

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАТОМЕЙ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕРА КИСЛО-СЛАДКОЕ, КАРЕЛЬСКИЙ БЕРЕГ БЕЛОГО МОРЯ

О.С. Шилова, Е.Д. Краснова, Т.Ю. Репкина

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия,
o.olyunina@mail.ru*

SPATIAL DISTRIBUTION OF DIATOMS IN THE BOTTOM SEDIMENTS OF LAKE KISLO-SLADKOE ON THE KARELIAN COAST OF WHITE SEA

O.S. Shilova, E.D. Krasnova, T.Yu. Repkina

Lomonosov Moscow State University, Moscow

Аннотация. Изучено распределение диатомей в поверхностных осадках и колонке донных отложений меромиктического озера Кисло-Сладкое. Изменение диатомовых ассоциаций в колонке отражает изоляцию лагуны от моря и превращение ее в меромиктический водоем. Пространственное распределение диатомей в поверхностных осадках неоднородно и определяется стратификацией водоема и характером донного грунта.

Ключевые слова: диатомеи, меромиктические озера, донные отложения, Белое море.

Введение

Данная работа выполнена в рамках исследования диатомовых ассоциаций в донных отложениях меромиктических озер, расположенных в окрестностях Беломорской биостанции МГУ имени Н.А. Перцова, начатого в 2018 году [5, 6]. Основными задачами исследования являются: 1) характеристика пространственного распределения диатомей в поверхностных отложениях современных меромиктических озер, как наименее изученного звена в генетическом ряду залив – пресное озеро; 2) определение особенностей изменений диатомовых ассоциаций в донных отложениях при изоляции водоемов от моря и выявление критериев для разных стадий изоляции, которые могут быть использованы в палеолимнологических исследованиях.

Объекты и методы

Оз. Кисло-Сладкое (66°32'54"с.ш., 33°08'05"в.д.) расположено в 1,5 км к востоку от Беломорской биостанции МГУ. Длина озера 196 м, ширина 147 м, максимальная глубина 4,2 м. Озеро образовалось в результате отделения морского залива, отгороженного от основной акватории островом. Одна из перемычек, соединивших остров с сушей, в настоящее время сухая, вторая – представляет собой каменистый порог, через который большую часть времени течение направлено из озера в море, и лишь во время сизигийных приливов и высоких нагонов морская вода поступает в озеро. Пополнение озера пресной водой осуществляется преимущественно во время таяния снега. Озеро имеет опресненный поверхностный слой мощностью 0,5 м, соленость в котором изменяется в широком диапазоне (4-28‰), и монолимнион соленостью 21-29,5‰, разделенные узким галоклином [3]. Верхняя граница сероводородного слоя непостоянна (4,0-0,5 м) и испытывает как сезонные колебания, так и межгодовые, связанные с промывками озера морской водой в зимний период с периодичностью 1-3 года.

Диатомовый анализ (ДА) выполнен для 29 образцов из керна донных отложений, полученного из наиболее глубокой части озера, и 13 образцов поверхностных донных осадков, отобранных с помощью дночерпателя с глубин от 0,5 до 4,2 м. Подготовка препаратов на ДА проводилась по стандартной методике [2]. Постоянные препараты приготовлены с использованием смолы Naphrax с индексом рефракции 1,68. Диатомеи изучались в световом микроскопе Axiostar Plus (Zeiss) при увеличении $\times 1000$ раз. В каждом образце определялись до вида не менее 300 створок. Рассчитывалась концентрация створок диатомей на 1 г воздушно-сухого осадка [1]. Для выделения диатомовых зон выполнен кластерный анализ CONISS [9] на нетрансформированных исходных данных, включающих процентное содержание 44 видов, доля которых составила не менее 2% хотя бы в одном образце. Анализ проведен в программе PSIMPOLL 4,27 [8]. Число статистически значимых диатомовых зон (ДЗ) определено по методу «сломанной трости» (broken-stick model [7]).

Результаты

В колонке до вида определено 139 таксонов, до рода – 23 таксона. На основании процентного содержания видов с помощью кластерного анализа выделено 3 статистически значимых ДЗ.

ДЗ 1 (5,68-4,56 м) выделена в песках и алевритовых илах, в верхней части сменяющихся алевритистыми илами. Диатомеи представлены морскими и солоноватоводными бентосными и планктонно-бентосными видами: *Hyalodiscus scoticus* (Kützing) Grunow 1879, *Odontella aurita* (Lyngbye) C.Agardh 1832, *Opephora marina* (Gregory) Petit 1888, *Rhabdonema minutum* Kützing 1844, *Grammatophora* spp., *Cocconeis* spp., *Rhoicosphenia baltica* (Schumann) Z. Levkov 2010, *Diploneis smithii* var. *pumila* (Grunow) Hustedt 1937 и др.

ДЗ 2 (4,56-4,35 м) соответствует илам, алевритистым в нижней части ДЗ и сапропелевым в верхней. Характерная черта ДЗ – массовое развитие мелкоклеточных солоноватоводных видов: *Cyclotella choctawhatcheeana* Prasad 1990 emend. Genkal 2012 в планктоне и *Pseudostaurosira perminuta* (Grunow) Sabbe & Vyverman 1995, *Sarcophagodes mutabilis* (Grunow) E.Morales 2019, *Staurosirella guenter-grassii* (Witkowski & Lange-Bert.) E.Morales, C.E.Wetzel & Ector 2019 и *Nanofrustulum sopotensis* (Witkowski & Lange-Bertalot) E.Morales, C.E.Wetzel & Ector 2019 в перифитоне.

ДЗ 3 (4,35-4,20 м) включает верхнюю часть донных отложений: тонкослойные темноокрашенные сапропелевые илы с включением большого количества растительного детрита. Состав диатомовых ассоциаций олигодоминантный: 80-90% створок составляют 4 солоноватоводных перифитонных вида: *Nanofrustulum sopotensis*, *Pseudostaurosira subsalina* (Hustedt) E.A.Morales 2005, *P.* cf. *elliptica* (Schumann) Eklund, Morales & Spaulding 2006 и *Staurosirella guenter-grassii*.

Диатомовые ассоциации ДЗ1 характеризуются преобладанием мезогалобных видов со значительным вкладом полигалобных видов. Содержание олигалобных видов низкое и не превышает 5%. Выше отмечается устойчивый тренд к снижению доли полигалобов и увеличение доли мезогалобов в ДЗ2 и

абсолютное преобладание мезогалобов в ДЗ 3. Без учета мелкоклеточных видов семейства Fragilariaceae распределение диатомей по отношению к солености в ДЗ 2 и ДЗ 3 выглядит иначе: состав диатомовых ассоциаций смешанный, включает поли-, мезо- и олигогалобные виды. При этом виден отчетливый тренд к увеличению доли олигогалобных видов вверх по разрезу.

Таксономическое разнообразие диатомовых ассоциаций в донных отложениях оз. Кисло-Сладкое в целом довольно высокое. В ДЗ 1 наблюдается постепенное увеличение количества видов вверх по разрезу до максимальных значений 50-57 видов / 300 створок в интервале глубин 4,81-8,60 м. Обогащение диатомовых ассоциаций происходит за счет включения в их состав большого количества донных подвижных форм, традиционно включаемых в состав эпипелона. Это свидетельствует о более благоприятных условиях для развития бентосных диатомей, связанных, вероятно, с более спокойной гидродинамической обстановкой [4]. Выше 4,60 м таксономическое разнообразие диатомей резко снижается до 20-30 видов / 300 створок, что в комплексе с доминированием мелкоклеточных форм и олигодоминантным характером диатомовых ассоциаций говорит о нестабильности условий и кардинальной перестройке сообществ. Также следует отметить изменение по разрезу объема клеток в диатомовых ассоциациях. Для ДЗ 1 характерны клетки среднего размера объемом 100-1000 μm^3 и 1000-10000 μm^3 , тогда как для ДЗ 2 и ДЗ 3 – мелкие клетки объемом до 100 μm^3 , что, вероятно, следует связывать с перестройкой экосистемы при изменении таких локальных факторов, как гидродинамическая обстановка и насыщенность биогенными элементами в полуизолированном заливе по сравнению с открытой акваторией [10, 11].

Таким образом, изменения диатомовых ассоциаций в ДЗ 1 указывают на постепенное ослабление гидродинамической активности. Граница ДЗ 1/ДЗ 2 фиксирует наиболее существенную перестройку в структуре диатомовых ассоциаций и связана, вероятно, с закрытием первого пролива, соединявшего залив с открытой акваторией моря. Граница ДЗ 2/ДЗ 3, видимо, маркирует формирование в озере более-менее устойчивой трехслойной структуры. На наличие опресненного слоя указывают изменения в составе доминантов в группе видов Fragilariaceae и увеличение доли олигалобных видов. С сероводородным заражением придонных слоев могут быть связаны снижение концентрации диатомей в верхней части ДЗ 1 и уменьшение доли планктонной *Cyclotella choctawatcheana*.

В поверхностных осадках определено до вида 109 таксонов, до рода – 16 таксонов. Больше количество видов наблюдается в интервале глубин 3,0-1,2 м, низкое таксономическое разнообразие характерно для осадков глубокой части озера (3,5-4,2 м) и мелководья (0,7-1,0 м). Мелкие колониальные виды семейства Fragilariaceae доминируют во всех образцах, кроме глубин 1.2-2.8 м в западной части озера. Массового развития достигают 4 вида: *Nanofrustulum sopotensis*, *Pseudostaurosira* cf. *elliptica*, *P. subsalina* и *Staurosirella guenter-grassii*. Доля олигогалобных видов мала, доля и число полигалобных видов больше в полидоминантных диатомовых ассоциаций, мезогалобных – в олигодоминант-

ных. По-видимому, специфический комплекс видов в опресненном слое не сформировался из-за сильной изменчивости солености.

Для мелководья (0,7-1,0 м) характерны высокие концентрации диатомей в осадках и низкое таксономическое разнообразие, обусловленные массовым развитием видов семейства *Fragilariaceae*, преобладание видов, прикрепленных к субстрату, одиночных и колониальных. Характерно развитие в бентосе меропланктонных видов *Paralia sulcata* (Ehrenberg) Cleve 1873, *Hyalodiscus scoticus*, *Melosira moniliformis* (O.F. Müller) C. Agardh 1824, *M. arctica* Dickie 1852.

На средних глубинах наблюдается выраженная асимметрия состава диатомовых ассоциаций. В западной части озера на глубинах 1,2-2,8 м отмечаются снижение концентрации диатомей в поверхностных осадках, минимальная доля видов сем. *Fragilariaceae* и увеличение таксономического разнообразия за счет развития крупноклеточного эпипелона. В восточной части профиля эти тенденции выражены значительно слабее, доминируют виды семейства *Fragilariaceae*, а также характерны виды, имеющие одиночные клетки, прикрепленные к частицам грунта или камням (эпипсаммон). Асимметрия может быть связана с различным характером донного грунта (более тонкими грунтами в западной части озера) и гидродинамическим режимом (более активным в восточной части, где идет сток воды из озера).

Для центральной котловины с максимальными глубинами характерны максимальные концентрации, низкое видовое разнообразие, повышенная доля планктонных видов и сходство с мелководными диатомовыми ассоциациями. Поскольку на глубинах более 3 м дно значительную часть времени находится в зоне сероводородного заражения, это приводит к угнетению донной диатомовой флоры и формированию диатомовых ассоциаций за счет осадения диатомей из планктона и сноса со склонов котловины. Большее значение для формирования диатомовых ассоциаций на максимальных глубинах имеют мелководные диатомовые сообщества за счет высокой продуктивности и активного попадания в водную толщу в результате ветрового перемешивания миксолимниона.

Выводы

Таким образом, изменение диатомовых ассоциаций в колонке показывает изоляцию лагуны от моря и превращение ее в меромиктический водоем. Пространственное распределение диатомей в поверхностных осадках неоднородно и определяется стратификацией водоема и характером донного грунта.

Благодарности

Выражаем глубокую признательность за организацию и проведение полевых работ Д.А. Воронову, Ю.А. Кублицкому, П.А. Леонтьеву, Ф.А. Балабину, А.В. Косенкову и другим участникам экспедиций, а также сотрудникам Беломорской биологической станции МГУ имени Н.А. Перцова.

Работы выполнены по теме ГЗ АААА-А16-116032810055-0 и АААА-А16-116032810089-5 при поддержке проекта РФФИ 19-05-00966.

Литература

- [1] *Давыдова Н.Н.* Диатомовые водоросли – индикаторы природных условий водоемов в голоцене. Ленинград: Наука, 1985. 243 с.
- [2] Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Т. I. Ленинград: Наука. Ленингр. отд-ние, 1974. 403 с.
- [3] *Краснова Е.Д., Воронов Д.А., Демиденко Н.А., Кокрятская Н.М., Пантюлин А.Н., Рогатых Т.А., Самсонов Т.Е., Фролова Н.Е., 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 (Тр. Беломорской Биостанции МГУ, т. 12). Москва, 2016. С. 211-241.
- [4] *Сабурова М.А.* Микофитобентос // Система Белого моря. Т. IV. Процессы осадконакопления, геология и история. Москва: Научный мир, 2017. С. 370-385.
- [5] *Шилова О.С.* Диатомовые водоросли в поверхностных осадках озера Трехцветного // Труды VII Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2018)» Т. IV. Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2019. С. 173-175.
- [6] *Шилова О.С.* Распределение диатомей в поверхностных осадках меромиктического озера Еловое, Карельский берег Белого моря // География: развитие науки и образования. Том I. Коллективная монография по материалам ежегодной Всероссийской с международным участием научнопрактической конференции LXXII Герценовские чтения. СПб: Изд-во «Астерион», Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2019. С. 345-348.
- [7] *Bennett K.D.* Determination of the number of zones in a biostratigraphical sequence. *New Phytologist* 132. 1996. P. 155-170.
- [8] *Bennett K.D.* 2008. psimpoll and pscomb. <http://chrono.qub.ac.uk>
- [9] *Grimm E.C.* CONISS: a FORTRAN 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares // *Computers & Geosciences*. 13. 1987. P. 13-35.
- [10] *Svensson F., Norberg J., Snoeijs P.* Diatom Cell Size, Coloniality and Motility: Trade-Offs between Temperature, Salinity and Nutrient Supply with Climate Change. *PLoS ONE* 9(10): e109993. 2014. doi:10.1371/journal.pone.0109993
- [11] *Weckström K., Juggins S.* Coastal diatom-environment relationships from the Gulf of Finland, Baltic Sea // *Journal of Phycology*. 42. 2005. P. 21-35.

S u m m a r y. The distribution of diatoms in surface sediments and in the core of bottom sediments of the meromictic Kislo-Sladkoe Lake was studied. The changes in diatom associations in the column shows the isolation of the lagoon from the sea and its transformation into a meromictic lake. The spatial distribution of diatoms in surface sediments is heterogeneous and is determined by the water stratification and the compound of the sediments.

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