООО «ПолиПРЕСС»