

# СРАВНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ЛЕТНЕГО ФИТОПЛАНКТОНА ДО И ПОСЛЕ ОБНОВЛЕНИЯ ПРИДОННЫХ ВОД ОЗЕРА КИСЛО-СЛАДКОЕ, ОТДЕЛЯЮЩЕГОСЯ ОТ БЕЛОГО МОРЯ

Д.А. Иванова<sup>1</sup>, Е.Д. Краснова<sup>2</sup>, Д.А. Воронов<sup>3</sup>, И.Г. Радченко<sup>4</sup>

<sup>1</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, da.ivanova99@yandex.ru

<sup>2</sup>ББС МГУ им. Н.А. Перцова, пос. Приморский, Респ. Карелия, e\_d\_krasnova@mail.ru

<sup>3</sup>ИППИ им. А.А. Харкевича РАН, г. Москва, da\_voronov@mail.ru

<sup>4</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, iraradchenko@yandex.ru

## COMPARISON OF THE SUMMER PHYTOPLANKTON STRUCTURE BEFORE AND AFTER THE RENEWAL OF THE BOTTOM WATER IN LAKE KISLO-SLADKOE, SEPARATED FROM THE WHITE SEA

D.A. Ivanova<sup>1</sup>, E.D. Krasnova<sup>2</sup>, D.A. Voronov<sup>3</sup>, I.G. Radchenko<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov MSU, Moscow

<sup>2</sup>Nikolai Pertsov WSBS of Lomonosov MSU, Primorskiy, Karelia

<sup>3</sup>IITP of A.A. Kharkevich of RAS, Moscow

<sup>4</sup>Lomonosov MSU, Moscow

Аннотация. В работе приведены данные по видовому составу и углеродной биомассе доминирующих форм фитопланктона с июня по август в 2019 г., после промывки Кисло-Сладкого озера морской водой перед ледоставом, и в 2021 г., когда осенне-зимнее обновление придонных вод озера не происходило. Также представлены результаты статистического анализа сходства и различий в структуре летнего фитопланктона (nMDS, SIMPER, one-way ANOSIM) в различающиеся по гидрологическим характеристикам годы.

*Ключевые слова:* Белое море, отделяющиеся водоемы, летний фитопланктон, меромиксия.

### Введение

На побережье Белого моря в результате постгляциального подъема берега многие заливы отделяются от моря и превращаются в меромиктические озера. Один из таких водоемов – озеро Кисло-Сладкое (66°32'54"N, 33°08'05"E), находится в начале изоляции, морская вода поступает в него только в сизигийный прилив и не нарушает стратификацию [2]. Поздней осенью, когда море охлаждается до отрицательных температур, в озеро могут приходиться водные массы с повышенной плотностью и опускаться на дно, что приводит к промывке водоема. В обычные годы к моменту ледостава, который защищает водоем от забросов из моря, в озере сохраняется стратификация, которая установилась летом. Данная работа представляет собой сравнительный анализ структуры фитопланктона с июня по август в 2019 г., после промывки Кисло-Сладкого озера морской водой перед ледоставом, и в 2021 г., когда осенне-зимнее обновление придонных вод озера не происходило.

### Материалы и методы

Для исследования фитопланктона отбирали пробы воды объемом до 1 л с помощью погружного насоса Whale Premium Submersible Pump GP1352 (США) и фиксировали формалином с конечной концентрацией 2%. Пробы отбирали с различных глубин, от 0,5 м до придонного слоя на глубине 4,5 м, а с развитием сероводородной зоны – до ее границы, 2,8-4,3 м. Пробы концентрировали

методом обратной фильтрации (диаметр пор 5 мкм), просчитывали в камере Нажотта (объем 0,05 мл) на микроскопе МИКМЕД-1 (Россия) при увеличении х300 и х600 с водной иммерсией, а также на МИКМЕД-6 при увеличении х200 и х400. Просчитывали по 3 камеры для каждой пробы. Для верификации видовой принадлежности диатомовые водоросли просматривали на электронном микроскопе Camscan S-2 Cambridge Scanning Electron Microscope (Великобритания). Для расчета углеродной биомассы ( $B_C$ , мгС/м<sup>3</sup>) объемы клеток определяли методом геометрического подобия [3] с последующим переводом в единицы углерода [4]. Интегрированную углеродную биомассу ( $B_{int}$ , мгС/м<sup>2</sup>) в столбе воды оценивали трапециевидным интегрированием  $B_C$  от поверхности до дна. Статистический анализ сходства и различий в структуре фитопланктона проводили в программе «PRIMER 6», используя процедуры CLUSTER, nMDS, one-way ANOSIM и SIMPER.

### Результаты

В летний период исследований обнаружены 51 таксон фитопланктона – в 2019 г., 48 таксонов – в 2021 г., большая часть которых определена до вида или рода, принадлежащих 10 классам: Bacillariophyceae, Coscinodiscophyceae, Mediophyceae, Dinophyceae, Oxyrrhidophyceae, Cyanophyceae, Chlorodendrophyceae, Chlorophyceae, Dictyochophyceae, Thecofilosea. Остальные водоросли были отнесены к криптофитовым и эвгленовым.

Летом 2019 г.  $B_{int}$  составляла 92-107 мгС/м<sup>2</sup> с падением до 41 мгС/м<sup>2</sup> в середине июля (рис. 1). В 2021 г.  $B_{int}$  варьировала с 13 до 135 мгС/м<sup>2</sup> с пиком в начале августа.

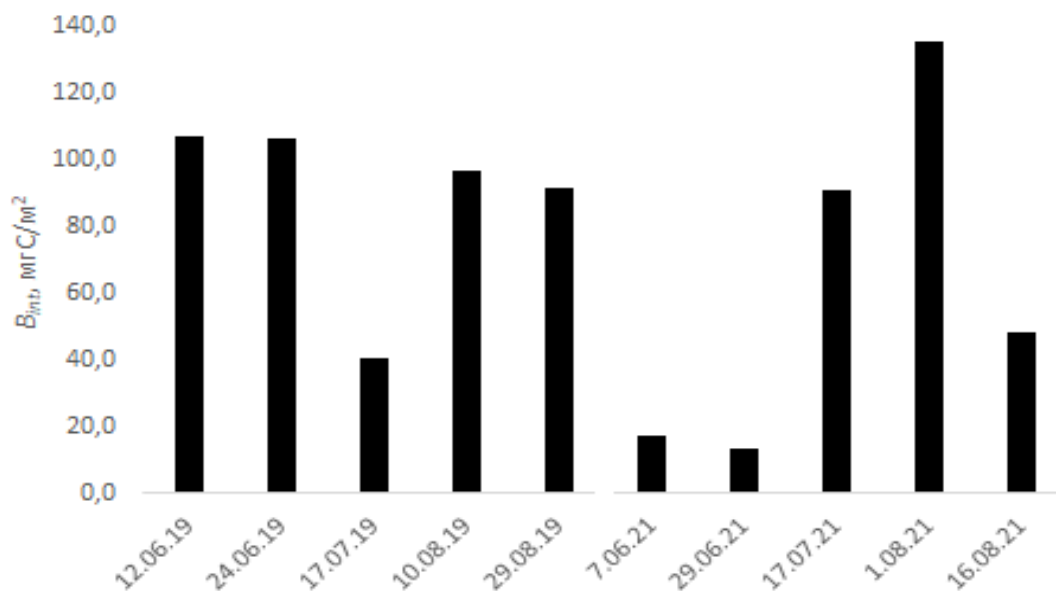


Рис. 1. Динамика интегрированной биомассы летнего фитопланктона оз. Кисло-Сладкое.

nMDS проб фитопланктона на основе  $B_{int}$ , трансформированной в корень квадратный, показал, что на уровне сходства 40% пробы объединяются в четыре группы (рис. 2). Одноуровневый ANOSIM выявил достоверные различия между выделенными группами (наблюдаемое значение статистики  $R = 0,953$ ,  $p = 0,001$ , число случайных вариантов = 999, число случайных вариантов, давших значение  $R$ , большее или равное наблюдаемому, = 0). В группу **A** вошли пробы июня и июля 2019 г., по результатам анализа SIMPER сходство внутри группы составило 49%. Характерными видами группы **A** с вкладом в сходство в скобках стали гетеротрофные *Ebria tripartita* (20%) и *Gyrodinium fusiforme* (19%) и автотрофный *Gymnodinium arcticum* (18%). К группе **B** принадлежат пробы августа 2019 г., сходство внутри группы – 60%, характерные виды – гетеротрофные *Oxvrrhis marina* (66%), *E. tripartita* (13%) и *G. fusiforme* (11%). Различие между группами **A** и **B** составляет 69%. В группу **C** входят пробы июня 2021 г., сходство внутри группы составляет 53%, характерными видами стали автотрофные *Cyclotella choctawhatcheeana* (57%) и *Microcystis ichtyoblabe* (12%). К группе **D** принадлежат пробы июля и августа 2021 г., сходство внутри группы – 47%, характерные виды – гетеротрофный *O. marina* (43%) и автотрофный *C. choctawhatcheeana* (31%). Различие между группами **C** и **D** составляет 66%. Различие между аналогичными периодами двух лет, то есть между группами **A** и **C** и между группами **B** и **D**, составляет 83% и 62% соответственно.

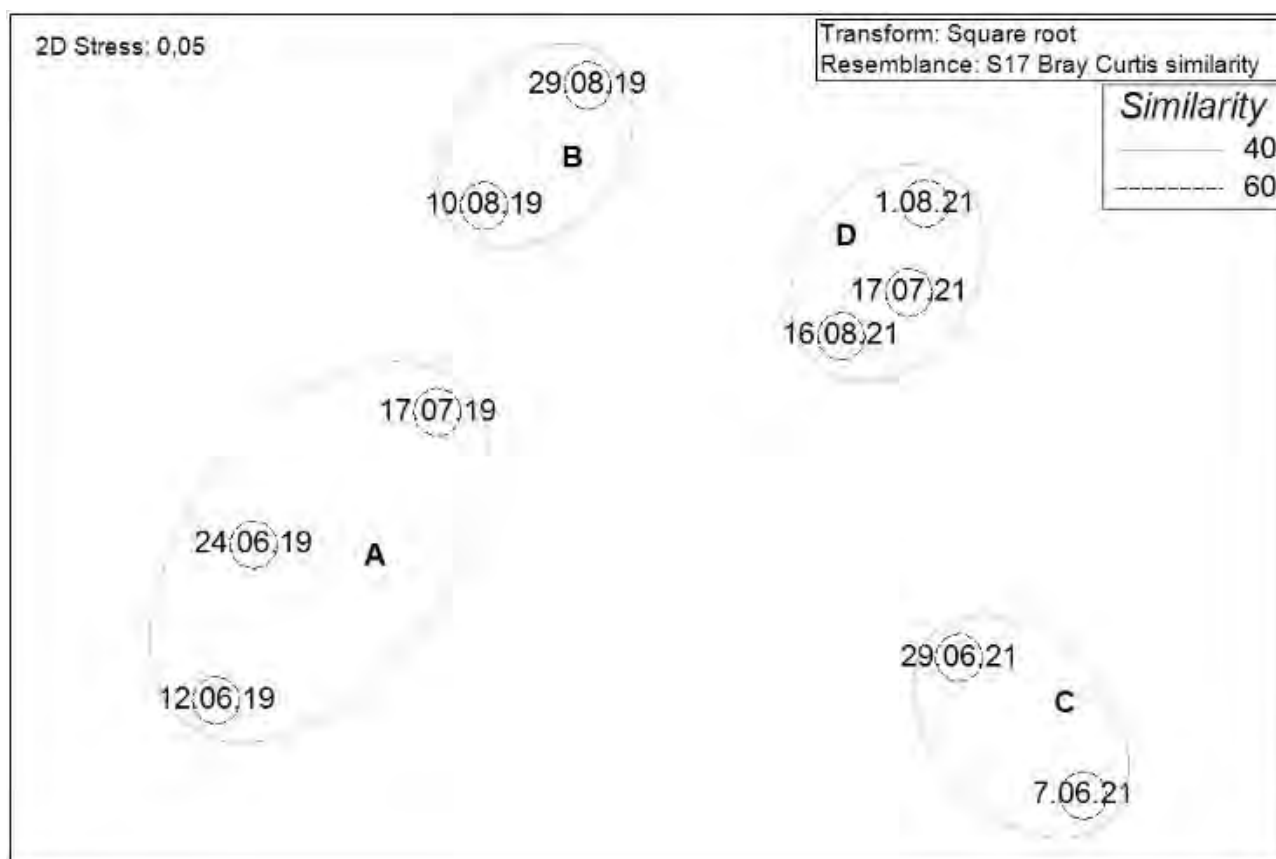


Рис. 2. Ординация (nMDS) проб фитопланктона на основе  $B_{int}$ .

## Обсуждение

Динамика интегрированной на столб воды биомассы летнего фитопланктона в год после промывки озера морской водой в 2019 г. отличалась от таковой без предшествующей промывки в 2021 г. В 2019 г. биомасса была высокой как в июне, так и в августе, с падением в середине июля, тогда как в 2021 г. биомасса фитопланктона значительно варьировала: в июне и конце августа была низкой, а максимальных значений достигала в начале августа. Максимальные значения биомасс фитопланктона в 2019 г. и 2021 г были близки – 107 и 135 мгС/м<sup>2</sup> соответственно – и были значительно ниже весеннего и осеннего пиков в 2019 г. [1]. Оба года характеризовались развитием двух комплексов фитопланктона: первый вегетировал в июне-июле, второй – в августе. При этом, в июне-июле 2019 г. среди характерных видов наряду с гетеротрофными значительная доля принадлежала автотрофным видам, а в 2021 г. характерные виды с наибольшим вкладом в сходство были автотрофами и отличались от характерных видов в 2019 г. Второй комплекс характерных видов, сформировавшийся в августе, в 2019 г. состоял из гетеротрофных видов, а в 2021 г. – преимущественно из гетеротрофных видов. При этом в оба года основной вклад в сходство давал вид *Oxyrrhis marina*, обилие которого вероятнее всего связано с развитием микроорганизмов хемоклина.

## Выводы

Таким образом, структура летнего фитопланктона озера Кисло-Сладкое в годы с предшествующей промывкой и без промывки отличается. При этом наибольшее отличие отмечено в июне-июле.

## Литература

- [1] Иванова Д.А. и др. Сезонная динамика альгофлоры стратифицированного озера Кисло-Сладкое, частично изолированного от Белого моря // Океанология. 2022. Т. 62. № 2. С.1-15. [В печати]
- [2] Краснова Е.Д. и др. К инвентаризации реликтовых водоемов, отделяющихся от Белого моря // Труды Беломорской биостанции МГУ. 2016. Т. 12. С. 211-241.
- [3] Hillebrand H. et al. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae // Journal of phycology. 1999. Vol. 35. № 2. P. 403-424.
- [4] 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.

S u m m a r y. The report contains data on species composition and carbon biomass of dominant phytoplankton forms from June to August in 2019 when Kисло-Sladkoe Lake was flushed with seawater before ice covering, and in 2021 when the autumn-winter renewal of bottom water did not occur in the lake. The results of a dissimilarity statistical analysis in the structure of summer phytoplankton (nMDS, SIMPER, one-way ANOSIM) in these hydrologically different years are also presented.



РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. А.И. ГЕРЦЕНА  
ФАКУЛЬТЕТ ГЕОГРАФИИ

HERZEN STATE PEDAGOGICAL UNIVERSITY OF RUSSIA  
FACULTY OF GEOGRAPHY

## **LXXV Герценовские чтения**

# **География: развитие науки и образования**

Международная научно-практическая конференция  
20–23 апреля 2022 года (к 225-летию Герценовского университета)

Сборник научных статей

**I**

LXXV Herzen readings

## **Geography: Development of Science and Education**

International scientific and practical conference on April 20–23, 2022  
(to the 225th anniversary of Herzen University)

Collection of articles

Санкт-Петербург  
Издательство РГПУ им. А. И. Герцена  
2022

Редакционная коллегия:

*Д. А. Субетто* (отв. ред.), *А. Н. Паранина* (отв. ред.), *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*

**LXXV Герценовские чтения. География: развитие науки и образования.** Международная научно-практическая конференция 20–23 апреля 2022 года (к 225-летию Герценовского университета): сборник научных статей в 2 т. Т. I / отв. ред. Д. А. Субетто, А. Н. Паранина. — Санкт-Петербург: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2022. — 258 с.

**LXXV Gertsenovskiy readings. Geography: development of science and education.** Intern. scientific and practical conference on April 20–23, 2022 (to the 225th anniversary of Herzen University): collection of scientific articles in 2 vol. Part I / by ed. D. A. Subetto, A. N. Paraniina. — St. Petersburg: Publ. house of Herzen State Pedagogical University of Russia, 2022. — 258 p.

Сборник статей «География: развитие науки и образования» отражает результаты работы научно-практической конференции 75 Герценовские чтения 20-23 апреля 2022 года, посвященной памяти чл.-корр. РАН Валериана Афанасьевича Снытко (18.01.1939-02.12.2021), 350-летию со дня рождения Петра Великого, 90-летию факультета географии и другим юбилейным датам.

Материалы сгруппированы в два тома. Том I включает главы: 1. Учитель географии и развитие общества, 2. Физическая география: направления, методы и междисциплинарные исследования, 3. Полярные исследования и пути освоения Арктики и Антарктики, 4. Современные проблемы теоретической и прикладной лимнологии и гидрологии, 5. Эволюционная география, ритмика процессов и явлений. Том II включает главы: 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*