

ВОПРОСЫ СОВРЕМЕННОЙ АЛЬГОЛОГИИ

algology.ru

**БЮЛЛЕТЕНЬ 2023
СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК**

Материалы

**XVIII Международной научной конференции диатомологов
«Диатомовые водоросли: морфология, биология,
систематика, экология, флористика, палеогеография,
биостратиграфия», посвящённой памяти выдающихся
российских диатомологов Н.И. Стрельниковой и Л.Я. Каган**

**Материалы XVIII Международной научной конференции диатомологов
«Диатомовые водоросли: морфология, биология, систематика, экология,
флористика, палеогеография, биостратиграфия», посвящённой памяти
выдающихся российских диатомологов Н.И. Стрельниковой и Л.Я. Каган**

РЕДАКЦИЯ

Главный редактор д.б.н. *А.Н. Камнев*

Зам. главного редактора

д.б.н. *В.А. Силкин,*

д.б.н. *А.Е. Соловченко,*

к.б.н. *О.В. Анисимова,*

к.б.н. *М.А. Гололобова*

Ответственные секретари

к.б.н. *М.В. Крупина И.В., Стуколова*

Технический специалист *А.Н. Филатов*

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Анисимова О.В. к.б.н. (*Россия, Москва*)

Афанасьев Д.Ф. к.б.н. (*Россия, Ростов-на-Дону*)

Билан М.И. к.х.н. (*Россия, Москва*)

Боровков А.Б. к.б.н. (*Россия, Севастополь*)

Вилкова О.Ю. к.б.н. (*Россия, Москва*)

Воденеева Е.Л. к.б.н. (*Россия, Нижний Новгород*)

Гололобова М.А. к.б.н. (*Россия, Москва*)

Демидчик В.В. д.б.н. (*Беларусь, Минск*)

Ермаков И.П. д.б.н. (*Россия, Москва*)

Камнев А.Н. д.б.н. (*Россия, Москва*)

Космынин В.Н. к.г.н. (*США, Таллахасси*)

Крупина М.В. к.б.н. (*Россия, Москва*)

Кураков А.В. д.б.н. (*Россия, Москва*)

Макаров М.В. д.б.н. (*Россия, Мурманск*)

Мильчакова Н.А. к.б.н. (*Россия, Севастополь*)

Михайлова Т.А. к.б.н. (*Россия, Санкт-Петербург*)

Неврова Е.Л. д.б.н. (*Россия, Севастополь*)

Переладов М.В. к.б.н. (*Россия, Москва*)

Празукин А.В. д.б.н. (*Россия, Севастополь*)

Сапожников Ф.В. к.б.н. (*Россия, Москва*)

Силкин В.А. д.б.н. (*Россия, Геленджик*),

Соловченко А.Е. д.б.н. (*Россия, Москва*)

Суханова И.Н. к.б.н. (*Россия, Москва*),

Тренкеншу Р.П. к.б.н. (*Россия, Севастополь*)

Фролова Г.И. к.б.н. (*Россия, Москва*)

В сборнике размещены материалы исследований по актуальным проблемам изучения диатомовых водорослей в различных областях систематики, флористики, молекулярной генетики, геоботаники, мониторинга, биотехнологии, гидробиологии, экологии, палеогеографии, биостратиграфии, геологии и др. Освещены теоретические и прикладные аспекты альгологии.

Для специалистов в области альгологии, гидробиологии, экологии, палеоальгологии и биостратиграфии. Материалы конференции печатаются в авторской редакции.

Научное электронное издание

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия РФ.

Свидетельство о регистрации

Эл № ФС 77-22222 от 1 ноября 2005 г.

Над номером работали:

Денисов Д.Б.

Вокуева С.И.

Стуколова И.В.

Учредитель д.б.н. *Камнев А.Н.*

ПОЛНАЯ ВЕРСИЯ ЖУРНАЛА – на сайте www.algology.ru

Секция 1.

Биология, морфология и систематика

Изучение морфологии створок диатомовой водоросли *Coscinodiscus radiatus* Ehrenberg из морских и гипергалинных экосистем

The valves morphology of the diatom *Coscinodiscus radiatus* Ehrenberg (Bacillariophyta) from marine and hypersaline ecosystems

Булатов С.А.

Stanislav A. Bulatov

Международный институт моделирования и прогнозирования развития морских и гипергалинных экосистем (Клин, Россия)

mimge_rus@mail.ru

Изучение морфологии *Coscinodiscus radiatus* из залива Кара-Богаз-Гол Каспийского моря показало, что при солености от 50 до 262‰ среди исследованных количественных признаков в наибольшей степени варьировал диаметр створки (коэффициент вариации $CV = 21,2\%$), в наименьшей – частота расположения ареол на загибе створки в 10 мкм ($CV = 9,6\%$). Отдельные количественные признаки (диаметр створки и количество ареол на загибе створки в 10 мкм) проявляют изменчивость по сравнению с литературными данными, основанными на изучении вида из морских экосистем. Отмечено увеличение диаметра створок *C. radiatus* при солености 60‰, уменьшение – при солености 262‰. Развитие в заливе позволяет характеризовать *C. radiatus* не только как морской эвригалинный вид, встречающийся в опресненных участках морей, но и галофил, способный переносить широкие колебания солености.

Ключевые слова: Bacillariophyta; *Coscinodiscus radiatus*; соленость; морфология; морские и гипергалинные экосистемы

The study of morphology of *Coscinodiscus radiatus* from the Kara-Bogaz-Gol Bay (the Caspian Sea) revealed that at a salinity of 50 to 262‰ among the investigated characters, valve diameter (variation coefficient $CV = 21.2\%$) was the most variable. The number of areolae on the valve mantle in 10 μm ($CV = 9.6\%$) was the least variable characters. Some quantitative characters (valve diameter and number of areolae on the valve mantle in 10 μm) revealed variability compared to the literature data, based on the study of species from marine waters. An increase in the valve diameter of *C. radiatus* was noted at a salinity of 60‰, a decrease – at a salinity of 262‰. *C. radiatus* can be characterize as halophilous capable of tolerate fluctuations in salinity.

Keywords: Bacillariophyta; *Coscinodiscus radiatus*; salinity; morphology; marine and hypersaline ecosystems

Coscinodiscus radiatus Ehrenberg впервые был описан из меловых отложений (Ehrenberg, 1840). В настоящее время вид известен не только в ископаемом состоянии (Диатомовые ..., 2002), но и обитает в современных водоемах (Прошкина-Лавренко, 1955; Прошкина-Лавренко, 1963; Прошкина-Лавренко, Макарова, 1968; Диатомовые ..., 2002; Bérard-Therriault et al., 1999; Lang, Kaczmarek, 2012; Al-Yamani, Saburova, 2019; Al-Handal et al., 2022). Впоследствии, *C. radiatus* также был отмечен и описан из гипергалинного залива Каспийского моря – Кара-Богаз-Гол (Булатов, 2019).

Вид относится к крупным диатомовым, с диаметром створок от 14 до 160 мкм, наличием в центре створки розетки из крупных, обычно вытянутых ареол или гиалинового поля, неравномерно расположенными на створке крупными ареолами, наличием римопортул на половине радиуса створки и ближе к краю загиба створки, а также 8–10 ареолами в 10 мкм на загибе створки (Диатомовые ..., 2002).

Настоящие исследования показали, что *S. radiatus* в заливе Кара-Богаз-Гол представлен плоскими круглыми створками, диаметром от 68,8 до 149,2 мкм. Ареолы на створке грубые, почти шестигранные, 3–6 в 10 мкм. В центре створки присутствует розетка из нескольких ареол, местами, в центре раздвинутых, образующих небольшое гиалиновое поле. Римопортулы слабо различимы при изучении в световом микроскопе и похожи на маленькие недоразвитые ареолы-поры. Количество ареол на загибе створки составляет 6–8 в 10 мкм. Внешне створки *S. radiatus* из исследованного нами материала схожи со створками, приведенными для Каспийского, Черного и Азовского морей (Прошкина-Лавренко, 1955; Прошкина-Лавренко, 1963; Прошкина-Лавренко, Макарова, 1968).

Анализ литературных данных показал, что створки *S. radiatus* из залива Кара-Богаз-Гол отличались большим диаметром по сравнению со створками из Каспийского и Азовского морей (Прошкина-Лавренко, 1963; Прошкина-Лавренко, Макарова, 1968), но были меньше створок, описанных из Черного моря (Прошкина-Лавренко, 1955). Количество ареол на створках в 10 мкм соответствовало литературным данным, и не отличалось от их числа, приводимого для створок из Каспийского моря (3–6 в 10 мкм). Частота расположения ареол на загибе створки в 10 мкм у створок из залива была меньше, по сравнению с их количеством на загибе створки *S. radiatus* из Каспийского, Черного и Азовского морей.

Внутрипопуляционные исследования показали, что из трех исследованных признаков (диаметр створки, количество ареол на створке и количество ареол на загибе створки), при солености от 50 до 262‰, наиболее изменчивым является диаметр створки (коэффициент вариации $CV = 21,2\%$), наименее вариабельной являлась частота расположения ареол на загибе створки в 10 мкм ($CV = 9,6\%$). Причем, при солености 60‰ диаметр створок был больше и составлял 80,8–149,2 мкм, чем при солености в 262‰, когда диаметр створок колебался в пределах от 68,8 до 100,0 мкм.

На основании проведенных исследований был сформирован уточненный диагноз вида из залива Кара-Богаз-Гол, основанный на новых данных. Установлена большая изменчивость отдельных морфологических признаков створок *S. radiatus* из высокоминерализованного залива Кара-Богаз-Гол, чем на створках из морских вод, изученных другими исследователями. Вид в Каспийском море и заливе Кара-Богаз-Гол в целом представляет единую каспийскую популяцию, по разному развивающуюся при различных уровнях солености среды, влияющих на морфологию створок путем изменения их размеров и сокращения количества структурных элементов на створках, что характеризует *S. radiatus* не только как морской эвригалинный вид, встречающийся в опресненных участках морей, но и галофил, способный переносить широкие колебания солености.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Булатов С.А. Современное состояние залива Кара-Богаз-Гол (Каспийское море). – Бо-Бассен: ГлобеЭдит, 2019. – 210 с.
2. Диатомовые водоросли России и сопредельных стран: ископаемые и современные. Т. II, Вып. 3. / Под ред. И.В. Макаровой. – СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2002. – 112 с.

3. Прошкина-Лавренко А.И. Диатомовые водоросли планктона Черного моря. – М.–Л.: Издательство АН СССР, 1955. – 222 с.
4. Прошкина-Лавренко А.И. Диатомовые водоросли планктона Азовского моря. – М.–Л.: Издательство АН СССР, 1963. – 190 с.
5. Прошкина-Лавренко А.И., Макарова И.В. Водоросли планктона Каспийского моря. – Ленинград: Издательство «Наука», 1968. – 291 с.
6. Al-Handal A.Y., Torstensson A., Wulff A. Revising Potter Cove, King George Island, Antarctica, 12 years later: new observations of marine benthic diatoms // *Botanica Marina*. 2022. V. 65, № 2. P. 81–103. DOI: <https://doi.org/10.1515/bot-2021-0066>.
7. Al-Yamani F.Y., Saburova M.A. Marine phytoplankton of Kuwait's waters. Diatoms. V. II. – Safat: Kuwait Institute for Scientific Research, 2019. – 336 p.
8. Bérard-Therriault L., Poulin M., Bossé L. Guide d'identification du phytoplancton marin de l'estuaire et du Golfe du Saint-Laurent incluant également certains protozoaires // *Publication Spéciale Canadienne des Sciences Halieutiques et Aquatiques*. 1999. № 128. P. 1–387.
9. Ehrenberg C.G. Über noch zahlreich jetzt lebende Thierarten der Kreidebildung und den Organismus der Polythalamien. *Abhandlung der Königlich Akademie der Wissenschaften zu Berlin*. Berlin, 1840. – 94 p.
10. Lang I., Kaczmarska I. Morphological and molecular identity of diatom cells retrieved from ship ballast tanks destined for Vancouver, Canada // *Nova Hedvigia*. 2012. V. 141. P. 515–534.

***Sellaphora terrestris* Glushchenko, Kezlya, Maltsev & Kulikovskiy
из Вьетнама и замечания по филогении и таксономии рода
Sellaphora и систематическому положению рода *Microcostatus***

***Sellaphora terrestris* Glushchenko, Kezlya, Maltsev & Kulikovskiy
from Vietnam and remarks on the phylogeny and taxonomy of
genus *Sellaphora* and systematic position of genus *Microcostatus***

**Глущенко А.М.¹, Кезля Е.М.¹, Мальцев Е.И.¹, Генкал С.И.²,
Коциолек Дж.П.³, Куликовский М.С.¹**

**Anton M. Glushchenko, Elena M. Kezlya, Yevhen I. Maltsev,
Sergey I. Genkal, John Patrick Kociolek, Maxim S. Kulikovskiy**

¹Институт физиологии растений имени К.А. Тимирязева РАН (Москва, Россия)

²Институт биологии внутренних вод имени И.Д. Папанина РАН (Борок, Россия)

³Музей естественной истории и Департамент экологии и эволюционной биологии
Университета Колорадо (Боулдер, Колорадо, США)

chelovek91_91@mail.ru

Из материала, выделенного из почв национального парка Кат Тьен, мы выделили четыре штамма, которые были отнесены к роду *Sellaphora*. Идентификация была проведена на основании морфологических и молекулярных исследований. Описан вид *Sellaphora terrestris* Glushchenko, Kezlya, Maltsev & Kulikovskiy. Филогенетический анализ на основании V4 18S рДНК показал, что новый вид имеет сходство на 94,1–97,2% с другими последовательностями *Sellaphora*. Новый вид морфологически близок к видам, ранее идентифицированным как представители рода *Microcostatus*.

Ключевые слова: диатомовые водоросли; морфология; молекулярное исследование; 18S rDNA; rbcL; почва; Юго-Восточная Азия; Национальный парк Кат Тьен

From the material isolated from the soils of the Kat Tien National Park, we isolated four strains that were assigned to the genus *Sellaphora*. The identification was carried out on the basis of morphological and molecular studies. The species *Sellaphora terrestris* Glushchenko, Kezlya, Maltsev & Kulikovskiy is described. Phylogenetic analysis based on V4 18S rDNA showed that the new species shares 94.1–97.2% similarity with other *Sellaphora* sequences. The new species is morphologically close to the species previously identified as members of the genus *Microcostatus*.

Keywords: diatoms; morphology; molecular investigation; 18S rDNA; rbcL; soil; Southeast Asia; Cát Tiên National Park

Род *Sellaphora* Mereschkowsky был описан в 1902 г. (Mereschkowsky, 1902). Он насчитывает более 250 видов. Это самый крупный род в семействе Sellaphoraceae (Kociolek et al., 2023).

Аэрофильная диатомовая флора Юго-Восточной практически не изучена. Имеется лишь одно упоминание о почвенных диатомовых из Индонезии (Kolkwitz, Krieger, 1936; Глущенко и др., 2021). В настоящее время имеются работы, посвященные

описанию представителей родов *Mayamaea* и *Placoneis* из почв Вьетнама (Kezlya et al., 2020a,b, 2022). При этом, целенаправленное изучение видов *Sellaphora* из почв Юго-Восточной Азии ранее не предпринималось. Можно упомянуть виды, описанные Фридрихом Хустедтом из Индонезии: *Navicula subbacillum* Hustedt и *N. perventralis* Hustedt (Hustedt, 1937), которые в настоящее время относятся к роду *Sellaphora* (*S. subbacillum* (Hustedt) Falasco & Ector и *S. perventralis* (Hustedt) Tuji). Однако только *N. subbacillum* был указан Хустедтом как аэрофильный вид. Таким образом, можно сделать вывод, что почвенные диатомовые Юго-Восточной Азии требуют систематического изучения.

Материалом послужили образцы почвы, собранные в национальном парке Кат Тьен (Вьетнам) в июне 2019 г. Отбор проб проводили в ходе экспедиции Совместного Российско-Вьетнамского тропического научно-технологического центра (проект «Эколан 3.2»).

Выделение видов в культуру, приготовление постоянных препаратов, экстракция ДНК, амплификация и построение филогенетических деревьев проводилось общепринятыми методами (Glushchenko et al., 2022). Световую микроскопию проводили при помощи микроскопа Zeiss Axio Scope A1 с иммерсионным объективом 100x (н.а. 1.4), метод ДИК. Для сканирующей электронной микроскопии использовали микроскоп JEOL JSM-6510LV.

Было выделено четыре штамма, идентифицированные как представители рода *Sellaphora*. Был описан новый для науки вид, *Sellaphora terrestris* Glushchenko, Kezlya, Maltsev & Kulikovskiy (Glushchenko et al., 2022). Штаммы *S. terrestris* (обозначенные как VP304, VP272, VP299, VP303) имели между собой некоторые морфологические различия. В частности, штамм VP299 имеет более мелкие створки, почти эллиптические, без отчетливых вершин по сравнению со штаммами VP304, VP303 и VP272. Несмотря на эти различия, все эти штаммы на филогенетическом дереве образовали одну ветвь с максимальной статистической поддержкой. В целом, по молекулярно-генетическим данным вид *S. terrestris* был наиболее близок к видам *S. seminulum*, *S. laevisissima* и *S. balashovae* (Glushchenko et al., 2022).

При изучении морфологических признаков нового вида нами было отмечено морфологическое сходство с некоторыми видами *Microcostatus*. Разнообразие и выраженность морфологических признаков у видов, относимых в настоящее время к роду *Microcostatus*, не может не привлечь к себе внимания. Например, микроребра (диагностический признак, на основании которого был выделен этот род) у видов могут быть выражены в большей или меньшей степени, строение штрихов различно (штрихи могут состоять из одной макроареолы, например, у вида *Microcostatus elisabethianus* Van de Vijver & Ector или из нескольких ареол в штрихе, как у большинства видов рода), конопеум/псевдоконопеум может присутствовать или отсутствовать, а гимены закрывают отверстия ареол у разных видов изнутри или даже снаружи (как у *M. elisabethianus*). Общей морфологической структурой для вида *Sellaphora terrestris* (как и для многих видов *Sellaphora*) и *Microcostatus* (например, *M. dexteri*, *M. egregius*, *M. naumannii*) является наличие круглой апикальной ямки на каждом внутреннем крае створки, а также наличие продольных канавок в осевой и центральной части внешних поверхностей створок (Glushchenko et al., 2022).

Молекулярно-генетические данные о пресноводных представителях *Microcostatus* отсутствуют. В настоящее время в GenBank депонированы последовательности генов 18S рРНК только двух штаммов *Microcostatus*, выделенных из приливной зоны в Китае. Так как работа еще не опубликована, отсутствует возможность оценить морфологические особенности этих таксонов. Несмотря на это, результаты расчета генетической дистанции для участка V4 показали высокую степень различия между китайскими штаммами *Microcostatus* и нашими штаммами *Sellaphora terrestris*

(Glushchenko et al., 2022). Для понимания родства *Microcostatus* и *Sellaphora* необходим филогенетический анализ с привлечением дополнительного набора генов (например, *rbcL*, *cox1*), поскольку анализ 18S рРНК не дал необходимого разрешения.

Таким образом, морфологические и молекулярно-генетические данные свидетельствуют о принадлежности выделенных нами штаммов к роду *Sellaphora*. Также, в настоящее время можно считать, что род *Microcostatus* требует дополнительного морфологического и молекулярно-генетического изучения видов, отнесенных в настоящее время к этому роду.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (19-14-00320П).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Глушченко А.М., Кезля Е.М., Мальцев Е.И., Мартыненко Н.А., Генкал С.И., Гусев Е.С., Куликовский М.С. Почвенные диатомовые водоросли национального парка Кат Тьен (Вьетнам): первые сведения // Вопросы современной альгологии. 2021. №1 (25). С. 134–137. URL: <http://algology.ru/1685>
2. Glushchenko A., Kezlya E., Maltsev Y., Genkal S., Kociolek J.P., Kulikovskiy M. Description of the Soil Diatom *Sellaphora terrestris* sp. nov. (Bacillariophyceae, Sellaphoraceae) from Vietnam, with Remarks on the Phylogeny and Taxonomy of *Sellaphora* and Systematic Position of *Microcostatus* // Plants. 2022. V.11. P. 2148. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/plants11162148>.
3. Hustedt F. Systematische und ökologische Untersuchungen über die Diatomeen-Flora von Java, Bali und Sumatra nach dem Material der Deutschen Limnologischen Sunda-Expedition // Archiv für Hydrobiologie Suppl. 1937. V.15(2). P. 187–295.
4. Kezlya E.M., Glushchenko A.M., Kociolek J.P., Maltsev Ye.I., Martynenko N.A., Genkal S.I., Kulikovskiy M.S. *Mayamaea vietnamica* sp. nov.: a new, terrestrial diatom (Bacillariophyceae) species from Vietnam // Algae. 2020a. V.35, №4. P. 325–335. DOI: <https://doi.org/10.4490/algae.2020.35.11.23>.
5. Kezlya E.M., Glushchenko A.M., Maltsev Ye.I., Gusev E.S., Genkal S.I., Kuznetsov A.N., Kociolek J.P., Kulikovskiy M.S. *Placoneis cattiensis* sp. nov. – a new, diatom (Bacillariophyceae: Cymbellales) soil species from Cát Tiên National Park (Vietnam) // Phytotaxa. 2020b. V.460, №4. P. 237–248. DOI: <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.460.4.1>.
6. Kezlya E., Glushchenko A., Kociolek J.P., Maltsev Y., Genkal S., Kulikovskiy M. A new species of *Placoneis* Mereschkowsky (Bacillariophyceae: Cymbellales) from wet soils in southern Vietnam // Cryptogamie, Algologie. 2022. V.43 (11). P. 177–188. DOI: <http://dx.doi.org/10.5252/cryptogamie-algologie2022v43a11>.
7. Kociolek J.P., Balasubramanian K., Blanco S., Coste M., Ector L., Liu Y., Kulikovskiy M. S., Lundholm N., Ludwig T., Potapova M., Rimet F., Sabbe K., Sala S., Sar E., Taylor J., Van de Vijver B., Wetzel C.E., Williams D.M., Witkowski A., Witkowski J. Diatom Base. URL: <https://www.diatombase.org>. (дата обращения: 20.06.2023).
8. Kolkwitz G.R., Krieger W. Zur Ökologie der Pflanzenwelt, insbesondere der Algen, des Vulkans Pangerango in West-Java. I. Allgemeines (von R. Kolkwitz). II. Die Algenflora des Pangerango (von W. Krieger). Bericht der Deutschen Botanischen Gesellschaft. 1936. V.54. P. 65–91.
9. Mereschkowsky C. On *Sellaphora*, a new genus of diatoms // Ann. Mag. Nat. Hist. 1902. V.9. P. 185–195. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00222930208678565>.

**Бесшовные пеннатные диатомовые из морских миоценовых
отложений массива Фишер
(горы Принс-Чарльз, Восточная Антарктида)**

**An araphid diatoms from marine Miocene deposits of the Fisher
Massif (Prince Charles Mountains, East Antarctica)**

Гогорев Р.М.¹, Пушина З.В.²

Rinat M. Gogorev, Zinaida V. Pushina

¹Ботанический институт имени В.Л. Комарова РАН (Санкт-Петербург, Россия)

²ФГБУ ВНИИОкеангеология имени И.С. Грамберга (Санкт-Петербург, Россия)

Rgogorev@binran.ru; musatova@mail.ru

Позднекайнозойская история Антарктиды отражена в немногочисленных свободных ото льда наземных отложениях краевой зоны материка. Если планктонная диатомовая флора кайнозоя Антарктики, которая с эоцена преобладает в биоценозах Южного океана, достаточно хорошо изучена по материалам глубоководного бурения, то бентосные сообщества диатомовых, обнаруженные в осадках, изучены крайне фрагментарно. В материалах, собранных в 52 и 53 Российских антарктических экспедициях в 2006–2008 гг. из отложений центральной части гор Принс-Чарльз на массиве Фишер, найдена богатая ископаемая диатомовая флора, включающая более 80 таксонов, преимущественно бентосных. Из них изучены и описаны 13 видов бесшовных диатомовых.

Ключевые слова: бесшовные диатомовые; миоцен; массив Фишер; Восточная Антарктида

The Late Cenozoic history of Antarctica is reflected in the few ice-free ground deposits of the continental marginal zone. While the planktonic diatom flora of the Cenozoic Antarctic, which has dominated the biocenoses of the Southern Ocean since the Eocene, has been fairly well studied based on Deep-Sea Drilling, the benthic diatoms found in sediments have been studied extremely poorly. In the materials collected during the 52nd and 53rd Russian Antarctic expeditions in 2006–2008 from deposits of the Fisher Massif (central part of the Prince Charles Mountains), a rich fossil diatom complexes were found, including more than 80 mainly benthic taxa. Of these, 13 species of araphid diatoms have been studied and described.

Keywords: araphid diatoms; Miocene; Fisher Massif; East Antarctica

В гляциально-морских осадочных толщах массива Фишер (центральная часть гор Принс-Чарльз, Восточная Антарктида) установлена богатая ископаемая диатомовая флора, включающая более 80 таксонов, преимущественно бентосных (до 83% от общего состава). Из них были подробно изучены и описаны 26 видов диатомовых (Гогорев, Пушина, 2011, 2012; Gogorev, Pushina, 2014). Количественно преобладают виды рода *Saeptifera*, в большом количестве обнаружены виды *Achnanthes* (2 вида), *Amphora* (2), *Biddulphia*, *Cocconeis* (9), *Diploneis* (2), *Ellerbeckia*, *Melosira*, *Nitzschia* (3), *Pinnularia*, *Podosira*, *Trachyneis*, *Trigonium*, а также бесшовные диатомовые из родов *Grammatophora*, *Fragilaria* s.l. и *Rhabdonema* (Layba, Pushina, 1997; Пушина и др., 2011;

Gogorev, Pushina, 2014). Диатомовые ассоциации отражают мелководные фьордовые условия осадконакопления с незначительным проникновением океанических вод.

Обнаруженные диатомовые характеризуются хорошей сохранностью и достаточным количеством панцирей, что позволяет сделать заключение о накоплении диатомовых *in situ* (Layba, Pushina, 1997; Пушина и др., 2011). Возраст диатомового комплекса из нижней части обнажения 52700–52702 (массив Фишер) определяется как среднемиоценовый вследствие доминирования планктонных диатомовых *Denticulopsis simonsenii* (14,2–4,5 млн лет назад) и *Actinocyclus ingens* (16,4–0,6 млн лет назад), поскольку они являются видами-индексами среднего миоцена в зональных стратиграфических шкалах, построенных по материалам глубоководного бурения (Schrader, 1976; Ciesielski, 1983; Baldauf, Barron, 1991; Harwood, Maruyama, 1992; Censarek, Gersonde, 2003). Средне-позднемиоценовый (11,5–7,5 млн лет назад) возраст осадков, содержащих уникальные комплексы бентосных диатомовых, установлен в результате датирования раковин моллюсков из этих же горизонтов стронциевым методом определения абсолютного возраста (Jadwiszczak et al., 2013).

В настоящее время продолжается изучение бесшовных пеннатных диатомовых, которые нуждаются в таксономическом описании. На основе изучения материалов в СМ и СЭМ получены данные по морфологии и таксономии 13 видов, предварительно относимых нами к родам *Rhabdonema* и *Fragilaria* s.l. Распространение и обилие видов в изученных отложениях варьирует от низкого до очень высокого. Например, наименьшая встречаемость видов *Saeptifera* (2–13% от общей численности створок диатомовых) отмечена в основании разрезов 52700–52702 (образцы 52700, 52700-1) и 53114 (образец 53114-1). В нижней части разреза 52618–52619 (образцы 52618-1, 52618-3, 52618-5) обилие составляет 23–33% с преобладанием *S. turbinata*. Наибольшая встречаемость (до 84%) с доминированием *S. turbinata* (62%) обнаружена в основании разреза Fisher C (образец Fisher C31). Распространение многих видов ограничивается палеофьордами гор Принс-Чарльз, что может свидетельствовать о их вымирании уже в неогене. Возможно, к вымершим следует отнести и большинство видов *Fragilaria* s.l. и «*Rhabdonema*», хотя их распространение не ограничивается местонахождением в районе гор Принс-Чарльз: обломки створок, сходных с этими видами, обнаружены в позднемиоценовых (Harwood, 1986: как *Nitzschia* sp. A,) и плиоценовых осадках (Brady, 1979: как *Synedra?* sp.), вскрытых бурением (DVDP 10 и 11) в районе Сухих долин Мак-Мердо.

Работа выполнена в рамках плановой темы БИН РАН (тема № 121021600184-6).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Абакумов В.А. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 240 с.
2. Баринова С.С., Медведева Л.А. Атлас водорослей-индикаторов сапробности (российский Дальний Восток). – Владивосток: Дальнаука, 1996. – 364 с.
3. Баринова С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. Водоросли-индикаторы в оценке качества окружающей среды. – М.: ВНИИприроды, 2000. – 150 с.
4. Денисов Д.Б., Косова А.Л. Диатомовые водоросли в оценке качества вод озерно-речной системы Паз // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2018. № 15. С. 449–452. DOI: <https://doi.org/10.31241/FNS.2018.15.114>.
5. Закруткин В.Е., Решетняк О.С., Гибков Е.В. Эколого-гидрохимические особенности речных вод степной зоны юга России (в пределах Ростовской области) // Степи Северной Евразии: материалы VIII междунар. симпозиума (Оренбург, 9–13 сентября 2018 г.). – Оренбург, 2018. – С. 379–383.

6. *Песенко Ю.А.* Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях. – М.: Наука, 1982. – 288 с.
7. *Прошкина-Лавренко А.И.* Диатомовые водоросли – показатели солёности воды // *Прошкина-Лавренко А.И., Шешукова В.С.* (отв. ред.). Диатомовый сборник. – Л.: Изд-во Ленинградского Государственного университета им. А.А. Жданова, 1953. – С. 186–205.
8. *Стрельникова Н.И., Гладенков А.Ю.* Диатомовые водоросли и их использование в стратиграфических и палеогеографических исследованиях // *Вопросы современной альгологии.* 2019. Т. 20, № 2. С. 1–38. DOI: [https://doi.org/10.33624/2311-0147-2019-2\(20\)-1-38](https://doi.org/10.33624/2311-0147-2019-2(20)-1-38).
9. *Шутиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д.* Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. – Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. – 463 с.
10. *Dam H., Mertens A., Sinkeldam J.* A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from the Netherlands // *Netherlands Journal of Aquatic Ecology.* 1994. V. 28, № 1. P. 117–133. DOI:10.1007/bf02334251.
11. *Sládeček V.* System of Water Quality from the Biological Point of View // *Archiv für Hydrobiologie.* Beiheft 7. Ergebnisse der Limnologie. Heft 7. 1973. 218 S.

Загадочная ископаемая центрическая диатомовая из Антарктиды

Enigmatic fossil centric diatom species from Antarctica

Гололобова М.А.¹, Пушина З.В.², Гогорев Р.М.³, Георгиев А.А.¹

Maria A. Gololobova, Zinaida V. Pushina, Rinat M. Gogorev,
Anton A. Georgiev

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
биологический факультет (Москва, Россия)

²Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов
Мирового Океана имени академика И.С. Грамберга (Санкт-Петербург, Россия)

³Ботанический институт имени В.Л. Комарова РАН (Санкт-Петербург, Россия)

gololobovama@mail.ru

При изучении кайнозойских отложений в оазисе Бангера (Восточная Антарктида) была обнаружена центрическая диатомовая водоросль, для которой не удалось однозначно установить таксономическое положение. Исследование материала методами световой и электронной микроскопии позволило сделать вывод о принадлежности этой диатомовой к роду *Hyalodiscus*, однако для определения видового статуса данного таксона необходимо проведение дальнейших исследований.

Ключевые слова: *Hyalodiscus obsoletus*; *Melosira adeliae*; *Podosira antarctica*; диатомовые водоросли; морфология; микроскопия; Восточная Антарктида; оазис Бангера; плейстоцен; плиоцен

In the course of our study of Cenozoic sediments from the Bunge Oasis (Eastern Antarctica), we found specimens of the centric diatom with unclear taxonomic placement. Examination of the material by light and scanning electron microscopy led to the conclusion that this diatom species belonged to the genus *Hyalodiscus*, but its true identity is unclear. Further investigations were needed to determine the taxonomic position of this taxon.

Keywords: *Hyalodiscus obsoletus*; *Melosira adeliae*; *Podosira antarctica*; diatoms; morphology; microscopy; Eastern Antarctica; Bunge Hills; Pleistocene; Pliocene

Изучением ископаемых диатомовых водорослей Антарктиды, в частности, с целью решения вопросов стратиграфии и палеогеографии, занимались и занимаются многие ученые. Наиболее оптимальными районами для такого рода палеоисследований служат антарктические моря и водоемы оазисов, в осадках которых можно обнаружить богатые комплексы диатомей (Пушина, 2008). Одним из таких районов является оазис Бангера, расположенный в береговой зоне восточной Антарктиды, между 65°58' и 66°20' ю.°ш. и 100°28' и 101°20' в.°д. Оазис Бангера является самым большим оазисом Антарктики: его материковая часть представлена массивом площадью 280 км², также оазис включает расположенные к северу от него острова общей площадью около 167 км². Оазис с юго-востока ограничен склонами материковых льдов, с юга и запада – выводными ледниками, на севере – шельфовым ледником Шеклтона, который отделяет оазис от открытого моря. На территории оазиса Бангера установлены водоемы нескольких типов: морские заливы, пресноводные озера, пресноводные озера с

периодическим поступлением морских вод, и гиперсоленые озера (Большаянов, 1990; Melles et al., 1997; Kulbe et al., 2001; Gibson et al., 2006).

Материалом для данного исследования послужили образцы кайнозойских отложений (обнажения 63432 и 64433), которые были отобраны на полуострове Вертолетный (оазис Бангера, Восточная Антарктида) в ходе работ 62–64 Российских Антарктических Экспедиций (2016–2019 гг.). Изученные осадки представляют собой алевроито-песчаные суглинки предположительно плиоценового(?)–четвертичного возраста (Пушина и др., 2020). Образцы были изучены при помощи световой (СМ, Leica DM2500) и сканирующей электронной (СЭМ, JEOL JSM-6380LA и ThermoScientific, Quattro S) микроскопии.

В ходе исследования отложений из обнажений 63432 и 64433, в диатомовых комплексах в качестве сопутствующего/доминантного вида были обнаружены створки центрической диатомовой водоросли, идентифицированной ранее как *Podosira antarctica* Gogorev et Pushina (Пушина и др., 2020). Этот вид был описан из неогеновых отложений массива Фишер (Восточная Антарктида), для которого в качестве синонима авторы приводят *Hyalodiscus obsoletus* Sheshuk. sensu Laiba (laps. cal!) et Pushina (Layba, Pushina, 1997: Fig. 3, 3) (Гогорев, Пушина, 2011: 42). Заметим, однако, что до описания *P. antarctica*, при изучении диатомовых комплексов в отложениях Восточной Антарктиды данный таксон указывался как *H. obsoletus* (З.В. Пушина, устное сообщение), и, в частности, именно как *H. obsoletus* приведен в работе по биостратиграфии, основанной на кайнозойских диатомовых массива Фишер (Whitehead et al., 2004), а также в издании, посвященном исследованиям биоразнообразия древних ледников Антарктики (Kellogg, Kellogg, 2005). К сожалению, вид *P. antarctica* был не вполне корректно описан Р.М. Гогоревым и З.В. Пушиной (2011) и, с большой долей вероятности, «включает в себя» несколько разных видов/родов, в связи с чем, проводить сравнение обнаруженной в оазисе Бангера центрической диатомовой с описанием и микрофотографиями *P. antarctica* довольно затруднительно.

При детальном изучении морфологии отмеченной в оазисе Бангера центрической диатомовой с помощью СМ и СЭМ были обнаружены признаки, характерные для рода *Hyalodiscus*, в частности: (1) наличие пупка; (2) наличие в прикраевой зоне створки ареол, образующих прямые/косые ряды; (3) наличие на лицевой поверхности створки закрытых снаружи и изнутри ареол; (4) наличие локулярных ареол; (5) наличие на загибе створки мелких римопортул, неотличимых от ареол на наружной поверхности и сильно редуцированных изнутри (с очень короткой трубкой, практически сидячих). Нам не удалось обнаружить у исследованных экземпляров «губчатой стенки» панциря (буллул), а также велума (роты) на внутренней поверхности створки, что, по данным Ф. Раунда с соавт. (Round et al., 1990: 162–163), характерно для данного рода. Возможно, это связано с плохой сохранностью исследованных образцов.

Что касается видовой идентификации, то этот вопрос остается до конца нерешенным по ряду причин. При внешнем морфологическом сходстве исследованного вида с *H. obsoletus*, есть ряд отличий по морфометрическим признакам, в частности, в числе рядов ареол в периферической зоне створки. К тому же, *H. obsoletus* был изначально описан из диатомовой свиты верхнего миоцена Северного Сахалина (Шешукова-Порецкая, 1964) и, согласно Т.Ф. Козыренко и И.В. Макаровой (2002), ограничен в своем распространении Северным полушарием.

Помимо этого, хочется отметить, что из современных проб с побережья Антарктиды (мыс Марджери, Земля Адели), был описан вид *Melosira adeliae* Manguin (Manguin, 1957: 112, Pl. I, 1, Pl. VII, 48a, b), переведенный В.А. Николаевым в род *Hyalodiscus* (*Hyalodiscus adelius* (Manguin) Nikolaev) на основании следующих признаков: наличие пупка, расположение ареол в прикраевой зоне в виде косо пересекающихся рядов и кольца римопортул на вершине загиба створки (Николаев,

1984: 33, табл. I, 4). Этот вид по морфологии и морфометрическим признакам сходен с образцами, которые мы обнаружили в отложениях оазиса Бангера, а также с *H. obsoletus* (Козыренко, Макарова, 2002: 14, табл. 6, I–II). Однако вопрос о конспецифичности всех этих таксонов требует дополнительных исследований, в том числе, изучения типовых материалов.

Работа М.А. Гололобовой и А.А. Георгиева выполнена в рамках Государственного задания, части 2 п. 01 10 (тема №121032300080-0); работа Р.М. Гогорева выполнена в рамках плановой темы БИН РАН (тема № 121021600184-6).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. *Большаинов Д.Ю.* Основные черты геоморфологического строения оазиса Бангера (Восточная Антарктида) // Информационный бюллетень Советской антарктической экспедиции. 1990. Вып. 113. С. 79–90.
2. *Гогорев Р.М., Пушина З.В.* Некоторые центрические диатомовые (Bacillariophyta) из неогеновых отложений массива Фишер (горы Принс-Чарльз, Восточная Антарктида) // Новости систематики низших растений. 2011. Т. 45. С. 32–49. DOI: <https://doi.org/10.31111/nsnr/2011.45.32>
3. *Козыренко Т.Ф., Макарова И.В.* *Hyalodiscus* Ehr. // Макарова И.В. (ред.). Диатомовые водоросли России и сопредельных стран. Ископаемые и современные. Том II, Вып. 3. — СПб.: Изд-во С.-Петербургского университета, 2002. — С. 10–19.
4. *Николаев В.А.* К морфологии видов рода *Hyalodiscus* Ehr. (Bacillariophyta) из Антарктики // Новости систематики низших растений. 1984. Т. 21. С. 32–35.
5. *Пушина З.В.* Позднечетвертичные диатомовые водоросли и эволюция палеогеографических обстановок в центральном секторе Восточной Антарктики: Автореф. дис. канд. геол.-минер. наук. — Санкт-Петербург, 2008. — 20 с.
6. *Пушина З.В., Гогорев Р.М., Гололобова М.А., Бирюков А.С.* Новые данные о палеоэкологических условиях формирования четвертичных отложений оазиса Бангера (Восточная Антарктида): эндемичные и новые таксоны диатомовых водорослей // Биогеография и эволюционные процессы. Материалы LXVI сессии Палеонтологического общества при РАН. — СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2020. — С. 203–204.
7. *Шеицуква-Порецкая В.С.* Новые и редкие морские диатомовые водоросли из неогена Сахалина и Камчатки // Новости систематики низших растений. 1964. Т. 1. С. 69–77. DOI: <https://doi.org/10.31111/nsnr/1964.1.69>
8. *Gibson J.A.E., Roberts D., Van de Vijver B.* Salinity control of the distribution of diatoms in lakes of the Bunge Hills, East Antarctica // *Polar Biology*. 2006. V. 29, № 8. P. 694–704. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00300-006-0107-8>
9. *Kellogg D.E., Kellogg T.B.* Frozen in time: the diatom record in ice cores from remote drilling sites on the Antarctic ice sheets // *Castello J.D., Rogers S.O.* (eds.). *Life in Ancient Ice*. — Princeton: Princeton University Press, 2005. — P. 69–93.
10. *Kulbe T., Melles M., Verkulich S.R., Pushina Z.V.* East Antarctic climate and environmental variability over the last 9400 years inferred from marine sediments of the Bunge Oasis // *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2001. V. 33, № 2. P. 223–230. DOI: <https://doi.org/10.1080/15230430.2001.12003425>
11. *Layba A.A., Pushina Z.V.* Cenozoic glacial-marine sediments from the Fisher Massif (Prince Charles Mountains) // *The Antarctic region: geological evolution and processes. Proceedings VII International symposium on Antarctic Earth Science*. — Siena: Terra Antarctica Publishers, 1997. — P. 977–984.
12. *Manguin E.* Premier inventaire des diatomées de la Terre Adélie Antarctique. Espèces nouvelles // *Revue Algologique, Nouvelle Série*. 1957. Т. 3, № 3. P. 111–134.
13. *Melles M., Kulbe T., Verkulich S.R., Pushina Z., Hubberten H.-W.* Late Pleistocene and Holocene environmental history of Bunge Hills, East Antarctica, as revealed by freshwater and epishelf lake sediments // *The Antarctic region: geological evolution and processes. Proceedings VII International symposium on Antarctic Earth Science*. — Siena: Terra Antarctica Publishers, 1997. — P. 809–820.
14. *Round F.E., Crawford R.M., Mann D.G.* *The diatoms. Biology and morphology of the genera*. — Cambridge: Cambridge University Press, 1990. — 747 p.
15. *Whitehead J.M., Harwood D.M., McKelvey B.C., Hambrey M.J., McMinn A.* Diatom biostratigraphy of the Cenozoic glaciomarine Pagodroma Group, northern Prince Charles Mountains, East Antarctica // *Australian Journal of Earth Sciences*. 2004. V. 51, №4. P. 521–547. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1400-0952.2004.01072.x>

Новые морфотипы стоматоцист золотистых водорослей из Шиченгского верхового болота (Вологодская область)

New morphotypes of chrysophyte stomatocysts from the Shichenskoe raised bog (Vologda Region)

Капустин Д.А.¹, Филиппов Д.А.², Шадрина С.Н.³, Куликовский М.С.¹

Dmitry Kapustin, Dmitriy Philippov, Svetlana Shadrina,
Maxim Kulikovskiy

¹Институт физиологии растений имени К.А. Тимирязева РАН (Москва, Россия)

²Институт биологии внутренних вод имени И.Д. Папанина РАН (Борок, Россия)

³Ботанический институт имени В.Л. Комарова РАН (Санкт-Петербург, Россия)

dima_kapustin@outlook.com

Приводятся сведения о трех потенциально новых для науки морфотипах стоматоцист золотистых водорослей из Шиченгского болота (Вологодская обл.) Поверхность двух стоматоцист орнаментирована шипами, а третьего – короткими ребрами. Прослежены стадии развития орнаментации в процессе морфогенеза.

Ключевые слова: стоматоцисты; морфология; золотистые водоросли

Three potentially new chrysophycean stomatocysts were recorded from the Shichenskoe raised bog (Vologda Region). The surface of two morphotypes is ornamented with spines whereas the third stomatocyst is ornamented with short ribs. The different stages of ornamentation development were observed.

Keywords: stomatocysts; morphology; chrysophytes

Золотистые водоросли (Chrysophyceae) способны образовывать эндогенные кремнеземные стоматоцисты, особые покоящиеся стадии, при наступлении неблагоприятных условий внешней среды. Стоматоцисты хорошо сохраняются в отложениях и могут использоваться для оценки скрытого разнообразия золотистых водорослей в водоемах. Кроме того, часто стоматоцисты обладают характерной морфологией, что позволяет использовать их в таксономии.

Шиченгское болото расположено в центральной части Сямженского муниципального района Вологодской области в пределах подзоны средней тайги и представляет собой крупную (15,9 тыс. га) болотную систему (Филиппов, 2015). Биоразнообразие болота охарактеризовано в работе Д.А. Филиппова с соавт. (Philippov et al., 2021).

Изучение морфологического разнообразия стоматоцист золотистых водорослей Шиченгского болота нами начато в 2016 г. и позволило описать четыре новых для науки морфотипа (Kapustin et al., 2016). Дальнейшие исследования показали, что в болоте встречаются и другие потенциально новые для науки морфотипы стоматоцист, которые нам не удалось идентифицировать. Ниже приводится их краткая характеристика.

Первый морфотип имеет сферическую форму и широкий конический воротничок. Поверхность незрелых стоматоцист гладкая, по мере созревания стоматоцисты в заднем полушарии формируются шипы, которые у зрелых форм имеют разветвленную форму.

Второй морфотип сферический с низким цилиндрическим воротничком. У незрелых стоматоцист поверхность гладкая, а по мере созревания формируются короткие ребра, которые у зрелой цист приобретают вид широких лопастей.

Наконец, третий морфотип имеет сферическую до слегка сплюсненной форму. Поверхность цисты гладкая, с немногочисленными палочковидными шипами в заднем полушарии. Короткий цилиндрический воротничок имеет расширенную блюдцевидную апикальную часть. Интересно, что морфологически сходные стоматоцисты образуют *Chromulina pascheri* Hofeneder и *Chromulina truncata* Conrad (Starmach, 1985), но они отличаются от нашего морфотипа размерами и отсутствием шипов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 22-24-00662).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Филиппов Д.А. Флора Шиченгского водно-болотного угодья (Вологодская область) // Фиторазнообразие Восточной Европы. 2015. Т. 9, №4. С. 86–117. DOI: <https://doi.org/10.24411/2072-8816-2015-10033>
2. Kapustin D.A., Philippov D.A., Gusev E.S. Four new chrysophycean stomatocysts with true complex collar from the Shichenskoe raised bog in Central Russia // Phytotaxa. 2016. Vol. 288, № 3. P. 285–290. DOI: <http://dx.doi.org/10.11646/phytotaxa.288.3.10>
3. Philippov D.A., Ermilov S.G., Zaytseva V.L., Pestov S.V., Kuzmin E.A., Shabalina J.N., Sazhnev A.S., Ivicheva K.N., Sterlyagova I.N., Leonov M.M., Boychuk M.A., Czobadze A.B., Prokina K.I., Dulin M.V., Joharchi O., Shabunov A.A., Shiryayeva O.S., Levashov A.N., Komarova A.S., Yurchenko V.V. Biodiversity of a boreal mire, including its hydrographic network (Shichenskoe mire, north-western Russia) // Biodiversity Data Journal. 2021. Vol. 9. e77615. DOI: <https://doi.org/10.3897/BDJ.9.e77615>
4. Starmach K. Chrysophyceae und Haptophyceae. / Ettl H., Gerloff J., Heynig H. & Mollenhauer D. (eds.) Süßwasserflora von Mitteleuropa. B. 1. – Stuttgart: Gustav Fisher Verlag, 1985. – 515 p.

***Fragilaria shirshovii* sp. nov. – новый вид арафидных диатомовых водорослей (Bacillariophyta, Fragilariophyceae) из Обского эстуария (Карское море, Арктика)**

***Fragilaria shirshovii* sp. nov. – A new species of araphid diatoms (Bacillariophyta, Fragilariophyceae) from the Gulf of Ob (Kara Sea, Arctic)**

Лобус Н.В., Глущенко А.М., Мальцев Е.И., Куликовский М.С.

**Nikolay V. Lobus, Anton M. Glushchenko, Yevhen I. Maltsev,
Maxim Kulikovskiy**

Институт физиологии растений имени К.А. Тимирязева РАН (Москва, Россия)

lobus.nikolay@gmail.com

Новый вид *Fragilaria shirshovii* sp. nov. описывается на основе молекулярных и морфологических исследований. Клетки выделены из поверхностного слоя в зоне смешения речных и морских вод в Обской губе. Морфология этого вида анализируется с помощью световой и сканирующей электронной микроскопии. Филогенетический анализ выполнен на основе анализа частичных генов 18S рРНК и *rbcL*. В работе обсуждаются различия между *F. shirshovii* sp. nov. и близкими видами таксона Fragilariaceae.

Ключевые слова: Диатомовые; морфология; таксономия; филогения; *rbcL*; SSU; Западная Сибирь

A new species *Fragilaria shirshovii* sp. nov. is described on the basis of molecular and morphological investigations. Cells were isolated from surface levels of desalinated water masses in the zone of mixing river and marine waters in the Gulf of Ob. Morphology of this species is analyzed with light and scanning electron microscopy. Phylogenetic analysis was performed based on the analysis of partials 18S rRNA and *rbcL* genes. The paper discusses the differences between *F. shirshovii* sp. nov. and related species of the taxon Fragilariaceae.

Keywords: Diatoms; morphology; taxonomy; phylogeny; *rbcL*; SSU; Western Siberia

Род *Fragilaria* Lyngbye 1819 распространен в различных климатических зонах по всему миру и часто является важной частью сообществ микроводорослей в пресноводных экосистемах, охватывающих широкий спектр экологических условий среды (Kulikovskiy et al. 2016). В настоящее время общепризнано, что разделение видов внутри рода *Fragilaria* является достаточно сложной задачей. Несмотря на многочисленные исследования, выполненные в последние два десятилетия, вопросы идентификации, разделения и, в целом, ревизии рода *Fragilaria*, остаются не решенными (Kahlert et al. 2019; Zakharova et al. 2023). Как правило, это объясняется общими морфологическими признаками, описанием видов исключительно на основе световой микроскопии, а также неясной, часто перекрывающейся дисперсией количественных параметров и необходимостью использования сканирующей электронной микроскопии для документирования таксономически значимых признаков видов (Kulikovskiy et al. 2016; Kahlert et al. 2019).

Целью данной работы является описание нового вида *Fragilaria*, выделенного нами в культуру из распресненных вод Обского эстуария.

Работы были выполнены в Обской губе в ходе 58-го рейса НИС «Академик Иоффе» 15–16 августа 2021 г., в рамках программы «Арктический плавучий университет». Пробы воды отбирали в верхнем 0.5-1.0-метровом слое воды пробоотборной системой "Розетта" с прикрепленными пластиковыми батометрами Нискина на ст. 3935 (72° 28.636' N, 73° 56.701' E). Далее образец помещали в стерильные полипропиленовые емкости и выдерживали в прохладном светлом месте до выделения штаммов микроводорослей в лаборатории. Гидрохимические параметры воды в период отбора проб были: $t = 10.65$ °C, $pH = 8.17$, соленость < 0.1 PSU (Lobus et al., 2022).

Новый вид *Fragilaria shirshovii* sp. nov. выделен в культуру и описан из поверхностного слоя распресненных водных масс зоны смешения речных и морских вод Обского эстуария (Арктика). Морфология данного вида была проанализирована с помощью световой (LM) и сканирующей электронной микроскопии (SEM). Створки *F. shirshovii* sp. nov. имеют форму от веретинной, до почти линейной. Панцири соединяются между собой в центральной части, образуя двойные гребенчатые колонии. Осевое поле узколанцетное, с четкой округлой или прямоугольной фасцией в центральной части. Прозрачные стрии присутствуют в центральной области. Ареолы не различимы в LM. Поля апикальных пор состоят из небольших пор и закрытых папиллярных выростов. Губы римопортулы хорошо выражены. Стрии однорядные. Филогенетический анализ, основанный на фрагментах генов 18S рРНК и *rbcL*, позволяет сделать вывод о том, что вид *F. shirshovii* sp. nov. является представителем Fragilariaceae. Наиболее похожими видами на *F. shirshovii* sp. nov. являются *F. crotonensis*, *F. pararumpens*, *F. bidens* и *F. perminuta*. Обсуждаются ключевые отличия *F. shirshovii* sp. nov. от близких таксонов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (22-24-00945).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Куликовский М.С., Глуценко А.М., Генкал С.И., Кузнецова И.В. Определитель диатомовых России. – Ярославль: Филигрань, 2016. – 804 с.
2. Kahlert M., Kelly M.G., Mann D.G., Rimet F., Sato S., Bouchez A., Keck F. Connecting the morphological and molecular species concepts to facilitate species identification within the genus *Fragilaria* (Bacillariophyta) // Journal of Phycology. 2019. V.55. P. 948–970. DOI: <https://doi.org/10.1111/jpy.12886>.
3. Zakharova Y., Marchenkov A., Petrova D., Bukin Y., Morozov A., Bedoshvili Y., Podunay Y., Davidovich O., Davidovich N., Bondar A. Delimitation of Some Taxa of *Ulnaria* and *Fragilaria* (Bacillariophyceae) Based on Genetic, Morphological Data and Mating Compatibility // Diversity. 2023. V.15. P. 271. DOI: <https://doi.org/10.3390/d15020271>.
4. Lobus N.V., Glushchenko A.M., Osadchiev A.A., Maltsev Y.I., Kapustin D.A., Konovalova O.P., Kulikovskiy M.S., Krylov I.N., Drozdova A.N. Production of Fluorescent Dissolved Organic Matter by Microalgae Strains from the Ob and Yenisei Gulfs (Siberia) // Plants. 2022. V.11. P. 3361. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11233361>.

Современная систематика и филогения ахнантоидных диатомовых

Current taxonomy and phylogeny of achnantheid diatoms

Цеплик Н.Д.^{1,2}

Natalia D. Tseplik

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
биологический факультет (Москва, Россия)

²Институт физиологии растений имени К.А. Тимирязева РАН (Москва, Россия)

ntseplik@gmail.com

Освещена история таксономии ахнантоидных диатомовых, современная система и филогения данной группы, и проведен анализ значимости морфологических признаков, используемых при описании одношовных родов.

Ключевые слова: *Achnanthes*; ахнантоидные диатомовые; филогения; систематика; морфология

The communication presents the evolution of achnantheid diatoms' taxonomy, their current position, and phylogeny of this group. The weight of morphological characteristics applicable to monoraphid genera is analyzed.

Keywords: *Achnanthes*; achnantheid diatoms; phylogeny; taxonomy; morphology

Ахнантоидные диатомовые – нетаксономическая группа, представителей которой долгое время относили в единственный род *Achnanthes* Bory (Lange-Bertalot, Krammer, 1989), объединявший виды по признаку наличия шва только на одной створке панциря. В 1990-х годах был начат пересмотр этого сборного рода (Round et al., 1990; Bukhtiyarova, Round, 1996; Round, Bukhtiyarova, 1996), было описано большое количество новых таксонов родового и видового рангов. На данный момент группа ахнантоидных диатомовых включает 30 родов и около 750 видов (Guiry, Guiry, 2023). На филогенетическом дереве одношовные диатомовые расположены как минимум в трех кладах, не состоящих в близком родстве друг с другом (Witkowski et al., 2016). Таксономия одношовных диатомовых представляет трудности для исследователей, поскольку многие представители этой группы мелкоклеточные и для правильной их идентификации требуется применение электронной микроскопии; некоторые таксоны представляют собой группы криптических видов, разделение которых возможно только с помощью молекулярных методов. Кроме того, до сих пор стоит вопрос о том, какие морфологические признаки следует использовать для выделения родов и видов внутри данной группы (Kulikovskiy et al., 2020).

В докладе будут рассмотрены изменения в таксономии ахнантоидных диатомовых за последние несколько десятилетий и современное представление о филогении и систематике данной группы, а также представлен анализ таксономической значимости морфологических признаков, используемых для описания представителей *Achnanthes* s.l.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Bukhtiyarova L., Round F.E. Revision of the genus *Achnanthes* sensu lato. *Psammothidium*, a new genus based on *A. marginulatum* // *Diatom Research*. 1996. V.11, №1. P. 1–30. DOI: <https://doi.org/10.1080/0269249X.1996.9705361>
2. Guiry M.D., Guiry G.M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. 2023. <https://www.algaebase.org> (дата обращения 14.06.2023)
3. Kulikovskiy M., Glushchenko A., Kuznetsova I., Genkal S., Kocielek J.P. *Golobovia* gen. nov. – a new genus from Lake Baikal with comments on pore occlusion in monoraphid diatoms // *Phycologia*. 2020. V.59, №6. P. 616–633. DOI: <https://doi.org/10.1080/00318884.2020.1830596>
4. Lange-Bertalot H., Krammer K. *Achnanthes*, eine Monographie der Gattung. Mit Definition der Gattung *Cocconeis* und Nachträgen zu den Naviculaceae. *Bibliotheca Diatomologica*. Bd. 18. – Berlin; Stuttgart: J. Cramer, 1989. – 393 S.
5. Round F.E., Bukhtiyarova L. Four new genera based on *Achnanthes* (*Achnantheidium*) together with a re-definition of *Achnantheidium* // *Diatom Research*. 1996. V.11, №2. P. 345–361. DOI: <https://doi.org/10.1080/0269249X.1996.9705389>
6. Round F.E., Crawford R.M., Mann D.G. *The Diatoms. Biology and morphology of the genera*. – Cambridge: Cambridge University Press, 1990. – 747 p.
7. Witkowski A., Li C., Zglobicka I., Yu S., Ashworth M., Dabek P., Qin S., Tang C., Krzywda M., Ruppel M., Theriot E.C., Jansen R.K., CAR A., Płocinski T., Wang Y., Sabir J.S.M., Daniszewska-Kowalczyk G., Kierzek A., Hajra N.H. Multigene assessment of biodiversity of diatom (Bacillariophyceae) assemblages from the littoral zone of the Bohai and Yellow seas in Yantai region of northeast China with some remarks on ubiquitous taxa // *Journal of Coastal Research*. 2016. V.74. P. 166–195. DOI: <https://doi.org/10.2112/SI74-016.1>

Номенклатура и таксономия двух байкальских видов *Cocconeis* (Bacillariophyta): *Cocconeis baikalensis* и *Cocconeis skvortzowii*

Nomenclature and taxonomy of two Baikal *Cocconeis* species (Bacillariophyta): *Cocconeis baikalensis* and *Cocconeis skvortzowii*

Юрчак М.И.¹, Гогорев Р.М.¹, Соколова И.В.¹, Куликовский М.С.²,
Глущенко А.М.²

Maria I. Yurchak, Rinat M. Gogorev, Irina V. Sokolova,
Maxim S. Kulikovskiy, Anton M. Glushchenko

¹Ботанический институт имени В.Л. Комарова РАН (Санкт-Петербург, Россия)

²Институт физиологии растений имени К.А. Тимирязева РАН (Москва, Россия)

RGogorev@binran.ru

Кратко изложена номенклатурная история двух таксонов *Cocconeis*, описанных Б.В. Скворцовым из оз. Байкал, в том числе проанализированы все синонимы, указанные для них в литературе. Из материалов К.И. Мейера и А.П. Скабичевского выбраны лектотип и эптитип *C. placentula* var. *baicalensis* Skvortzov et K.I. Meyer, а также неотип *C. placentula* var. *baikalensis* Skvortzov.

Ключевые слова: *Cocconeis*; Борис Скворцов; диатомовые; Байкал; Россия

A nomenclatural history of two taxa described by B.V. Skvortzov (Skvortzow) from Baikal Lake is briefly outlined, including the analysis of all synonyms mentioned in literature. From the materials of K.I. Meyer and A.P. Skabichevsky, the lectotype and epitype of *C. placentula* var. *baicalensis* Skvortzov et K.I. Meyer, as well as the neotype of *C. placentula* var. *baikalensis* Skvortzov are chosen.

Keywords: *Cocconeis*; Boris Skvortzov; diatoms; Lake Baikal, Russia

Род *Cocconeis* Ehrenb. включает таксоны одношовных диатомовых водорослей, распространенных повсеместно (Al-Handal et al., 2019; Jahn et al., 2021). В оз. Байкал отмечено 9 таксонов *Cocconeis* (Skvortzow, Meyer, 1928; Skvortzow, 1937; Забелина и др., 1951; Kulikovskiy et al., 2016), в том числе эндемичные *C. placentula* var. *baicalensis* Skvortzov et K.I. Meyer, *C. placentula* var. *baikalensis* Skvortzov и *C. nanoburyatica* Kulikovskiy & Lange-Bertalot.

Номенклатурная и таксономическая история двух таксонов *Cocconeis*, описанных Б.В. Скворцовым из оз. Байкал, запутанна. Различное написание эпитетов и цитирование их авторов в AlgaeBase (Guiry, Guiry, 2023) привело нас к необходимости разобраться в этом вопросе.

Разновидность *Cocconeis placentula* var. *baicalensis* Skvortzov et K.I. Meyer была описана Скворцовым (Skvortzow, Meyer, 1928) по материалам К.И. Мейера. В протологе авторство не было указано. В дальнейшем Мейер (Мейер, 1930) указал Скворцова как единственного автора таксона, поскольку сам не обрабатывал материал. Вопрос авторства обсуждается во многих работах (Скабичевский, 1974; Kociolek, Stoermer, 1988;

Williams, Reid, 2001), их авторы следуют указанию Мейера, что, однако, не соответствует правилам Международного кодекса номенклатуры водорослей, грибов и растений (ICN): в данном случае авторство должно быть приписано обоим авторам работы, где обнародовано название разновидности (Turland et al., 2018: Art. 46, Note 5).

В 1937 г. Скворцов (Skvortzow, 1937) описал разновидность *Cocconeis placentula* var. *baikalensis* Skvortzow, основанную на другом типе, о чем, в частности, свидетельствуют различия в описаниях и иллюстрациях в обоих протоколах (Skvortzow, Meyer, 1928: pl. 1, fig. 25; Skvortzow, 1937: pl. 5, figs 7, 8, 5). Ее название незаконно, поскольку настолько сходно с эпитетом ранее описанной разновидности, что существует вероятность их смешения (Turland et al., 2018: Art. 53.2, по аналогии с примером 11). Сосуществование этих двух эпитетов привело к путанице названий, которая до сих пор не устранена, например, в базе данных AlgaeBase (Guiry, Guiry, 2023).

В дальнейшем Скворцов (1946) повысил ранг первой разновидности (*Cocconeis placentula* var. *baikalensis* Skvortzow et K.I. Meyer, 1928) до видового, но при обнародовании комбинации изменил первоначальное написание эпитета на «*baikalensis*», что еще более усугубило путаницу.

Для второй из обсуждаемых разновидностей (*Cocconeis placentula* var. *baikalensis* Skvortzow, 1937) были независимо обнародованы заменяющие названия: *C. placentula* var. *skvortzowii* Skabitsch. ex Sheshukova (Диатомовый..., 1950: 86) и *C. placentula* var. *sibirica* Skabitsch. (Скабичевский, 1952: 36). Первое из них послужило базионимом комбинации в ранге вида: *C. skvortzowii* (Skvortzow) Sheshukova (Забелина и др., 1951: 193); таким образом, число гомотипных названий, применяемых к данному таксону в разных рангах и в разных публикациях, возросло до четырех.

Стоит отметить, что в большинстве вышеперечисленных работ по *Cocconeis skvortzowii* описание шовной створки оставалось неизвестным или вызывало сомнения, поскольку используемое изображение было схематичным и неинформативным. Детальный рисунок шовной створки с изображением штрихов был сделан А.П. Скабичевским (1977).

В нескольких флористических работах отмечены находки *Cocconeis skvortzowii*, (Лосева и др., 2004; Медведева, Никулина, 2014; Харитонов, 2014), не подкрепленные описаниями и иллюстрациями. Поскольку оба вида считались эндемиками Байкала, данные о находках требуют проверки и подтверждения в будущем. К тому же, следует отметить, что *C. skvortzowii* сходен с *C. pseudothumensis* по внешнему виду створки и отношению ее длины к ширине и отличается по частоте штрихов на шовной створке. *C. baikalensis* последний раз был отмечен Скабичевским (1977), материалы которого вошли в нашу работу.

В коллекции Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН (LE-A) мы обнаружили сборы Мейера, на основании которых была описана *Cocconeis placentula* var. *baikalensis* Skvortzow et K.I. Meyer (1928). Основываясь на первоописании и оригинальных иллюстрациях, мы наметили в качестве лектотипа ее названия часть образца LE A0002286. Поскольку такие признаки, как строение копул и ареол, сложно увидеть на световом уровне, необходим выбор эпитипа, с которого могут быть сделаны микрофотографии на сканирующем электронном микроскопе. Материал Мейера, по которому описана *C. placentula* var. *baikalensis* Skvortzow (1937), не найден, поэтому в его отсутствие мы выбрали неотип названия этой разновидности из сборов Скабичевского, наиболее соответствующий протологу. Типификация в соответствии с правилами ICN (Turland et al., 2018: Arts. 7.11, 9.22–23) планируется к публикации в ближайшее время.

Работа Р.М. Гогорева и М.И. Юрчак выполнена в рамках плановой темы БИН РАН «Флора и систематика водорослей, лишайников и мохообразных России и фитогеографически важных регионов мира» (№ 121021600184-6); работа И.В. Соколовой – в рамках

государственного задания БИН РАН «Гербарные фонды БИН РАН (история, сохранение, изучение и пополнение)» (№ АААА-А18-118022090078-2).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Диатомовый анализ. Книга 3. Определитель ископаемых и современных диатомовых водорослей. Порядок Pennales. – М.; Л., 1950. – 401 с.
2. Забелина М.М., Киселев И.А., Прошкина-Лавренко А.И., Шешукова В.С. Определитель пресноводных водорослей СССР. Диатомовые водоросли. Вып. 4. – М.: Советская наука, 1951. – 619 с.
3. Лосева Э.И., Стенина А.С., Марченко-Ваганова Т.И. Кадастр ископаемых и современных диатомовых водорослей Европейского Северо-Востока. – Сыктывкар, 2004. – 156 с.
4. Медведева Л.А., Никулина Т.В. Каталог пресноводных водорослей юга Дальнего Востока России. – Владивосток: Дальнаука, 2014. – 271 с.
5. Мейер К.И. Введение во флору водорослей озера Байкала // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Новая серия. 1930. Т.39, №3–4. С. 179–396.
6. Скабичевский А.П. К систематике байкальских диатомей // Ботанические материалы отдела споровых растений Ботанического института имени В.Л. Комарова АН СССР. 1952. Т.8. С. 36–45.
7. Скабичевский А.П. Об истинном авторстве таксонов водорослей, описанных в работе В. W. Skvortzow and C. I. Meyer. A contribution to the diatoms of Baical Lake. “Proceedings of the Sungaree River Biological Station”, 1928, V.1, №5 // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический. 1974. Т.79, №1. С. 152–156.
8. Скабичевский А.П. Водорослевые обрастания Хетоморфы сублиторали восточного берега Байкала. Природные комплексы низших растений Западной Сибири. – Новосибирск, 1977. – С. 121–132.
9. Скворцов Б.В. Новые и малоизвестные виды Algae, Flagellatae, Phycomicetae из Азии, Америки, Африки, а также с островов Японии и Цейлона, описанные в 1931–45 г.г., с 18 таблицами рисунков // Записки Харбинского общества естествоиспытателей и этнографов. 1946. Т.2. Ботаника. С. 1–34.
10. Харитонов В.Г. Диатомовые водоросли Колымы. – Магадан: Кордис, 2014. – 496 с.
11. Al-Handal A.Y., Riaux-Gobin C., Jahn R., Wulf A., Minerovic A. Two new marine species of Cocconeis (Bacillariophyceae) from the west coast of Sweden // European Journal of Taxonomy. 2019. V.497. P. 1–16. <https://doi.org/10.5852/ejt.2019.497>
12. Guiry M.D., Guiry G.M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. 2023. <http://www.algaebase.org> (дата обращения: 06.06.2023).
13. Jahn R., Abarca N., Al-Handal A., Kusber W.-H., Zimmermann J., Skibbe O. Integrative taxonomic description of the marine species *Cocconeis crawfordii* (Bacillariophyceae) based on unialgal strains // Nova Hedwigia. 2021. V.151. P. 85–105.
14. Kocielek J.P., Stoermer E.F. Taxonomy and systematic position of the *Gomphoneis quadripunctata* species complex // Diatom Research. 1988. V.3. P.95–108. DOI: <https://doi.org/10.1080/0269249X.1988.9705019>
15. Skvortzow B.W., Meyer C.I. A contribution to the diatoms of Baikal Lake // Proceedings of the Sungaree River Biological Station. 1928. V.1, № 5. P. 1–55.
16. Skvortzow B.W. Bottom diatoms from Olhon Gate of Baikal Lake, Siberia // Philippine Journal of Science. 1937. V.62, №3. P. 293–377.
17. Turland N. J., Wiersema J. H., Barrie F. R., Greuter W., Hawksworth D.L., Herendeen P.S., Knapp S., Kusber W.-H., Li D.-Z., Marhold K., May T. W., McNeill J., Monro A. M., Prado J., Price M. J., Smith G. F. (eds.). International Code of Nomenclature for algae, fungi, and plants (Shenzhen Code) adopted by the Nineteenth International Botanical Congress, Shenzhen, China, July 2017. Glashütten: Koeltz Botanical Books. (Regnum Vegetabile. Vol. 159), 2018. <https://doi.org/10.12705/Code.2018>
18. Williams D.M., Reid G.A. bibliography of the scientific work of Boris V. Skvortzov (1896–1980) with commentary on the publications concerning diatoms (Bacillariophyta) // Bulletin of the British Museum Natural History, Botany Series. 2001. V.31, №2. P. 89–106.

Секция 2.

***Генетика, эволюция и филогения;
флористика, биогеография и фитоценология***

Роль метакаспаз в развитии и гибели клеток в лабораторной культуре диатомовой водоросли *Ulnaria acus* (Kützing) Aboal

The role of metacaspases in the development and death of cells in a laboratory culture of the diatom *Ulnaria acus* (Kützing) Aboal

Байрамова Э.М., Марченков А.М., Захарова Ю.Р., Петрова Д.П.,
Бедошвили Е.Д.

Elvira M. Bayramova, Artem M. Marchenkov, Yulia R. Zakharova, Darya
P. Petrova, Yekaterina D. Bedoshvili

Лимнологический институт СО РАН (Иркутск, Россия)

bairamovaelvria@gmail.com

Исследование участия метакаспаз и антиоксидантной системы на примере генов *UaMC1*, *UaMC2*, *UaMC3* и альдегиддегидрогеназы и глутатионсинтетазы в разных условиях культивирования пресноводной диатомовой водоросли *Ulnaria acus* (Kützing) Aboal с помощью ПЦР в реальном времени показало их участие не только в процессах гибели клетки, но и экспрессию с разной активностью на протяжении интерфазы.

Ключевые слова: диатомовые водоросли; клеточная гибель; клеточный цикл; метакаспазы

The study of the participation of metacaspases and the antioxidant system on the example of the genes *UaMC1*, *UaMC2*, *UaMC3*, aldehyde dehydrogenase and glutathione synthetase under different conditions of cultivation of the freshwater diatom *Ulnaria acus* (Kützing) Aboal using real-time PCR showed their participation not only in cell death processes, but also expression with different activity during the interphase.

Keywords: diatoms; cell death; cell cycle; metacaspase

Сталкиваясь с изменениями окружающей среды, диатомовые водоросли проявляют высокую адаптационную способность. Однако интенсивные и продолжительные изменения (например, дефицит нутриентов или изменение освещенности) приводят к гибели клеток (Bidle, 2016; Mizrachi et al., 2019). Акклиматизации и гибель клеток представляют собой сложные процессы, регулируемые на молекулярном уровне. Все больше данных появляется о том, что важными участниками в данных процессах являются метакаспазы, которые представляют собой протеазы, специфически разрезающие пептидный субстрат после аминокислот аргинина и/или лизина в процессах программируемой гибели клеток у растений и микроводорослей (Bidle and Bender, 2008; Wang et al., 2020; Graff van Creveld et al., 2021). Метакаспазы также важны и для других клеточных процессов (Nakajima and Kuranaga, 2017). Окислительный стресс, который является основной причиной гибели клеток (Lauritano et al., 2015), компенсируется работой антиоксидантной системы – альдегиддегидрогеназы и глутатионсинтетазы (*ALDH* и *GSHS*). Следует отметить, что в настоящее время недостаточно данных о работе антиоксидантной системы и метакаспаз

у диатомей. Ранее, в геноме *U. acus* было обнаружено 8 генов метакаспаз (Morozov, 2019). Анализ предсказанных аминокислотных последовательностей показала, что необходимые для функциональной активности аминокислотные мотивы имеют только метакаспазы *UaMC1*, *UaMC2*, *UaMC3*, у остальных пяти они нарушены (Байрамова и др., 2021).

В качестве объекта исследования использовался аксеничный штамм ВК498 пресноводной диатомовой водоросли *Ulnaria acus* из коллекции отдела ультраструктуры клетки ЛИН СО РАН. Клетки инкубировали при 4 °С, с освещенностью 16 мкмоль/м²/с при цикле дня/ночи 12:12, в среде DM в течении двух недель для достижения экспоненциальной фазы роста. После этого клетки разделялись на две группы – для исследования стрессового воздействия и синхронизации культуры. В качестве стрессового воздействия использовался дефицит кремния, который является лимитирующим фактором для диатомей. Для этого клетки отмывали от среды и помещали в среду DM без метасиликата натрия после чего культивировали неделю, как описано выше. Для выделения РНК биомассу собирали каждые два дня. Для синхронизации культуры клетки помещали в среду без метасиликата натрия в темноту на 24 часа. Затем добавляли метасиликат натрия до конечной концентрации 0,2 мМ и культивировали в обычных условиях. Биомассу для выделения РНК отбирали каждые 4 часа в течении 24 часов.

В данной работе анализировали экспрессию мРНК метакаспаз *UaMC1*, *UaMC2*, *UaMC3*, а также альдегиддегидрогеназы и глутатионсинтетазы (*ALDH* и *GSHS*) методом ПЦР в реальном времени. Анализ относительной экспрессии генов проводили с использованием метода delta delta ct. По результатам анализа RefFinder в качестве референсного гена для исследования синхронизированной культуры использовали ген 18S рРНК, а в условиях дефицита кремния – ген E2. Для выяснения значения метакаспаз на деление диатомей в среду добавляли специфический ингибитор (*Z-Val-Arg-Pro-DL-Arg-fluoromethylketone trifluoroacetate salt*, Bachem); клетки культивировали при нормальных условиях, и проводили подсчет численности клеток.

Нами было показано, что в условиях дефицита кремния клетки *U. acus* прекращают делиться уже через сутки. Окрашивание флуоресцентным красителем Live Cell Labeling Kit (Abcam) показало, что клетки сохраняют свою жизнеспособность в течение недели. Спустя 1 сутки возрастает уровень экспрессии *UaMC1* и высокий уровень сохраняется в течение пяти дней кремниевого голодания, после чего уровень резко снижается. Уровень экспрессии *UaMC2* возрастает на третьи сутки депривации кремния и постепенно снижается, однако, оставаясь выше контрольного значения. Экспрессия *UaMC3* возрастает на третий день культивирования без кремния и сохраняется высокой на протяжении всего эксперимента. На седьмой день голодания по кремнию возрастает экспрессия *ALDH*, а экспрессия *GSHS* увеличивается на третьи сутки и остается постоянной до конца эксперимента. Таким образом, анализ *ALDH* и *GSHS* подтверждает процесс окислительного стресса в культуре при депривации кремния.

При воздействии ингибитора метакаспаз на клетки *U. acus* наблюдается угнетение деления клеток, при этом в контроле было показано, что уровень экспрессии исследуемых метакаспаз остается постоянным в течение всего эксперимента. Полученный результат может указывать на важную роль метакаспаз *UaMC1*, *UaMC2*, *UaMC3* для диатомей.

Эксперимент с синхронизированной культурой показал различие в экспрессии генов метакаспаз *UaMC1*, *UaMC2*, *UaMC3* в процессе морфогенеза створки и на протяжении интерфазы. Экспрессия *UaMC1* и *UaMC3* имеет колебательный характер. В первые часы увеличивается, падает спустя 12 часов от начала эксперимента и резко повышается через 20 часов, а затем вновь снижается до минимальных значений. Колебания уровня экспрессии *UaMC2* имеют сходную, но менее выраженную динамику.

Уровень экспрессии генов антиоксидантной системы защиты колеблется незначительно, однако, отмечается пик спустя 20 часов от начала эксперимента у обоих генов. Уменьшение уровня экспрессии всех исследуемых генов спустя 24 часа после возобновления деления может указывать на переход клеток непосредственно к митозу, демонстрируя известное явление транскрипционного молчания при входе в него (Palozola et al., 2017).

Таким образом, в данной работе нами исследовано участие метакаспаз и антиоксидантной системы в процессах, связанных с реакцией на дефицит кремния в среде у диатомей. На примере *U. acus* впервые показана активность метакаспаз в интерфазе. Полученные данные будут способствовать пониманию роли данных протеаз в клеточном цикле и в ответе на стрессовые условия.

Работа выполнена в рамках бюджетного проекта ФГБУН ЛИН СО РАН № 1210323001869.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Байрамова Э.М., Марченков А.М., Морозов А.А., Бедошвили Е.Д. Идентификация и анализ генов семейства метакаспаз у *Fragilaria radians* // Молекулярная генетика, микробиология и вирусология, спецвыпуск. 2021. С. 12.
2. Bidle K.D. Programmed Cell Death in Unicellular Phytoplankton // Current Biology. 2016. V. 26. N. 13. P. 594-607. DOI: 10.1016/j.cub.2016.05.056
3. Bidle K.D., Bender S.J. Iron starvation and culture age activate metacaspases and programmed cell death in the marine diatom *Thalassiosira pseudonana* // Eukaryotic Cell. 2008. V. 7. P. 223-236. DOI: 10.1128/EC.00296-07
4. Graff van Creveld S., Ben-Dor S., Mizrachi A., Alcolombri U., Hopes A., Mock T., Rosenwasser S., Vardi A. Biochemical characterization of a novel redox-regulated metacaspase in a marine diatom // Frontiers in Microbiology. 2021. V. 12. DOI: 10.3389/fmicb.2021.688199
5. Lauritano C., Orefice I., Procaccini G., Romano G., Ianora A. Key genes as stress indicators in the ubiquitous diatom *Skeletonema marinoi* // BMC Genomics. 2015. V. 28. N. 16. DOI: 10.1186/s12864-015-1574-5
6. Mizrachi A., Graff van Creveld S., Shapiro O.H., Rosenwasser S., Vardi A. Light-dependent single-cell heterogeneity in the chloroplast redox state regulates cell fate in a marine diatom // Elife. 2019. V. 8. e47732. DOI: 10.7554/eLife.47732
7. Morozov A.A. Duplications and subdomain shuffling in diatom metacaspases // Limnology and Freshwater Biology. 2019. V. 2. N. 3. DOI: 10.31951/2658-3518-2019-A-3-240
8. Nakajima Y.I., Kuranaga E. Caspase-dependent non-apoptotic processes in development // Cell Death and Differentiation. 2017. V. 24. N. 8. P. 1422-1430. DOI: 10.1038/cdd.2017.36
9. Palozola K.C., Donahue G., Liu H., Grant G.R., Becker J.S., Cote A., Yu H., Raj A., Zaret K.S. Mitotic transcription and waves of gene reactivation during mitotic exit // Science. 2017. V. 358. N. 6359. P. 119-122. DOI: 10.1126/science.aal4671
10. Wang H., Chen F., Mi T., Liu Q., Yu Z., Zhen Y. Responses of marine diatom *Skeletonema marinoi* to nutrient deficiency: programmed cell death // Applied and Environmental Microbiology. 2020. V. 86. DOI: 10.1128/AEM.02460-19

Сравнительный анализ компонентов микротрубочкового центра у диатомовых водорослей

Comparative analysis of the diatom microtubule center components

Бедошвили Е.Д., Байрамова Э.М., Морозов А.А., Петрова Д.П.

Yekaterina D. Bedoshvili, Elvira M. Bayramova, Alexey A. Morozov,
Darya P. Petrova

Лимнологический институт СО РАН (Иркутск, Россия)

bedoshvilied@list.ru

Формирование кремнеземных панцирей диатомовых водорослей происходит внутри клеток под контролем цитоскелета и микротрубочкового центра. Состав микротрубочкового центра диатомей ранее не был изучен. В настоящем исследовании выделены несколько компонентов микротрубочкового центра у диатомовых водорослей. По данным геномов и транскриптомов проведен анализ и выявлены структурные особенности предсказанных аминокислотных последовательностей GCP, протеинкиназы Аврора А и центринов.

Ключевые слова: микротрубочковый центр; белки комплекса гамма-тубулина; протеинкиназа Аврора А; центрин

The diatom silica frustule formation occurs inside cells under the control of cytoskeleton and microtubule center. The composition of the diatoms microtubule center has not been previously studied. In the present study, several components of the diatom microtubule center in have been identified. Based on the genome and transcriptome data, an analysis was carried out and the structural features of the predicted amino acid sequences of GCP, protein kinase Aurora A, and centrins were revealed.

Keywords: microtubule center; gamma-tubulin complex proteins; Aurora A protein kinase; centrin

Способность синтезировать внутри своих клеток видоспецифичные кремнеземные панцири является отличительной особенностью диатомовых водорослей. Многие исследования направлены на поиск генетических и клеточных механизмов, обеспечивающих различия в симметрии и структуре кремнистых панцирей этих организмов. Показано, что в контроле морфогенеза створки имеет значение цитоскелет, а наиболее изучена к настоящему моменту роль микротрубочек (Tesson, Hildebrand 2010; Bedoshvili, Likhoshway, 2021). В клетке полимерзация/деполимеризация тубулинов регулируется большим количеством белков (Teixidó-Travesa et al., 2012), а их нуклеация происходит в МикроТрубочковом Организующем Центре (МТОЦ). Для диатомовых водорослей характерна ацентросомная организация МТОЦ, то есть он не организован в триплеты, а имеет морфологически аморфное строение (Tirpitt, Pickett-Heaps 1977; De Martino et al., 2009). Таким образом, на основе имеющихся данных можно предположить, что симметрия створок диатомей определяется микротрубочковым центром.

В основе МТОЦ у всех эукариот лежит γ -тубулин, образующий более крупные комплексы (Oegema et al., 1999) с пятью другими гомологичными белками комплекса

γ -тубулина (Gamma-tubulin Complex Protein – GCP) (Gunawardane et al., 2000; Teixidó-Travesa et al., 2012). По данным полногеномных проектов *Thalassiosira pseudonana* и *Phaeodactylum tricorutum* у диатомей известно о существовании GCP2 и GCP3 (De Martino et al. 2009). Другими ранее обнаруженными участниками МТОЦ диатомей являются центрины, и, регулирующая их работу, протеинкиназа Аврора А. Поиск последовательностей других компонентов МТОЦ ранее результата не давал. В настоящем исследовании мы предприняли поиск нуклеотидных последовательностей некоторых участников МТОЦ в известных базах данных геномных и транскриптомных последовательностей диатомовых водорослей с целью провести сравнительный анализ их структуры и выявить консервативные аминокислоты и мотивы, которые могут быть функционально значимы.

Нами был предпринят поиск последовательностей GCP, серин/треониновой протеинкиназы Аврора А и центринов, которые наряду с гамма-тубулинами являются компонентами МТОЦ и обеспечивают его регуляцию. В результате сравнительного анализа предсказанных аминокислотных последовательностей удалось установить особенности структуры GCP2 и GCP3 диатомей и предположить функционально значимые консервативные а.о., в том числе сайты посттрансляционной модификации. Были впервые идентифицированы последовательности GCP4 у нескольких видов диатомей класса Mediophyceae. Известно, что наиболее важны для выполнения функции GCP grip-мотивы, структурные участки, вовлеченные во взаимодействие GCP между собой и гамма-тубулином (Gunawardane et al., 2000). Анализ grip-мотивов выявил консенсусные аминокислоты, характерные для диатомей. Филогенетический анализ предсказанных аминокислотных последовательностей показал, что GCP данных организмов разделяются согласно систематике, а также образуют отдельную кладу для центрических мультирадиальных видов из класса Mediophyceae, морфологически отличающихся от остальных представителей класса.

Анализ показал, что Аврора А диатомовых водорослей высоко консервативна и в структуре предсказанных аминокислотных последовательностей данного белка наблюдаются общие закономерности, описанные для модельных организмов.

Несмотря на то, что центрины описаны как белки с высокой гомологией (Hart et al., 1999), идентичность последовательностей диатомей относительно референсной группы составляет около 40%, а среди диатомовых водорослей может достигать более 52%. Наиболее важными структурами для центринов являются четыре домена EF-hand, с помощью которых происходит регуляция работы белка путем связывания с ионами кальция. Анализ показал, что последовательности центринов диатомей содержат две пары доменов EF-hand, при этом схожее с модельными объектами строение сохраняет только один мотив, а три остальных имеют структуру, специфичную для диатомовых водорослей.

Проведенный анализ предсказанных аминокислотных последовательностей позволил выявить особенности участников МТОЦ диатомей и предположить функции и вероятные пути их регуляции.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 22-24-00080 «Исследование белков МТОЦ и тубулинов и их функции в морфогенезе кремнеземных панцирей у диатомовых водорослей».

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Bedoshvili Ye.D., Likhoshvay Ye.V. The effects of cytoskeletal inhibitors in diatoms // Annenkov V., Seckbach J. and Gordon R. (eds.). Diatom Morphogenesis. – Beverly: Wiley-Scrivener, 2021. – P. 349–364.
2. De Martino A., Amato A., Bowler C. Mitosis in diatoms: rediscovering an old model for cell division // Bioessays. 2009. V. 31, № 8, P. 874–884.
3. Gunawardane R.N., Lizarraga S.B., Wiese C., Wilde A., Zheng Y. γ -Tubulin complexes and their role in microtubule nucleation // Curr. Top. Dev. Biol. 2000. V. 49, P. 55–73.

4. Oegema K., Wiese C., Martin O.C., Milligan R.A., Iwamatsu A., Mitchison T.J., Zheng Y. Characterization of two related *Drosophila* gamma-tubulin complexes that differ in their ability to nucleate microtubules // *J. Cell Biol.* 1999. V. 144, P. 721–733.

5. Teixidó-Travesa N., Roig J., Lüders J. The where, when and how of microtubule nucleation - one ring to rule them all // *J. Cell Sci.* 2012. V. 125, P. 4445–4456.

6. Tesson B., Hildebrand M. Extensive and intimate association of the cytoskeleton with forming silica in diatoms: Control over patterning on the meso- and micro-scale // *PLoS ONE.* 2010. V. 5, № 12, P. e14300.

7. Tippit D.H., Pickett-Heaps J.D. Mitosis in the pennate diatom *Surirella ovalis* // *J. Cell Biol.* 1977. V.73, P. 705–727.

УДК 574.32:574.36:574.52:574.583:574.587:582.252:582.261 Секция 2. Генетика, эволюция и филогения;
флористика, биогеография и фитоценология

**Предварительные данные о ледовой и планктонной флоре
Арктического бассейна
(по результатам экспедиции «СП-41», 2022–2023 гг.)**

**Preliminary data on the sea-ice algae and phytoplankton
in the Arctic Basin
(based on the results of the «SP-41» expedition, 2022–2023 years)**

Гогорев Р.М.¹, Юрчак М.И.¹, Мельников И.А.²

Rinat M. Gogorev, Maria I. Yurchak, Igor A. Melnikov

¹*Ботанический институт имени В.Л. Комарова РАН (Санкт-Петербург, Россия)*

²*Южный федеральный университет,*

²*Институт океанологии имени П.П. Шириова РАН (Москва, Россия)*

Rgogorev@binran.ru; migor39@yandex.ru

В ходе экспедиции СП-41 зимний период 2022–2023 гг. с 16 станций отобраны 112 проб фитопланктона и ледовых водорослей в центральных районах СЛО. Диатомовые водоросли доминируют в образцах по составу и количественному развитию. Приведены предварительные данные по таксономическому составу и относительной роли доминирующих видов.

Ключевые слова: фитопланктон; ледовые водоросли; СП-41; Арктика; Северный Ледовитый океан

During the expedition Severny Polyus-41 in the winter of 2022–2023 112 samples of phytoplankton and sea-ice algae were taken from 16 stations in the central part of the Arctic Ocean. Diatoms dominate in the samples in species number as well as quantitative development. Preliminary data on taxonomic composition and relative role of dominant species are given.

Keywords: phytoplankton; sea-ice algae; SP-41; Arctic

За последние два десятилетия в центральных районах Северного Ледовитого океана (СЛО) произошла смена преобладания многолетних льдов однолетними сезонными. Такое перестроение физической среды привело к изменениям в составе и структуре биологических сообществ, населяющих водно-ледовую среду. Оценивать современную динамику льдообразования необходимо как для понимания причин таких изменений, так и для составления прогнозов развития биологических компонентов арктических экосистем в условиях изменяющегося климата.

В основу криобиологических исследований положены «зимние» материалы дрейфующей экспедиции в Арктическом бассейне на ледостойкой самодвижущейся платформе (ЛСП) «Северный полюс» (СП). За период дрейфа в зимний период полярной ночи с октября 2022 по апрель 2023 г. выполнено 15 станций с интервалом раз в 10 дней

в зависимости от ледовой и синоптической обстановки. Фитопланктон (16 сетных и 16 батометрических проб) в 0–50 м водном слое и керны льда (80 образцов) собраны с 11.10.2022 (82°04' N 152°12' E) по 13.04.2023 г. (87°50' N 73°28' E) в зоне дрейфа ЛСП в Трансарктическом выносе льда. Сбор и фиксацию материала проводили по стандартным методикам: при обработке собранных материалов использованы гидробиологические (Киселев, 1969), гидрохимические (Parsons et al., 1984) и криобиологические методы (Усачев, 1949; Мельников, 1989; Horner et al., 1992). Также в ходе исследований измеряли температуру воды, льда и воздуха, толщину снежного покрова, электропроводность и соленость воды, концентрацию минеральных форм кремния, фосфора и азота (нитритного, нитратного и аммонийного) в ледовых кернах и воде.

Для оценки состояния физических, химических и биологических компонентов водно-ледовой среды используются единые подходы полевых и лабораторных методов обработки собранных материалов для круглогодичного мониторинга современной динамики изменений водно-ледовой экосистемы центральных районов СЛО.

Состав фитопланктона определяют водоросли из отделов Bacillariophyta и Miozoa. Во льду преобладают диатомовые. Наиболее разнообразным по числу таксонов и определяющим количественные характеристики как планктона, так и ледовой флоры является отдел Bacillariophyta, что является характерным и отмечалось неоднократно ранее (Мельников, 1982, 1989, 2005, 2008; Мельников, Бондарчук, 1987). Зимний фитопланктон крайне бедный как качественно, так и количественно, в его составе найдены диатомовые из родов *Thalassiosira*, *Amphora*, *Grammatophora*, *Navicula*, *Nitzschia*, *Pinnularia*, динофлагелляты *Dinophysis* sp. и *Protoberidinium* spp., золотистая *Octactis* (= *Dictyocha*) *speculum*. Другая группа ледовых (условно бентосных) видов включает представителей родов *Gyrosigma*, *Navicula*, *Nitzschia* (включая комплекс *N. frigida*/*N. neofrigida*), а также истинно-ледовые *Cylindrotheca closterium* и случайно-ледовые (вмерзшие) таксоны *Chaetoceros* (в основном, споры), *Dinophysis* sp. (Miozoa, динофлагелляты), *Ebria tripartita* (Cercozoa), *Thalassiosira* spp. Предварительные данные показывают, что таксономически наиболее разнообразен средний слой ледовых кернов, иногда богаты видами верхние слои льда, а нижние – обычно пустые. В ходе дальнейших исследований будет интересно выяснить причины и закономерности такого распределения водорослей.

Работа выполнена в рамках плановой темы БИН РАН «Флора и систематика водорослей, лишайников и мохообразных России и фитогеографически важных регионов мира» (№ 121021600184-6) и темы Госзадания № 0149–2018–0009.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Киселев И.А. Планктон морей и континентальных водоемов. Т.1. Вводные и общие вопросы планктологии. – Л.: Наука, 1969. – 658 с.
2. Мельников И.А. Подледные гидробиологические наблюдения в Центральной Арктике // Сб. работ Института биологии моря ДВНЦ АН СССР. 1982. Т. 25. С. 68–73.
3. Мельников И.А. Экосистема арктического морского льда. – М.: Институт океанологии им. П.П. Ширшова АН СССР, 1989. – 191 с.
4. Мельников И.А. Экосистемы морского льда и верхнего слоя океана в условиях глобальных изменений в Арктике // Биология моря. 2005. Т. 31, № 1. С. 3–10.
5. Мельников И.А. Современная экосистема арктического морского льда: динамика и прогноз // Доклады РАН. 2008. Т. 423, № 6. С. 1–4.
6. Мельников И.А., Бондарчук Л.Л. К экологии массовых скоплений колониальных диатомовых водорослей под арктическим дрейфующим льдом // Океанология. 1987. Т. 27, № 2. С. 317–321.
7. Усачев П.И. Микрофлора полярных льдов // Тр. ИО АН СССР. 1949. Т. 3. С. 216–259.

8. Horner R., Ackley S.F., Dieckmann G.S., Gulliksen B., Hoshiai T., Legendre L., Melnikov I.A., Reeburgh W.S., Spindler M., Sullivan C.W. Ecology of the sea ice biota. 1. Habitat, terminology, and methodology // *Polar Biol.* 1992. Vol. 12. P. 417–427. <https://doi.org/10.1007/BF00243113>

9. Parsons T.R., Maita Y., Lalli C.M. Determination of chlorophylls and total carotenoids: spectrophotometric method // *A manual of chemical & biological methods for seawater analysis.* – Toronto: Pergamon Press, 1984. – P. 101–104.

Разнообразие диатомовых водорослей в водоемах Курганской области

Diversity of diatoms in the water bodies of the Kurgan region

Еремкина Т.В.

Tatiana V. Eremkina

Уральский филиал ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии» (Екатеринбург, Россия)

tver60@mail.ru

В данной работе впервые представлены обобщенные литературные, фондовые (1929–2021 гг.) и собственные (2001–2021 гг.) данные о разнообразии диатомовых водорослей водоемов Курганской области. Общий список выявленных к настоящему времени таксонов включает 178 видов, разновидностей и форм диатомовых водорослей, принадлежащих 3 классам, 18 порядкам, 32 семействам, 61 роду. По типу местообитания преобладают бентосные формы, по отношению к солености – индифференты, в группе индикаторов ацидификации – алкалифилы. Среди таксонов с известным географическим распределением космополиты составляют 85,5%.

Ключевые слова: диатомовые водоросли; водоемы; таксономическое разнообразие; Курганская область

This paper summarizes the literature, stock and own data on the diversity of diatoms in the water bodies of the Kurgan region. The general taxonomic list includes 172 species, varieties and forms of diatoms belonging to 3 class, 18 orders, 32 families and 60 genera. According to the type of habitat, benthic forms predominate, indifferent - in relation to salinity, in the group of acidification indicators – alkaliphiles. Cosmopolitans make up 85.5% of taxa with a known geographical distribution.

Keywords: diatoms; water bodies; taxonomic diversity; Kurgan region

Территория Курганской области расположена между 54°10' и 56°46' с.ш., 62°02' и 68°39' в.д., в юго-западной части Западно-Сибирской низменности - крупнейшей равнины на Земле. Современный рельеф территории характеризуется общим слабым уклоном с юго-запада на северо-восток. Речная сеть относится к бассейну Карского моря и входит в Обь-Иртышскую систему. Географическое положение – в глубине континента с удаленностью от теплых морей Атлантики, отгороженностью Уральским хребтом с запада и открытостью с северной и южной стороны – определяют ее климат как континентальный умеренного пояса с неустойчивыми метеорологическими условиями. Большая часть территории области расположена в подзоне лесостепи степной зоны (География ..., 2019).

По сравнению с другими регионами РФ Курганская область обладает крайне ограниченными водными ресурсами как по количеству, так и по качеству вод. На ее территории насчитывается 114 больших, средних и малых рек, протяженностью более 10 км, 2943 озера и 32 водохранилища. Большинство озер характеризуется небольшими размерами и малыми глубинами, не превышающими 1,0-3,0 м (География ..., 2019).

Литературные данные о диатомовой флоре водоемов региона отрывочны. Впервые видовой состав водорослей в водных объектах Курганской области изучался в 1929 г. Н.Н. Ворониным. В опубликованном им описании водорослей 42 озер Курганской лесостепи упоминается 6 видов и 8 родов диатомовых водорослей (Воронихин, 1929). В сводном списке водорослей Южного Зауралья, встречающихся в водоемах Курганской области, приводится перечень из 35 таксонов (Науменко, Суханов, 1999). При изучении альгофлор озер Лебяжьевого района упоминается о нахождении 42 таксонов *Vacillariophyta* в исследуемых водоемах и приводятся 5 наиболее часто встречающихся видов (Зверева, 2011). При мониторинговых исследованиях в р. Тобол выявлено 65 видов диатомовых водорослей, в его притоках – 45 видов, однако таксономический список видов не приводится (Несговорова и др., 2021).

Цель настоящей работы – систематизация литературных, фондовых и собственных данных (сборы фитопланктона в вегетационный период 2001–2021 гг. на рыбохозяйственных водоемах Курганской области) о видовом составе диатомовых водорослей как существенной составляющей альгофлоры пресноводных водоемов.

Пробы фитопланктона отбирали на стационарных станциях наблюдений на глубину фотического слоя, фиксировали 40%-ным раствором формалина и обрабатывали по общепринятым методикам (Методика ..., 1975) с использованием светового микроскопа «Микмед-6». Численность водорослей определяли в камере Нажотта объемом 0,01 см³, биомассу – счетно-объемным методом (Методика ..., 1975; Садчиков, 2003). За основу классификации при оценке таксономического состава сообщества принята система, используемая в альгологической базе данных *Algaebase* (Guiry, Guiry, 2023). Для эколого-географической характеристики водорослей использовали данные Бариновой С.С. с соавт. (Баринова и др., 2006).

Исследуемые озера (Алакуль, Большое и Малое Бутырино, Большие Донки, Суерское, Щучье) – солоноватые, мелководные, эвтрофные, периодически заморные, карасевого типа. Вода характеризуется высокой жесткостью и цветностью, значительным содержанием биогенных элементов (Изиметова, 2019). Участок р. Тобол в среднем течении и р. Утяк при впадении в р. Тобол отличаются высоким уровнем антропогенной нагрузки. Для многолетней динамики минерализации характерны спады и подъемы от 300 мг/дм³ до 1350 мг/дм³. Качество воды соответствует 4 классу «грязная» с превышением ПДКр/х по целому ряду показателей (магний, сульфаты, БПК₅, ионы аммония, нитриты, рН, фосфаты).

К настоящему времени по имеющимся в нашем распоряжении данным световой микроскопии сводный список диатомовых водорослей водоемов Курганской области с учетом современных номенклатурных преобразований насчитывает 178 таксонов (160 видов, разновидностей и форм), принадлежащих 3 классам, 18 порядкам, 32 семействам, 61 роду, что существенно ниже разнообразия диатомовых флор водоемов регионов, граничащих с Курганской областью, или географически близких областей. Так, по нашим данным, для Свердловской области в настоящее время известно о нахождении 417 таксонов, для Челябинской – 519 (Ярушина и др., 2004), для Оренбургской – 320 (Яценко-Степанова и др., 2007). Нами в исследованных водных объектах Курганской области выявлено 152 таксона, что составляет 85,4% от сводного списка диатомовых водорослей, идентифицированных в водоемах региона.

По разнообразию диатомовые водоросли занимают второе место после зеленых водорослей, их доля от общего состава альгофлоры водоемов региона достигает 27,18%, что сопоставимо с флорой Оренбургской области. Пропорции флоры *Vacillariophyta* водоемов Курганской области составили 1:1,9:5,0:5,6, родовая насыщенность – 1:2,6.

В сводном списке преобладают представители порядков *Vacillariales* (27,5 % от общего состава), *Surirellales* (15,7 %) и *Naviculales* (15,2 %), формируя 58,4 % от общего разнообразия.

Ведущими семействами диатомовой флоры водоемов Курганской области являются: Bacillariaceae (27 таксонов), Surirellaceae (24), Naviculaceae (15), Gomphonemataceae (10), Fragilariaceae (9), Ulnariaceae (8), Rhopalodiaceae (8), Stephanodiscaceae (7), Tabellariaceae (6), Achnanthesaceae (6), включающие 67,4% от общего разнообразия. Доля семейств с мало видовым (1–5 таксонов) представительством составила 32,6%.

В спектр ведущих родов вошли: *Nitzschia* (20 таксонов), *Surirella* (12), *Navicula* (9), *Gomphonema* (6), *Epithemia* (6), *Campylodiscus* (6), *Tryblionella* (5), *Fragilaria* (5), *Ulnaria* (5), *Amphora* (5), что составляет 44,4% видового разнообразия диатомовых водорослей.

Спектры ведущих семейств и родов свидетельствуют о том, что альгофлора Bacillariophyta водоемов Курганской области обладает индивидуальными чертами по сравнению с уже упомянутыми региональными флорами. При этом роды с 1-2 видами составили 60,6 % от общего количества выявленных родов, что характерно для флор водоемов Уральского региона (Ярушина и др., 2004) и придает альгофлоре водоемов Курганской области определенное сходство с бореальными флорами, что отмечалось нами ранее для цианобактерий (Еремкина, 2022).

В водных объектах области наиболее распространены следующие виды: *Ulnaria ulna* (Nitzsch) Compère 2001 (встречаемость 18,8%), *Surirella striatula* Turpin 1828 (18,8%), *Diatoma vulgare* Bory 1824 (18,8%), *Stephanodiscus hantzschii* Grunov 1880 (16,7%), *Rhoicosphenia abbreviata* (Agardh) Lange-Bertalot 1980 (16,7%), *Nitzschia acicularis* (Kützing) W. Smith 1853 (16,7%), *Cyclotella meneghiniana* Kützing 1844 (16,7%), *Surirella librile* (Ehrenberg) Ehrenberg 1845 (14,6%), *Gyrosigma acuminatum* (Kützing) Rabenhorst 1853 (14,6%), *Melosira varians* C. Agardh 1827 (14,6%), *Nitzschia vermicularis* (Kützing) Hantzsch in Rabenhorst 1860 (14,6%). Специфический комплекс видов, обнаруженных в каком-либо одном водоеме, объединил 76 таксонов рангом ниже рода (42,7% от общего таксономического разнообразия отдела).

В результате эколого-географического анализа сводного списка диатомовых водорослей выявлено, что среди таксонов с известным географическим распределением 85,5% – космополиты, 10,1% – бореальные виды, альпийские и аркто-альпийские виды представлены единично. По приуроченности к определенному местообитанию преобладают бентосные (62,3%) и планктонно-бентосные организмы (27,4%). Планктонных видов оказалось значительно меньше (9,6%), что может быть обусловлено незначительной глубиной исследуемых водных объектов. По отношению к реофильности большинство видов (48,1%) индифферентны, местообитания со стоячими водами предпочитают 42,6%, обитателей текучих вод – 9,3%. По отношению к солености воды олигогалобии составляют подавляющее большинство (75,6 %), из них индифферентны – 59,6%, галофилы – 11,5%, галофобы – 4,5%. Заметна доля мезогалобов, достигшая 24,2 %, что связано с наличием в регионе солоноватых и соленых водоемов. Сапробиологический анализ выявил 115 видов-индикаторов сапробиальности, из которых обитатели чистых вод (χ -, χ -o, χ - β , o- χ , o-сапробионты) составили 52,2%, индикаторы органического загрязнения среды – 47,8%, среди которых 52,7% могут успешно вегетировать как в чистых, так и в загрязненных органикой водах (o- β , β -o, o- α -сапробионты), 47,3% – виды-индикаторы умеренного и высокого уровня органического загрязнения (β -, β - α , α - β , α -сапробионты). По отношению к активной реакции среды преобладают алкалофилы (56,1%), доля индифферентов существенно ниже – 30,1%, алкалобионты составили 8,9%, ацидофилы – 4,9%.

По нашим наблюдениям, массового развития (\gg 10,0 %) достигали в оз. Алакуль – *Campylodiscus bicostatus* W. Smith ex Roper 1854 и *Surirella peisonis* Pantocsek 1902, в оз. Б. Бутырино – *Campylodiscus costatus* W. Smith 1851 и *Encyonema elginense* (Krammer)

D.G. Mann in Round et al. 1990, в оз. М. Бутырино – *Stephanodiscus hantzschii* Grunov 1880, *S. peisonis* и *Surirella splendida* (Ehrenberg) Kützing 1844, в оз. Б. Донки – *Surirella robusta* Ehrenberg 1840, *Surirella striatula* Turpin 1828, *S. peisonis* и *Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen 1979, в оз. Щучье – *S. striatula* и *Surirella librile* (Ehrenberg) Ehrenberg 1845, в р. Тобол – *Cyclotella meneghiniana* Kützing 1844 и *Entomoneis alata* (Ehrenberg) Ehrenberg 1845, в р. Утяк – *Amphora ovalis* (Kützing) Kützing 1844 и *Cocconeis placentula* Ehrenberg 1838.

При массовом развитии диатомовых водорослей, отмечаемых в марте, июне, сентябре, октябре их доля в структуре фитопланктона при невысокой численности может достигать 70,5–84,5% от общей биомассы.

Таким образом, диатомовые водоросли имеют важное значение для водных экосистем Курганской области, что требует их дальнейшего систематического изучения.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Баринаева С.С., Медведева О.В., Анисимова О.В. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. – Тель-Авив: Русское изд-во “Pilies Studio”, 2006. – 498 с.
2. Воронихин Н.Н. Водоросли озер Курганской лесостепи// Труды Ботанического института Академии наук СССР. Споровые растения. – Сер. 2. – М.-Л.: Изд. АН СССР, 1940. – Вып. 4. – С. 247–287.
3. География Курганской области: краеведческое пособие / Н. И. Науменко, О. Г. Завьялова, Т. Г. Акимова и др.; отв. ред. О.Г. Завьялова. – Курган: Изд-во КГУ, 2019. – 276 с.
4. Еремкина Т.В. Цианобактерии в водоемах Курганской области// Вестник БГПУ им. М. Акмуллы. № 2(63). 2022. Специальный выпуск. С. 55–63.
5. Зверева Е.В. К мониторингу состояния альгофлоры озер Лебяжьевского района// Вестник Курганского государственного университета. Серия «Естественные науки». Вып. 4. Курган: Изд-во Курганского гос. Ун-та, 2011. С. 52–53.
6. Изиметова М.Ф. Качество воды рыбохозяйственных озер Курганской области // Озера Евразии: проблемы и пути их решения. Материалы II Международной конференции (19-24 мая 2019 г.). – Казань: Издательство Академии наук РТ, 2019. – Ч. 2. – С. 98–102.
7. Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. – М.: Наука, 1975. – С. 138–170.
8. Науменко Н.И., Суханов Д.В. Список растений Южного Зауралья (Курганская область и сопредельные территории России и Казахстана): методическое пособие. – Курган: Изд-во Курганского университета, 1999. – 35 с.
9. Несговорова Н.П., Савельев В.Г., Иванцова Г.В., Фирулина И.И. Мониторинг качества вод притоков реки Тобол // Успехи современного естествознания. Науки о Земле. № 6. 2021. С. 114–121.
10. Садчиков А.П. Методы изучения пресноводного фитопланктона. – М.: Изд-во «Университет и школа», 2003. – 157 с.
11. Ярушина М.И., Танаева Г.В., Еремкина Т.В. Флора водорослей водоемов Челябинской области. – Екатеринбург: УрО РАН, 2004. – 308 с.
12. Яценко-Степанова Т.Н., Немцева Н.В., Муравьева М.Е. Флора диатомовых водорослей Оренбургской области // Вестник ОГУ. 2007. № 12. С. 51–55.
13. Guiry M.D., Guiry G.M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. 2023. <http://www.algaebase.org> (дата обращения 01.06.2023).

**Диатомовые водоросли озера Журманколь
(государственный природный заповедник «Оренбургский»)**

**Diatom algae of the Lake Zhurmankol
("Orenburgskiy" State Nature Reserve)**

Игнатенко М.Е., Яценко-Степанова Т.Н.

Marina E. Ignatenko, Tatyana N. Yatsenko-Stepanova

Институт клеточного и внутриклеточного симбиоза УрО РАН (Оренбург, Россия)

ignatenko_me@mail.ru

В работе представлены первые сведения о разнообразии диатомовых водорослей озера Журманколь, расположенного на территории государственного природного заповедника «Оренбургский». Водоем характеризуется нестабильным гидрологическим режимом. Использование сканирующей электронной микроскопии позволило выявить в водоеме 52 таксона Bacillariophyta рангом ниже рода, среди них зарегистрированы новые для Оренбургской области виды: *Diatoma polonica* M. Bak et al., *Eunotia siberica* Cleve, *Stauroneis gracilis* Ehrenberg, *S. gracilior* E. Reichardt, *S. subgracilis* Lange-Bertalot et Kramer.

Ключевые слова: Bacillariophyta; диатомовые водоросли; сканирующая электронная микроскопия

This study presents the first information about the diversity of diatom algae of Lake Zhurmankol, located on the territory of "Orenburgskiy" State Nature Reserve. The reservoir is characterized by an unstable hydrological regime. Fifty-two taxa of Bacillariophyta with a rank below the genus were identified with use of scanning electron microscopy. There were some new species for the Orenburg region among them: *Diatoma polonica* M. Bak et al., *Eunotia siberica* Cleve, *Stauroneis gracilis* Ehrenberg, *S. gracilior* E. Reichardt, *S. subgracilis* Lange-Bertalot et Kramer.

Keywords: Bacillariophyta; diatom algae; scanning electron microscopy

Озеро Журманколь (50°58'45.3"N 61°09'08.1"E) — самый крупный водоем участка «Ащисайская степь», государственного природного заповедника «Оренбургский» (восточная часть Оренбургской области, Южный Урал, Россия). Озеро занимает котловину (500×700 м) суффозионно-тектонического происхождения. Его воды относятся к гидрокарбонатному классу, кальциево-натриевой группы, пресные и, согласно классификации вод по степени жесткости, соответствуют мягким водам (Чибилев, 2014). Водоем почти полностью зарастает *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. Наполнение озера осуществляется, главным образом, в весенний период за счет снеготаяния, питание дождевое, подпитки грунтовыми и родниковыми водами нет. Для водоема характерен нестабильный гидрологический режим. Ранее максимальная глубина оз. Журманколь достигала отметки в 2,5 м, водоем был населен ондатрой и золотым карасем, а также являлся местом отдыха перелетных и гнездования водоплавающих птиц (Чибилев, 2014). В настоящее время в виду аномально высокой температуры в летний период и крайне низкого количества атмосферных осадков озеро

ежегодно пересыхает полностью, а преобладающие глубины в период оводненности составляют лишь 0,3–0,8 м. В весеннее время водоем по-прежнему является местом пролета и гнездования водоплавающих птиц (Барбазюк, 2015; Дебело и др., 2020), а также используется для водопоя кабанями.

Исследования альгофлоры оз. Журманколь были начаты в 2020 г. Первые полученные результаты выявили высокое разнообразие золотистых водорослей исследуемого водоема. В оз. Журманколь были обнаружены 32 морфотипа стоматоцист Chrysophyceae, десять из которых впервые зарегистрированы на территории России и пять описаны как новые для науки (Игнатенко и др., 2022; Ignatenko et al., 2022). Помимо этого, были зарегистрированы два вида Chrysophyceae новые для флоры России – *Mallomonas rasilis* Dürschmidt и *Paraphysomonas bandaiensis* E. Takahashi (Игнатенко и др., 2021; Ignatenko et al., 2022). Полученные результаты послужили предпосылкой для продолжения альгофлористических исследований данного водоема.

Целью работы явилось изучение разнообразия диатомовых водорослей озера Журманколь.

Материалом для исследования послужили интегрированные пробы (планктон, эпипелон и эпилитон), собранные в мае-июне 2020–2022 гг. Очистку панцирей диатомей от органического вещества проводили методом «холодного сжигания» (Балонов, 1975). Диатомовые водоросли изучали с использованием сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе Tescan Mira3 в Центре выявления и поддержки одаренных детей «Гагарин», Оренбургская область. Таксономия и номенклатура Bacillariophyta приведены в соответствии с онлайн базой данных AlgaeBase <https://www.algaebase.org/> (Guiry, Guiry, 2023).

В составе альгофлоры оз. Журманколь выявлены 52 таксона Bacillariophyta рангом ниже рода, относящиеся к 23 родам. Наибольшее число видов отмечено в родах: *Gomphonema*, *Nitzschia*, *Stauroneis* и *Eunotia*. Они объединяли 21 вид, или 40,4% от видового состава выявленных диатомей. Часто встречающимися видами были *Aulacoseira italica* (Ehrenberg) Simonsen, *Craticula cuspidata* (Kützing) D.G. Mann и *Stauroneis gracilior* E. Reichardt. Видовое богатство диатомей различалось по годам. Так, в 2020 г. в водоеме было зарегистрировано 37 таксонов рангом ниже рода; в 2021 г. – 24; наименьшее число видов было отмечено в 2022 г. – 8, что, возможно, обусловлено массовым развитием золотистых водорослей в этот период.

Основная часть выявленных видов Bacillariophyta достаточно широко распространена на территории Оренбургской области. Однако, в составе диатомового комплекса оз. Журманколь были зарегистрированы виды новые для флоры области. В их числе: *Diatoma polonica* M. Bak et al., *Eunotia siberica* Cleve, *Stauroneis gracilis* Ehrenberg, *S. gracilior*, *S. subgracilis* Lange-Bertalot et Krammer. Наиболее интересной на наш взгляд является находка *D. polonica*. Этот вид впервые был описан из лотических водоемов на юге Польши (Bağ et al., 2014). Сведения об обнаружении *D. polonica* на территории России отсутствуют. Створки найденных нами экземпляров эллиптические или эллиптически-ланцетные. Концы от широко закругленных до субголовчатых. Длина створки 11,8–24,1 мкм, ширина 4,0–5,15 мкм, соотношение длины створки к ширине 2,3–5,2, ребер 5–8 в 10 мкм, штрихи нежные, однорядные 40–50 в 10 мкм. Римопортулы две, расположены на обоих концах створки.

Изученные нами экземпляры (n=30) отличаются от описания, приведенного в работе Bağ et al. (2014), меньшей шириной створки (4,0–5,15 мкм против 5,0–7,0 мкм), но при этом соотношение длины створки к ширине соответствует протологу.

Помимо створок типичной морфологии также были отмечены створки, выраженно отличающиеся по метрическим признакам от протолога и идентифицированные как *D. cf. polonica*. Для данного морфотипа характерна овальная форма створки. Длина створки 5,8–10,4 мкм, ширина 3,8–5,2 мкм, соотношение длины

створки к ширине 1,5–2,1, 5–7 ребер в 10 мкм, штрихи нежные, однорядные 50–60 в 10 мкм. Римопортулы две, расположены на обоих концах створки. Для определения таксономического статуса этого морфотипа требуются дальнейшие детальные исследования.

В целом, данная работа продолжает серию исследований по изучению таксономического разнообразия водорослей водоемов особо охраняемых природных территорий Оренбургской области и расширяет представления о флоре водорослей Южного Урала.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-24-10056.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Балонов И.М. Подготовка водорослей к электронной микроскопии // Методика изучения биогеоценозов. – М.: Наука, 1975. – С. 87–90.
2. Барбазюк Е.В. Птицы участка «Ащисайская степь» государственного природного заповедника «Оренбургский». Аннотированный список, 1984–2014 гг. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17, № 4(4). С. 633–640.
3. Дебело П.В., Барбазюк Е.В., Куксанов В.Ф. Огарь *Tadorna ferruginea* в Шалкар-Жетыкольском озерном районе. // Русский орнитологический журнал. 2020. Т. 29, № 1993. С. 5158–5159.
4. Игнатенко М.Е., Яценко-Степанова Т.Н. Разнообразие стоматоцист хризофитовых водорослей (Chrysophyceae) степной зоны Южного Урала. // Ботанический журнал. 2022. Т. 107, № 2. С. 149–158. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0006813622020053>.
5. Игнатенко М.Е., Яценко-Степанова Т.Н., Уржумов А.А. Новые находки видов рода *Mallomonas* (Chrysophyceae, Synurales) для Оренбургской области (Южный Урал, Россия). // Новости систематики низших растений. 2021. Т. 55, № 2. С. 315–323. DOI: <https://doi.org/10.31111/nsnr/2021.55.2.315>.
6. Чибилёв А.А. Заповедник «Оренбургский»: история создания и природное разнообразие. – Екатеринбург: Институт степи УрО РАН, Оренбургское отделение Русского географического общества, ООО «УИПЦ», 2014. – 139 с.
7. Bąk M., Lange-Bertalot H., Nosek J., Jakubowska Z., Kielbasa M. *Diatoma polonica* sp. nov. – a new diatom (Bacillariophyceae) species from rivers and streams of southern Poland // International Journal of Oceanography and Hydrobiology. 2014. V.43, №2. P. 114–122. DOI: <https://doi.org/10.2478/s13545-014-0123-1>.
8. Guiry M.D., Guiry G.M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. 2023. <https://www.algaebase.org> (дата обращения – 01.06.2023).
9. Ignatenko M.E., Yatsenko-Stepanova T.N., Kapustin D. Additions to chrysophycean stomatocyst flora from South Urals shallow lake including descriptions of three new morphotypes // Phytotaxa. 2022. V. 561, № 1. P. 014-026. DOI: <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.561.1.2>.

Генетическое разнообразие некоторых распространенных видов диатомовых водорослей

Genetic diversity of some common diatom species

Кезля Е.М.¹, Ризаев Ш.Ю.¹, Лупандин-Петренко К.С.²,
Рассадкин П.С.², Фундовой Д.И.², Куликовский М.С.¹

Elena M. Kezlya, Shukrullo Yu. Rizaev, Kirill S. Lupandin-Petrenko,
Pavel S. Rassadkin, Dmitriy I. Fundovoy, Maxim S. Kulikovskiy

¹Институт физиологии растений имени К.А. Тимирязева РАН (Москва, Россия)

²Мурманский Арктический университет (Мурманск, Россия)

melosira@mail.ru

Изучение генетического разнообразия широко распространенных таксонов имеет первостепенное значение для уточнения экологических предпочтений различных генетических линий в пределах видовых комплексов. Работа посвящена изучению генетического разнообразия некоторых распространенных видов диатомовых водорослей, выделенных из водоемов на территории Московской, Ярославской и Тверской областей.

Ключевые слова: Bacillariophyceae; диатомовые водоросли; генетическое разнообразие; 18S; ITS рДНК; *rbcL*

The study of the genetic diversity of widely distributed taxa is of paramount importance for clarifying the ecological preferences of various genetic lineages within species complexes. The work is devoted to the study of the genetic diversity of some common species of diatoms isolated from water bodies in the Moscow, Yaroslavl and Tver regions.

Keywords: Bacillariophyceae; diatoms; genetic diversity; 18S; ITS rDNA; *rbcL*

Использование интегративного подхода в изучении диатомовых водорослей все чаще выявляет высокое генетическое разнообразие среди широко распространенных видов. Так, в ряде исследований показано, что *Sellaphora pupula* представляет собой парафилетическую группу, при этом морфологические синапоморфии для разделения видов четко не определены (Evans et al. 2008, Mann and Poulícková, 2019). На примере всестороннего изучения 70 штаммов *Pinnularia borealis* выделенных из различных местообитаний по всему миру Pinseel et al. (2019) выделили 10 филогенетических линий. При этом анализ морфологических характеристик с использованием светового и сканирующего электронного микроскопов, а также цитологические исследования не выявили четких дифференцирующих морфологических критериев (минимальный и максимальный диапазоны размеров клеток всех филогенетических линий перекрывались). Филогеографическая структуризация также не была обнаружена. В результате изучения морфологии, ультраструктуры и филогении 25 штаммов космополитного вида *Hantzschia amphioxys* Maltsev et al. (2021) выделили 7 видов из

которых пять были описаны как новые для науки. Напротив, в недавней работе Van de Vyve et al. (2022), посвященной исследованию сообществ планктонных диатомовых водорослей Чилийских озер, показано, что филогенетический анализ большинства обычных видов из родов *Aulacoseira* и *Asterionella* (*A. formosa*) не выявил криптическое разнообразие, за исключением комплекса *Aulacoseira granulata*. Таким образом показано, что чилийские штаммы тесно связаны с популяциями в Северном полушарии. Для *A. granulata* филогения на основе последовательности гена *rbcL* выявила четыре разных линии, включая разновидность *A. granulata* var. *angustissima*. В результате, авторы предполагают, что этот таксон представляет комплекс видов и требует дальнейшего всестороннего изучения. Современные подходы метабаркодирования позволяют оценить генетическое разнообразие в больших географических масштабах и вывести взаимосвязи генетических линий и их экологических предпочтений. Так, Pérez-Burillo et al. (2021) обнаружили генетическую вариабельность внутри распространенных видов *Achnanthydium minutissimum* и *Fistulifera saprophila*. Авторы указывают, что широкая экологическая толерантность некоторых видов диатомовых водорослей является результатом перекрывающихся предпочтений среди генотипов. Некоторые генетические линии внутри вида различаются по своим экологическим свойствам и демонстрируют различные модели распределения.

Таким образом, изучение генетического разнообразия широко распространенных таксонов имеет первостепенное значение для уточнения экологических предпочтений различных генетических линий в пределах видовых комплексов. Эти данные являются основой для понимания биогеографического распределения таксонов и, в дальнейшем, для разработки точных биологических индексов в программах биомониторинга.

Материалом данной работы послужили образцы планктона и бентоса, собранные в 2022 году на 3 водохранилищах и 4 озерах: Учинское водохранилище, Озернинское водохранилище, озеро Большое, озеро Глубокое (Московская область), озеро Плещеево, озеро Неро (Ярославская область), Ивановское водохранилище (в районе н.п. Городня, Тверская область). Отбор проб проводили по стандартным методикам три раза в течение сезона (в мае, августе и октябре). Всего собрано и обработано 42 пробы. Выделение моноклональных культур микроводорослей проводили в лаборатории молекулярной систематики водных растений ИФР РАН в течение недели после отбора на инвертированном микроскопе ZeissAxioVert A1. Стеклопипеткой Пастера выделяли из пробы отдельные клетки, промывали в нескольких каплях дистиллированной воды и помещали в лунку (300 мкл) планшета для иммуоферментного анализа с жидкой питательной средой WC. Далее планшеты помещали на 3 недели в климатическую камеру при температуре +20... +22°C и искусственном освещении с циклом 14 часов освещения и 10 часов темноты. После трех недель роста альгологически чистые культуры переносили в чашки Петри и оставляли еще на 2-3 недели в климатической камере для нарастания биомассы. Выделение ДНК из полученных штаммов проводили с использованием готового набора Chelex™ 100 Molecular Biology Grade Resin согласно инструкции производителя. В качестве генетических маркеров для филогенетического анализа использовали 18S, ITS рДНК и *rbcL*.

Всего было получено 223 моноклональных культуры водорослей. Таксономический состав включает 9 классов, 36 родов и 65 видов. Из распространенных видов диатомовых отмечены *Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen, *A. ambigua* (Grunow) Simonsen, *Fragilaria crotonensis* Kitton, *Stephanocyclus meneghiniana* (Kützing) Kulikovskiy, Genkal et Kociolek. Эти виды активно вегетировали не менее чем в четырех водоемах в течение весенне-летнего периода. В докладе будут обсуждены морфологические особенности штаммов, их генетическое разнообразие и филогения.

Работа выполнена в рамках при поддержке грантов РФФ 22-24-00965.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Evans K.M., Wortley A.H., Simpson G.E., Chepurnov V.A., Mann D.G. A molecular systematic approach to explore diversity within the *Sellaphora pupula* species complex (Bacillariophyta). // J. Phycol. 2008. V.44. P. 215–231. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2007.00454.x>
2. Mann D.G., Pouličková A. Homothallism, morphology and phylogenetic position of a new species of *Sellaphora* (Bacillariophyta), *S. pausariae*. // Plant Ecol. Evol. 2019. V.152. P. 203–218. <https://doi.org/10.5091/plecevo.2019.1626>
3. Maltsev Y., Maltseva S., Kociolek J.P., Jahn R., Kulikovskiy M. Biogeography of the cosmopolitan terrestrial diatom *Hantzschia amphioxys* sensu lato based on molecular and morphological data. // Scientific Reports 2021. V.11(1). P. 1–19.
4. Pérez-Burillo J., Trobajo R., Leira M., Keck F., Rimet F., Sigró J., Mann D.G. DNA metabarcoding reveals differences in distribution patterns and ecological preferences among genetic variants within some key freshwater diatom species. // Sci. Total Environ. 2021. V.798. 149029. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149029>

Диатомовые водоросли оз. Янычково (Свердловская область)

Diatoms of the lake Yanychkovo (Sverdlovsk region)

Корбут Д.Е.

Daria E. Korbut

Уральский филиал ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии» (Екатеринбург, Россия)

trifolium777@mail.ru

В настоящей работе анализируются результаты исследований оз. Янычково (Свердловская область) за 2016–2022 годы. Обобщены фондовые и собственные данные по видовому составу, доминантным комплексам, численности и биомассе диатомовых водорослей за этот период.

Ключевые слова: диатомовые водоросли; озеро Янычково; Свердловская область

In this paper, we analyze the results of studies of the lake Yanychkovo (Sverdlovsk region) for 2016–2022. Stock and own data on species composition, dominant complexes, abundance and biomass of diatoms for this period are summarized.

Keywords: diatoms; lake Yanychkovo; Sverdlovsk region

В настоящей работе использовались результаты исследований оз. Янычково (Свердловская область) за 2016–2022 годы. Проведен анализ фондовых и собственных данных по видовому составу, доминантным комплексам в разные годы и по показателям биомассы и численности диатомовых водорослей за этот период.

Свердловская область расположена в Предуралье, на Среднем Урале, Северном Урале и Западно-Сибирской равнине. Климат континентальный. Длительность вегетационного периода – 130–150 дней. Территория области находится в зонах средней, южной тайги и смешанных лесов. Озеро Янычково принадлежит к Сатыковской (Средне-Тавдинской) группе озер, расположенных в бассейне р. Тавды на северо-востоке области в зоне южной тайги. Характерной особенностью этих водоемов является их расположение среди крупных болотных массивов, через которые они связаны с реками. Возможно, раньше озера были связаны не только друг с другом, но и с речной системой. Постепенно формировавшиеся болота разобшили их между собой и изолировали от реки (Балабанова, 1957).

Водосбор р. Тавды охватывает огромные болотные массивы со специфичными почвами и растительным покровом. Реки и озера бассейна питаются в течение года водами, богатыми органическими веществами, интенсивно поглощающими кислород, а зимой – обескислороженными болотными и подземными водами. Поэтому в большинстве водоемов бассейна создаются подо льдом заморные для рыб условия.

Средне-Тавдинские озера расположены на озерно-аккумулятивной Тавдо-Кондинской равнине. Ледник сюда не заходил, но широкое развитие получили крупные озерные бассейны от таяния ледника. Равнина на поверхности состоит из озерно-аллювиальных песков и глин, лежащих на неогеновых, южнее – на палеогеновых песках и глинах. Рельеф плоский, местами волнистый в виде грив. Котловины плоских междугривенных пространств заполнены озерами

(гривы образовались вследствие размыва глин и песков медленно текущими водотоками). Котловины озер, возможно, образовались в четвертичный период, так как поднятие и опускание отдельных участков характерно для этой эпохи.

На водосборе Средне-Тавдинских озер преобладают подзолистые почвы, пихтово-еловые леса чередуются с сухими сосновыми борами, появляется липа, преобладают осоковые болота. Процесс заболачивания, зарастания и разобщения Тавдинских озер продолжается и в настоящее время. Наличие в озерах вблизи берегов борозд указывает на бывшие или даже и теперь еще существующие течения по определенному руслу на дне водоема. По этим бороздам проходят наибольшие глубины озер (Балабанова, 1957).

Озеро Янычково расположено в 1,5 км на юго-восток от с. Янычково, в бассейне р. Карабашка (левый приток р. Тавда). Площадь водной поверхности – 16,7 км², уровень воды – 58 м, максимальная глубина – 4 м (в юго-восточной части озера), преобладающие глубины – 1,0–1,5 м. Площадь водосбора 200 км². Озеро проточное, в него впадает р. Арчинка, вытекает р. Ольховка. Питание – за счет вод местного поверхностного и подземного стока. Среди озер Сатыковской группы имеет самую высокую минерализацию воды. Берега покрыты смешанным лесом, местами заболочены. Имеются запасы сапропеля, на заболоченных берегах гнездятся водоплавающие птицы (Рундквист, 2013).

В литературе имеются лишь отрывочные сведения о гидрохимическом режиме водоема (Красновская, 1949; Балабанова, 1957; Черняева и др., 1977).

В соответствии с ГОСТ 17.1.2.04-77 воды оз. Янычково пресные, среднеминерализованные (0,23 г/л), умеренно жесткие (3,3–3,4), pH – 8,1–8,3, цветность воды – 35,0–37,0 градусов цветности. Вода принадлежит к гидрокарбонатному классу. В целом гидрохимический режим озера, как и всех водоемов этого района, характеризуется сезонной и межгодовой неустойчивостью. По всем основным характеристикам качество воды в оз. Янычково достаточно высокое. Однако естественные условия формирования гидрохимического режима (незначительные глубины, богатая подводная растительность, насыщенные биогенами иловые отложения, заболоченность водосбора, слабая проточность и пр.) способствуют формированию периодических заморов, особенно в зимний период.

Высокая заболоченность водосбора способствует гумификации вод озера, что обуславливает повышенную цветность и перманганатную окисляемость воды. Так, в 2017 г. трофический статус водоема соответствовал альфа-безамезасапробным условиям, в 2018–2019 гг. – ксено-олигосапробным, а в 2020 г. повысился до альфа-полисапробного (Изиметова, 2019).

По совокупности гидрохимических и гидробиологических (ГОСТ 17.1.2.04-77; Жукинский и др., 1993) показателей оз. Янычково соответствует переходному эвтрофно-гипертрофному классу природного уровня трофии. Высокий уровень развития фитопланктона в водоеме соответствует альфаполисапробной (гипертрофной) стадии.

Первые сведения о видовом составе и количественных показателях развития низших водорослей в водоеме относятся к 1942 г. (Красновская, 1949). К настоящему времени таксономический список фитопланктона озера включает 201 вид, разновидностей и форм водорослей из 8 отделов.

За основу классификации при оценке таксономической структуры диатомовых водорослей взята система, используемая в альгологической базе данных Algaebase (Guiry, Guiry, 2023).

К настоящему времени по фондовым, литературным и собственным данным общий таксономический список диатомовых водорослей исследуемого озера насчитывает 59 видов, разновидностей и форм из 15 порядков, 19 семейств и 29 родов, что составляет 14,1% от сводного списка известных нам диатомовых, идентифицируемых в водоемах Свердловской области (417 таксонов). Выявлено 13 таксонов, определенных только до рода, что составляет 22% от общего списка диатомовых, известных для исследуемого озера.

В сводном списке преобладают представители порядка *Cymbellales*, формируя 23,7% от общего разнообразия диатомовых водорослей водоема.

Доля семейств с одновидовым представительством составляет 20,0%. Наиболее богатыми видами являются семейства *Cymbellales* (14 видов), *Rhopalodiales* (9 видов) и *Naviculales* (7 видов).

На уровне рода в озере наиболее распространены представители родов *Gomphonema* Ehrenberg (6 таксонов рангом ниже рода), *Nitzschia* Hassal – 5 таксонов, *Surirella* Turpin – 5, *Pinnularia* Ehrenberg – 4. Их вклад в таксономическое разнообразие диатомовых водорослей озера составил 33,8%.

Максимальные показатели развития диатомовых в водоеме зафиксированы в августе 2018 и 2020 гг., когда их биомасса достигала 1,5 г/м³, численность – 2,78 млн. кл/л и 10,4 млн. кл/л.

Видовой состав диатомовых водорослей, формирующих доминирующий комплекс, различается в разные годы. Так, в 2016 г. по численности и биомассе доминировала *Diatoma vulgare* Bory 1824; в 2017 г. – *Amphora ovalis* (Kützing) Kützing 1844; в 2018 г. по численности – *Fragilaria capucina* Desmazières 1825, по биомассе – *Symboplectra inaequalis* (Ehrenberg) Krammer 2003 и *Fragilaria capucina* Desmazières 1825. В 2019 г. по численности и биомассе доминировала *Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen 1979; в 2020 г. по биомассе – *Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen 1979, по численности – *Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen 1979 и *Surirella librile* (Ehrenberg) Ehrenberg 1845. В 2021 г. по численности преобладали *Cymbella cymbiformis* Agardh 1830 и *Gomphonema truncatum* Ehrenberg 1832, по биомассе – *Gomphonema truncatum* Ehrenberg 1832 и *Amphora ovalis* (Kützing) Kützing 1844. В 2022 г. по численности доминировала *Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen 1979, по биомассе – *Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen 1979, *Surirella librile* (Ehrenberg) Ehrenberg 1845 и *Fragilaria crotonensis* Kitton 1869.

Пик развития диатомовых водорослей, как правило, приходится на август. При невысокой численности представителей этой группы водорослей их доля в структуре биомассы фитопланктона может достигать 15,59%.

Индивидуальность видового состава и разнообразие доминантных комплексов в разные годы свидетельствует о том, что формирование фитопланктона регулируется комплексом природных абиотических факторов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Балабанова З.М. Озера бассейна реки Тавды //Изв. ВНИОРХ. 1957. Т. XXXIX. С. 208–226.
2. ГОСТ 17.1.2.04-77 Охрана природы. Гидросфера. Показатели состояния и правила таксации рыбохозяйственных водных объектов. – М.: Изд-во стандартов, 1977. – 17 с.
3. Жукинский В.Н., Окснюк О.П., Брагинский Л.П. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // Гидробиологический журнал. 1993. Т.29, №4. С. 62–76.
4. Изиметова М.Ф. Современное экологическое состояние Средне-Тавдинских озер Свердловской области// VII научно-практическая конференция молодых ученых с международным участием (Москва, 14–19 ноября 2019 г.). – М.: Издательство ВНИРО, 2019 – С. 169.
5. Красновская М.П. Карась озера Янычково и его значение как основного объекта хозяйства В.-Тавдинских озер Свердловской области// Труды УралВНИОРХ. Т. 4. – Свердловск, 1949. – С. 213–273.
6. Рундквист Н.А., Задорина О.В. УРАЛ. Иллюстрированная краеведческая энциклопедия. – Екатеринбург, издательство Уральский рабочий, 2013. – С. 545.
7. Черняева Л.Е., Черняев А.М., Еремеева М.Н. Гидрохимия озер (Урал и Приуралье). – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 336 с.
8. Guiry M.D., Guiry M.D. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. 2023. <https://www.algaebase.org> (дата обращения 02.06.2023).

Диатомовые водоросли фитопланктона рек юга таежной зоны в пределах водосбора Средней Волги

Diatoms of phytoplankton in rivers in the south of the taiga zone within the catchment area of the Middle Volga

Кулизин П.В., Воденеева Е.Л., Шарагина Е.М., Охалкин А.Г.

Pavel V. Kulizin, Ekaterina L. Vodeneeva, Ekaterina M. Sharagina,
Alexander G. Okhapkin

Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского
(Нижний Новгород, Россия)

KulizinPavel@yandex.ru

В настоящей работе приводятся сведения о таксономическом составе и некоторых показателях количественного развития диатомовых водорослей в фитопланктоне левобережных притоков бассейна р. Волги. Показано, что флора исследованных рек является диатомово-зелено-эвгленовой. В таксономическом составе диатомей отмечено лидирование родов *Navicula*, *Nitzschia*, *Pinnularia*, *Gomphonema* и др. Использование электронной микроскопии позволило существенно расширить список видов центральных диатомей, некоторые из которых отмечались впервые во флоре изученных рек. В настоящий период исследований выявлены как планктонные, так и бентосные инвазивные виды диатомей.

Ключевые слова: фитопланктон; альгофлора; диатомовые водоросли; левобережные притоки р. Волги

The present research provides information on the taxonomic composition and some indicators of the quantitative development of diatoms in the phytoplankton of the left-bank tributaries of the river Volga basin. It was shown that the flora of the studied rivers is diatom-green-euglenic. In the taxonomic composition of diatoms, the leading genera *Navicula*, *Nitzschia*, *Pinnularia*, *Gomphonema* etc. were noted. The use of electron microscopy made it possible to expand significantly the list of centric diatom species, some of which were recorded for the first time in the flora of the studied rivers. At present, both planktonic and benthic invasive species of diatoms have been identified.

Keywords: phytoplankton; algoflora; diatoms; left-bank tributaries of the Volga River

Реки как водные объекты имеют исторически сложившееся определяющее значение в жизни и хозяйственной деятельности человека. Одним из ключевых биотических компонентов данных водных экосистем, отражающим современные условия окружающей среды и их динамику во временном аспекте, является фитопланктон. Диатомовые водоросли как важная часть сообществ фитопланктона различных водных объектов, могут служить хорошими индикаторами условий их местообитания, например рН, солености, а также содержания органического вещества в них (Жузе, Прошкина-Лавренко и др., 1974).

Целью настоящей работы является характеристика флоры и некоторых показателей количественного развития диатомовых водорослей водотоков юга таежной зоны в пределах водосбора Средней Волги.

Материалом для настоящего исследования послужили пробы фитопланктона, собранные на трех морфологически различных реках левобережья Средней Волги – рр. Ветлуга, Керженец и Вишня. Пробоподготовка и обработка проб фитопланктона осуществлялась по общепринятой методике (Методика, 1975; Куликовский, 2016).

Исследования общего видового состава фитопланктона изученных рек посредством световой и электронной микроскопии позволили выявить 812 видов (901 видовой и внутривидовой таксон), принадлежащих к 254 родам, 36 порядкам, 16 классам и 8 отделам. Основу флоры на 83,4% составляют представители 4 отделов: Bacillariophyta (33,7%), Chlorophyta (26,4), Euglenophyta (13,6) и Ochrophyta (9,7). В альгофлоре рек Керженец и Ветлуга соотношение зеленых (27–32,6%), диатомовых (34,3–36%) было почти одинаковым с преимуществом первых Ветлуге, а вторых – в Керженце. Р. Вишня отличалась более высоким вкладом диатомей (33,2%) и эвгленовых водорослей (21,1%), зеленые занимали лишь третью позицию (19,7%) (Кулизин и др, 2021).

Выявленные во флоре рек диатомовые водоросли относятся к 2 классам, 4 порядкам и 19 семействам. Среди ведущих семейств можно отметить следующие: Naviculaceae (29% от общего числа), Cymbellaceae (13%), Nitzschiaceae (11%), Fragilariaceae (9%), Gomphonemataceae (6%), Stephanodiscaceae, Surirellaceae (по 4.5%) и Eunotiaceae (4%). Семейства, представленные единичными видами, составляют 5%. Наибольшей видовой насыщенностью характеризуются такие роды, как *Navicula*, *Nitzschia* (по 7% от общего числа), *Pinnularia* (6%), *Gomphonema* (5%), *Amphora*, *Symbopleura*, *Eunotia* и *Sellaphora* (по 4%). Роды, представленные единичными видами, составляют 26%.

Представители класса Centophyceae представлены небольшим числом видов (около 7% от общего числа идентифицированных видов), что вероятно связано с трудностями их идентификации. Использование электронной микроскопии позволило детально изучить состав центральных диатомей и существенно расширить видовой состав водорослей. Впервые для исследованных водотоков отмечены *Aulacoseira pusilla* (F.Meister) A.Tuji & A.Houki, *Cyclotella atomus* var. *gracilis* Genkal & Kiss, *C. meduanae* H.Germain, *Discostella pseudostelligera* (Hustedt) Houk & Klee, *Cyclostephanos delicatus* (Genkel) S.J.Casper & W.Scheffler, *Thalassiosira faurii* (Gasse) Hasle, *T. lacustris* (Grunow) G.R.Hasle, для р. Ветлуги – *Actinocyclus normanii* (W.Gregory ex Greville) Hustedt, *Stephanodiscus lacustris* Klee & Houk, *Thalassiosira pseudonana* Hasle & Heimdal, для р. Керженец – *Cyclostephanos dubius* (Hustedt) Round, *Cyclotella distinguenda* Hustedt.

По характеристике местообитания преобладающее большинство выявленных видов относится к бентосным и эпифитным формам – 38% и 18% от общего числа видов, на долю планктонно-бентосных форм приходится 12%, собственно планктонных – 11%, литоральных – 8%. Для 2% видов приуроченность к местообитанию на данный момент не установлена. По географическому распространению наибольшая доля (69%) приходится на виды космополиты, 25% приходится на голарктические виды. По отношению к значению pH водных масс значительная доля (59%) приходится на алкалофильные виды. 13% общего видового разнообразия составляют индифферентные и ацидофильные виды. По отношению к солености воды подавляющее большинство видов либо индифферентны к данному экологическому фактору (52%), либо галобность для этих видов не установлена (31%).

Основу обилия фитопланктона рек большей протяженности создавали центральные диатомей. Среди них в р. Керженец более заметна *Melosira varians* S.Agardh. Весной 2008 г. отмечался подъем вегетации *Stephanodiscus hantzschii* Grunow, а в последующие годы (2016–2018 гг.) – *Aulacoseira subarctica* (O.Müller) E.Y.Naworth (максимальные показатели биомассы достигали 0.94 г/м³ – 49%). В р. Ветлуга преобладали *Aulacoseira subarctica* и *A. granulata* (Ehrenberg) Simonsen. Также

в составе доминантов и субдоминантов отмечены виды родов *Navicula*, *Pinnularia*, *Plagiotropis*, *Ulnaria*, *Eunotia*, *Tabellaria*, *Nitzschia*. Гидролого-гидрохимические характеристики способствовали возрастанию в р. Вишне в летних ценозах доли эвгленид (виды родов *Euglena*, *Trachelomonas*), при лидировании диатомей (*Tabellaria*, *Eunotia*, *Nitzschia*) весной и осенью.

Осредненные за безледный период многолетние значения численности и биомассы фитопланктона в среднем течении р. Керженец в разные годы исследований варьировали от 0.15 ± 0.05 до 4.27 ± 0.97 млн кл./л и от 0.23 ± 0.06 до 2.6 ± 0.8 г/м³, в р. Ветлуге – от 0.59 ± 0.09 до 6.6 ± 1.3 млн кл./л. и от 0.74 ± 0.11 до 1.51 ± 0.42 г/м³. Трофический статус рек Ветлуга и Керженец, определенный по биомассе фитопланктона, варьировал от олиготрофно-слабомезотрофного уровня в конце 1980-х - начале 2000-х годов (Воденеева, 2006) до мезотрофного в настоящее время. В р. Вишне количественное развитие альгоценозов менее обильно (от 0.06 ± 0.01 до 0.32 ± 0.06 млн кл./л и от 0.15 ± 0.03 до 0.35 ± 0.12 г/м³), что соответствовало значениям, характеризующим олиготрофные воды. Для р. Керженец было показано, что с 2008 г. начинается постепенная перестройка состава структурообразующих по биомассе видов. Наблюдается возрастание ценотической роли диатомей и динофлагеллят (до 36% от общей биомассы в 2008, до 76% в 2014 и до 61% в 2016 г.) в летних ценозах, при относительно стабильных значениях биомассы зеленых водорослей (Кулизин и др., 2021).

Использование современных и классических подходов позволило выявить в фитопланктоне рек инвазийные виды диатомей *Plagiotropis lepidoptera* var. *proboscidea* (Cleve) Reimer (рр. Керженец и Ветлуга), *Thalassiosira faurii*, *T. incerta* I.V. Makarova (р. Керженец), *Skeletonema subsalsum* (A. Cleve) Bethge (р. Ветлуга), что свидетельствует об активных процессах экспансии данных видов водорослей не только в акватории волжских водохранилищ, но и в системе боковой приточности. Сведения о распространении *Thalassiosira faurii*, *T. incerta*, *Skeletonema subsalsum* в реках Европы и водохранилищах Волги приводятся в литературе с середины XX в (Корнева, 2015), данные о развитии *Plagiotropis lepidoptera* var. *proboscidea* представляют собой первые находки представителя бентосных альгоценозов в водоемах бассейна р. Волги.

Работа выполнена в рамках Федеральной программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (проект № Н-477- 99_2021-2023).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Воденеева Е.Л. Состав и структура фитопланктона гумозно-ацидных водоемов (на примере водных объектов заповедника «Керженский»): дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16. – Нижний Новгород, 2006. – 165 с.
2. Жузе А.П., Прошкина-Лавренко А.И., Шешукова-Порецкая В.С. Методика исследования // Диатомовые водоросли СССР: ископаемые и современные. Т. 1. / под ред. З.И. Глезер, Жузе А.П., Макарова И.В., Прошкина-Лавренко А.И., Шешукова-Порецкая В.С. – Л.: Наука, 1974. – С. 50–79.
3. Корнева Л.Г. Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги – Кострома: Костромской печатный дом, 2015. – 284 с.
4. Кулизин П.В. Фитопланктон некоторых рек юга подзоны хвойно-широколиственных лесов бассейна Средней Волги в многолетнем аспекте // Самарский научный вестник. 2021. Т.10, №2. С. 45–53. DOI: <https://doi.org/10.17816/snv2021102106>
5. Куликовский М.С., Глуценко А.М., Генкал С.И., Кузнецова И.В. Определитель диатомовых водорослей России – Ярославль: Филигрань, 2016. – 804 с.
6. Методика изучения биоценозов внутренних водоемов / под ред. Ф.Д. Мордухай-Болтовского. – М.: Наука, 1975. – 240 с.
7. Guiry M.D., Guiry G.M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. 2023. <http://www.algaebase.org> (дата обращения: 09.06.2023).

Диатомей донных биотопов континентального шельфа Баренцева моря

Diatoms of bottom biotopes of the continental shelf of the Barents Sea

Макаревич П.Р., Ларионов В.В., Дружкова Е.И., Олейник А.А.

Pavel R. Makarevich, Victor V. Larionov, Elena I. Druzhkova,
Anatolii A. Oleinik

Мурманский морской биологический институт РАН (Мурманск, Россия)

makarevich@mmbi.info

В верхнем слое донных отложений на глубинах до 300 м в центральной части Баренцева моря было обнаружено автохтонное сообщество бентосных диатомей. Анализ качественного и количественного состава показал, что найденные микроводоросли представляют собой обедненный фрагмент арктического литорального микрофитобентоса. В сравнении с прибрежной альгофлорой, глубоководный комплекс характеризуется низким видовым разнообразием, при этом его численность в бентали составляет порядка 10^2 - 10^3 кл./см². Ранее присутствие бентических микроводорослей в морских экосистемах связывали исключительно с литоральной и сублиторальной зонами побережья.

Ключевые слова: микрофитобентос; диатомовые водоросли; пелагиаль; Баренцево море; донные биотопы

An autochthonous community of benthic diatoms has been discovered in upper bottom sediments in the central Barents Sea at depths down to 300 m. Their abundance and biomass analyzed suggest that the microalgae found represent a depleted fragment of the arctic littoral microphytobenthos. Compared to the coastal algal flora, the deep-water assemblage is characterized by low species diversity and demonstrates abundance of about 10^2 - 10^3 cells per cm² in the benthic. Until recently, the presence of benthic microalgae in marine ecosystems has been associated exclusively with the littoral and sublittoral coastal zones.

Keywords: microphytobenthos; diatomic algae; pelagic; Barents Sea; bottom habitats

Одним из компонентов морских экосистем, формирующим первично-продукционный потенциал вод арктического бассейна (наряду с макрофитами, планктонной и ледовой альгофлорой), является микрофитобентос, основу которого составляют диатомовые водоросли.

Согласно общепринятой точке зрения, устойчивое существование сообществ первичных продуцентов лимитируется наличием фотосинтетически активной радиации и в водной среде ограничивается т. наз. точкой компенсации – глубиной, на которой энергия входящего света уравнивает метаболические затраты; эта зона составляет первые десятки метров для шельфовых морей (Raymont, 1980). Из этого прямо следует, что бентические микроводоросли не могут существовать на значительных глубинах, и их активная вегетация возможна исключительно в литоральной и сублиторальной зонах Мирового Океана.

Целью настоящей работы было исследование микрофитобентоса верхнего слоя осадков континентального шельфа Баренцева моря на глубинах более 100 м. Работы проводились в 2015–2017 гг. в районе Центрального плато на удалении 130–240 миль от ближайшего берега. Отбор проб осуществлялся из верхнего слоя грунта и водной толщи прилегающей пелагиали. Пробы грунта (верхний слой ~1 см) отбирались из дночерпателя Ван-Вина, пробы воды – батометром. Учет и таксономическая идентификация организмов проводились путем прямой микроскопии в счетных камерах. Более детальное описание использованных методов отбора и обработки проб даны в статье Е.И. Дружковой с соавторами (Druzhkova et al., 2018).

Анализ качественного и количественного состава проб микроводорослей верхнего слоя грунта показал наличие на глубинах до 300 м живых диатомей, имеющих нормально оформленное содержимое, включая и физиологически активные хлоропласты. Большой частью сообщества состояли из массовых форм весеннего или летнего планктона, представленных споронесущими или вегетативными клетками. В пелагиали на момент исследований присутствовал идентичный таксономический состав альгоценоза, но не во все сезоны наблюдений.

Наши исследования показали наличие в донных отложениях наряду с центрическими также и пеннатных диатомовых: типичных представителей микрофитобентоса *Gyrosigma fasciola* (Ehrenberg) Griffith et Henfrey, *Pleurosigma angulatum* (Quekett) W. Smith, *Pleurosigma* sp. и значительного количества клеток мелких неидентифицированных форм. Можно предположить, что обнаруженный комплекс видов является лишь частью сообщества микроводорослей, населяющего меньшие глубины континентального шельфа Баренцева моря. В придонной зоне центральной части водоема оно представляет собой обедненный фрагмент альгофлоры арктического литорального микрофитобентоса.

Нахождение в верхнем слое грунта на большой глубине трех указанных видов пеннатных диатомовых, относящихся к данной экологической группе, вызывает несомненный интерес. Минимальное обилие этих таксонов в донных альгоценозах отмечено в начале апреля – на начальной стадии развития фитопланктона, в период окончания зимнего гидрологического сезона (суммарно для трех видов $\sim 10^1$ кл./см²). В период весеннего цветения все три формы широко распространены на акватории Баренцева моря, их численность в столбе воды составляет порядка 10^2 - 10^3 кл./см². Рост их обилия в бентали и синхронное исчезновение из пелагиали приходится на июнь – период массового формирования и оседания гипноспор у типичных весенних планктонных видов (в основном представители родов *Chaetoceros* и *Thalassiosira*). К началу летнего гидрологического сезона в водной толще клетки бентосных микроводорослей не обнаруживаются (так, в июне 2015 г. они были найдены только в пробах грунта и отсутствовали в пелагиали), а уже в июле их численность в бентали составляет порядка 10^2 - 10^3 кл./см².

Кажется очевидным, что появление микроводорослей на значительных глубинах возможно только вследствие вертикального или горизонтального переноса. Однако, в наших исследованиях присутствие микрофитобентоса в грунте не может быть расценено как результат протекания этих процессов. Если бы имело место постоянное поступление клеток непосредственно из толщи воды или из сообществ вблизи ледовой кромки, либо, например, с тальми водами льда из прибрежной зоны соседних архипелагов, то донные отложения должны были бы содержать альгоценозы, сходные по составу с мелководными. Таких комплексов обнаружено не было. В наших исследованиях в июне 2015 г. бентосные виды были найдены только в пробах грунта и полностью отсутствовали в воде на всех горизонтах. Следовательно, гипотеза транспорта литоральных бентосных микроводорослей из пелагиали прибрежья не может полностью объяснить наличие в осадках глубоководной части бассейна отдельных представителей

микрофитобентоса на фоне отсутствия большинства видов в водной толще. Наблюдаемая картина свидетельствует, что опускание микроводорослей в донный субстрат происходит только в определенные сезоны годового гидрологического цикла и клетки там находятся в жизнеспособном состоянии (судя по сохранности клеточного содержимого – ядро, хлоропласты, вакуоль) большую часть года. Подъем же в фотическую зону из бентали происходит в период предвесенней фазы развития фитопланктонного сообщества.

Таким образом, можно утверждать, что в бентали центральной части Баренцева моря обнаружено автохтонное сообщество микроводорослей, представляющее собой обедненный фрагмент арктических литоральных альгоценозов микрофитобентоса. По всей вероятности, оседание на дно клеток этих видов является не элиминацией, а одной из стадий жизненного цикла – периодом покоя (по аналогии с циклом развития типичных планктонных диатомей, имеющих фазу покоя в бентали). В начале весеннего сезона наступает стадия вегетации, сопровождающаяся перемещением клеток из бентали в верхнюю пелагиаль. Присутствие жизнеспособных клеток микроводорослей в зоне, где фотосинтез не может быть основным источником энергии, скорее всего, связано со способностью диатомей к гетеротрофному типу питания (Tuchman et al., 2006; Veuger B., van Oevelen, 2011) и/или с использованием энергетических резервов при пониженной скорости метаболизма (Zhang et al., 1995).

Также с уверенностью можно заключить, что в настоящее время нижним пределом обитания микрофитобентосного сообщества на континентальном шельфе Баренцева моря должна считаться глубина не менее 300 м.

Работа выполнена в рамках государственного задания № ММБИ 121091600105-4, тема «Планктонные сообщества арктических морей в условиях современных климатических изменений и антропогенного воздействия».

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Druzhkova E., Oleinik A., Makarevich P. Live autochthonous benthic diatoms on the lower depths of Arctic continental shelf. Preliminary results // *Oceanologia*. 2018. V.60, №1, P. 97–100.
2. Raymont J.E.G. Plankton and Productivity in the Oceans. *Phytoplankton*, 2nd ed. – Oxford: Pergamon Press, 1980. – 496 p.
3. Tuchman N.C., Schollett M.A., Rier S.T., Geddes P. Differential heterotrophic utilization of organic compounds by diatoms and bacteria under light and dark conditions // *Hydrobiologia*. 2006. V.561, №1. P. 167–177. DOI 10.1007/s10750-005-1612-4
4. Veuger B., van Oevelen D. Long-term pigment dynamics and diatom survival in dark sediment // *Limnol. Oceanogr.* 2011. V.56, №3. P. 1065–1074. DOI:10.4319/lo.2011.56.3.1065
5. Zhang Q., Gradingerfaud R., Spindler M. Dark survival of marine microalgae in the high arctic (Greenland Sea) // *Polar- forschung*. 1995. V.65, №3. P. 111–116.

Диатомовые водоросли в подледном фитопланктоне озера Воже и его притока – реки Вожеги (Вологодская область)

Diatoms in the under-ice phytoplankton of Lake Vozhe and its tributary – the Vozhega River (Vologda Region)

Макарёнова Н.Н.

Nadezhda N. Makarenkova

*Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии,
Вологодский филиал (Вологда, Россия)*

mackarenkova@yandex.ru

Диатомовые водоросли являются основным компонентом подледного фитопланктона крупного мелководного озера Воже, имеющего рыбопромысловое значение, а также его притока – реки Вожеги. Всего были обнаружены 37 видов и внутривидовых таксонов диатомовых водорослей. Количество одновременно вегетирующих видов диатомовых в озере Воже составляло 1–11, в реке Вожеге – 11–13. Биомасса диатомовых водорослей зимой равнялась в озере в среднем 2,01 г/м³, в реке – 0,03 г/м³, численность – 0,84 и 0,03 млн кл./л соответственно. Размерная структура диатомовых водорослей в реке была представлена более мелкими экземплярами, чем в озере.

Ключевые слова: ледостав; подледный фитопланктон; диатомовые; озеро Воже; река Вожега; притоки; Вологодская область

Diatoms are the main component of the under-ice phytoplankton in large shallow-water fishery important Lake Vozhe, as well as its tributary – the Vozhega River. A total of 37 species and intraspecific taxa of algae were found. The number of diatom species growing at the same time in Lake Vozhe was 1–11, and in the Vozhega River – 11–13. The biomass of diatoms in the lake in winter averaged 2.01 g/m³, in the river – 0.03 g/m³, the number – 0.84 and 0.03 million cells/l. The size structure of diatoms in the river was represented by smaller specimens than in the lake.

Keywords: ice-covered period; under-ice phytoplankton; diatoms; Vozhe Lake; Vozhega River; tributaries; Vologda Region

Диатомовые водоросли широко распространены в водоемах бореальной зоны, где они вегетируют почти круглогодично, в том числе составляют значительную часть фитопланктона в холодное время года. Подо льдом водоросли активно фотосинтезируют (Винокурова и др., 2021), но сведений о фитопланктоне в зимнее время значительно меньше (Ерина и др., 2019; Митрофанова и др., 2021), чем за период открытой воды.

В работе использован материал, собранный сотрудниками Вологодского филиала ФГБНУ «ВНИРО» в марте 2017–2023 гг. в рамках мониторинговых исследований на озере Воже. Количество фитопланктонных проб составило 21 ед., количество станций на озере – 3. В реке Вожеге пробы (4) были взяты в верхнем и среднем течениях в декабре 2020 г. Пробы фитопланктона (500 мл) фиксировались раствором Люголя, затем концентрировались (25 мл). Подсчет клеток и их идентификация осуществлялись при просмотре в камере Нажотта (0,01 мл). Названия таксонов приведены согласно системе

AlgaeBase (Guiry, Guiry, 2023). Биомасса определялась объемно-расчетным методом, удельный вес водорослей принимался равным 1 г/м^3 (Кузьмин, 1975). К категории «доминирующих» относили виды, составляющие $\geq 10\%$ от суммарной численности/биомассы фитопланктона. Частота встречаемости определена как отношение числа проб, в которых вид был обнаружен, к общему количеству проб. Для ценотической оценки сообщества использовались индекс Шеннона и индекс доминирования Симпсона (Мэггаран, 1992).

Озеро Воже, площадь которого составляет 418 км^2 , принадлежит к бассейну р. Онеги, является крупным рыбохозяйственным водоемом на территории Вологодской области. Средняя глубина в озере равняется $1,4 \text{ м}$, при этом для водоема характерны значительные внутригодовые и межгодовые колебания уровня воды (Веселова, 1979). Озеро характеризуется изрезанной береговой линией, что в сочетании с нестабильным уровнем воды и заболоченностью берегов обуславливает интенсивное развитие макрофитов. Река Вожега является вторым по величине притоком озера Воже, собирает воды с восточной части его водосбора. Длина реки – 140 км , площадь водосбора – 1980 км^2 . Река извилистая, со многими перекатами. Дно реки выстилают крупные валуны. Берега большей частью покрыты лесом, который в верхнем течении почти вплотную подходит к воде.

Средняя продолжительность устойчивого ледостава на озерах Вологодской области может длиться до 184 дней (Филенко, 1966). В озере Воже толщина льда в конце марта составляет $60\text{--}80 \text{ см}$. Уровень воды в это время значительно понижается, и лед на большой площади (до трети всей площади озера) садится на грунт (Тихомиров, Егоров, 1975). Незначительные глубины озера способствуют прогреву всей водной толщи за счет тепла донных отложений. Для крупных мелководных озер в ледоставный период характерна горизонтальная температурная однородность, которая обуславливается незначительным изменением глубин, сглаженной береговой линией, относительно однородным составом донных отложений. Река Вожега замерзает в конце октября – начале ноября, вскрывается в середине апреля, зимний низкий меженный уровень наблюдается в марте.

Диатомовые водоросли в озере Воже по числу встреченных видов и внутривидовых таксонов выделялись среди всех других групп фитопланктона. Всего в подледный период было выявлено 20 таксонов диатомовых, что составляет 48% от общего числа обнаруженных видов. Число видов диатомовых в пробе варьировало от 1 до 11, диатомовые отмечались в 75% проб. Наибольшей относительной частотой встречаемости характеризовались *Aulacoseira ambigua* (Grunow) Simonsen (57%), *Surirella librile* (Ehrenberg) Ehrenberg (43%), *Neidiorpha binodis* (Ehrenberg) M.Cantonati, Lange-Bertalot & N.Angeli (43%). Индекс Шеннона, рассчитанный по численности диатомовых водорослей составил $0,7 \pm 0,15$ бит/кл., по биомассе – $1,0 \pm 0,34$ бит/г, индекс доминирования Симпсона соответственно – $0,1 \pm 0,06$ и $0,5 \pm 0,15$. Среди видов с известной приуроченностью к местообитанию преобладали факультативно-планктонные виды (40%), истинно- и случайно-планктонные виды составляли по 20% .

По средней величине биомассы фитопланктона в подледный период ($2,4 \text{ г/м}^3$) озеро Воже характеризовалось, согласно классификации (Трифенова, 1990), как мезотрофное. Доля диатомовых водорослей при этом составляла $28 \pm 8,9\%$ от общей численности и $83 \pm 10,7\%$ – от биомассы. К доминирующим таксонам по численности и биомассе относились *Aulacoseira islandica* (O. Müller) Simonsen ($10\text{--}63\%$ и $17\text{--}94\%$ соответственно), *Aulacoseira ambigua* (12% и $13\text{--}21\%$), только по численности – *Neidiorpha binodis* (19%), *Staurosira construens* Ehrenberg (11%), только по биомассе – *Surirella librile* (51%), *Iconella biseriata* (Brébisson) Ruck & Nakov (48%), *Nitzschia vermicularis* (Kützing) Hantzsch (32%), *Iconella splendida* (Ehrenberg) Ruck & Nakov (28%), *Pinnularia viridis* (Nitzsch) Ehrenberg (26%). *Aulacoseira islandica* является частым

доминантом в озере Воже в течение всего вегетационного периода (Макарёноква, 2015; Макарёноква, 2016; Корнева и др., 2021). При доминировании в фитопланктоне *A. islandica*, которая была представлена размерной фракцией преимущественно более 70 мкм, количество диатомовых имело максимальные значения (до 7,8 млн кл./л и 29,5 г/м³). В среднем численность диатомовых в подледный период составляла 0,8±0,46 млн кл./л, биомасса – 2,0±1,81 г/м³. В небольшом количестве также встречались *Asterionella formosa* Hassall, *Aulacoseira* sp., *Eunotia lunaris* (Ehrenberg) Grunow, *Fragilaria* sp., *F. capucina* Desmazières, *F. construens* var. *venter* (Ehrenberg) Grunow, *F. crotonensis* Kitton, *Navicula cryptocephala* Kützing, *Surirella grunowii* Kulikovskiy, Lange-Bertalot & Witkovski, *Tabellaria fenestrata* (Lyngbye) Kützing, *T. flocculosa* (Roth) Kützing.

Зимний фитопланктон реки Вожеги представлен сообществом диатомовых водорослей, из которых часто встречались *Hippodonta capitata* (Ehrenberg) Lange-Bertalot, Metzeltin & Witkowski, *Neidium* sp., *Cocconeis placentula* var. *euglypta* (Ehrenberg) Cleve. Всего было встречено 17 видов, разновидностей и форм диатомовых водорослей, количество регистрируемых таксонов в пробе составляло 11–13. Общих видов с озерным планктоном не обнаружено. Индекс Шеннона находился на уровне 2,6±0,15 бит/кл., рассчитанный по численности водорослей, и 2,1±0,28 бит/г – по биомассе, индекс доминирования Симпсона соответственно – 0,2±0,08 и 0,3±0,07. Диатомовые водоросли, обнаруженные в подледной воде, были представлены преимущественно случайно-планктонными видами (53%), также встречались факультативно-планктонные (18%).

Общая биомасса диатомовых водорослей в реке Вожеге в зимний период равнялась 0,03±0,01 г/м³ и свидетельствовала об олиготрофном состоянии водотока. Численность фитопланктона при этом была также низкой – 0,03±0,003 млн кл./л. К доминирующим таксонам по численности и биомассе относился *Cocconeis placentula* var. *euglypta* (14–25% от общей численности и 13–16% от общей биомассы), только по численности – *Achnantheidium affine* (Grunow) Czarnecki (50%), *Planothidium rostratoholarcticum* Lange-Bertalot & Bak (17%), только по биомассе – *Melosira varians* C.Agardh (59%), *Stauroneis* sp. (42%), *Sellaphora rectangularis* (W.Gregory) Lange-Bertalot & Metzeltin (18%), *Pinnularia gibba* Ehrenberg (13%). В сообществе присутствовали две размерные фракции фитопланктона – менее 30 мкм и 30–70 мкм. Мелкоклеточные фитопланктеры преобладали, их доля в общей численности равнялась 75–86%, в общей биомассе – 25–81%. Единично встречались и характеризовались незначительным количеством *Cocconeis placentula* var. *klinoraphis* Geitler, *Cymbella* sp., *Gomphonema longiceps* f. *suecicum* (Grunow) Hustedt, *Gomphonema parvulum* (Kützing) Kützing, *Hippodonta hungarica* (Grunow) Lange-Bertalot, Metzeltin & Witkowski, *Meridion circulare* (Greville) C.Agardh, *Navicula pseudogracilis* Hustedt, *Nitzschia* sp.

Диатомовые водоросли подледного периода характеризовались большим разнообразием в реке Вожеге, при этом их количество значительно уступало таковому в озере. Высокие численность и биомасса диатомовых водорослей в озере Воже были связаны со скоплениями крупных нитей *Aulacoseira islandica* – одного из основных доминантов. Преобладающая размерная фракция водорослей в среднем была более мелкой в притоке озера. В реке Вожеге, в отличие от самого озера, основное число видов диатомовых являлось бентосными, нахождение которых в планктоне было случайным.

Работа выполнена в рамках Госзадания № 076-00004-23-00.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Веселова М.Ф. Природные условия бассейна озер // Малинина Т.И. (ред.). Гидрология озер Воже

и Лаче (в связи с переброской северных вод в бассейн р. Волги). – Л.: Наука, 1979. – С. 3–18.

2. *Винокурова Г.В., Суторихин И.А., Коломейцев А.А., Фроленков И.М.* Анализ состояния биологических сообществ континентального водоема с использованием гидрооптических характеристик // Биология внутренних вод. 2021. №2. С. 142–150. DOI: 10.31857/S0320965221010162.

3. *Ерина О.Н., Пуклаков В.В., Соколов Д.И., Гончаров А.В.* Подледное цветение фитопланктона в Можайском водохранилище // Экологический сборник 7: Труды молодых ученых. Всерос. (с междунар. участием) молодежная научная конф. (Тольятти, 18–21 апр. 2019 г.). – Тольятти, 2019. – С. 158–162. DOI: 10.24411/9999-010A-2019-10037.

4. *Корнева Л.Г., Митропольская И.В., Макаренкова Н.Н., Цветков А.И.* Структура и динамика фитопланктона больших мелководных зарастающих озер (Воже и Лача, Вологодская и Архангельская области, Россия) // Труды Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН. 2021. Вып. 94 (97). С. 17–29. DOI: 10.47021/0320-3557-2021-17-29.

5. *Кузьмин Г.В.* Фитопланктон. Видовой состав и обилие // Мордухай-Болтовской Ф.Д. (ред.). Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. – М.: Наука, 1975. – С. 73–87.

6. *Макаренкова Н.Н.* Состав и динамика доминирующих групп водорослей в фитопланктоне крупных озер Вологодской области в 2009–2014 гг. // Актуальные проблемы биологии и экологии: материалы докл. XXII Всерос. молодежной научной конф. (Сыктывкар, 6–10 апр. 2015 г.). – Сыктывкар, 2015. – С. 31–35.

7. *Макаренкова Н.Н.* Состояние фитопланктона озера Воже в весенний период 2014–2015 гг. // Рыбохозяйственные исследования на внутренних водоемах: материалы II Всерос. молодежной конф. (Санкт-Петербург, 19–21 апр. 2016 г.). – Санкт-Петербург, 2016. – С. 214–220.

8. *Митрофанова Е.Ю., Воробьев Р.И., Бурмистрова О.С.* Биообъекты в зимнем литоральном планктоне Телецкого озера (Алтайский государственный заповедник) // Полевые исследования в Алтайском биосферном заповеднике. 2021. №3. С. 173–181. DOI: 10.52245/26867109_2021_12_3_173.

9. *Мэгарран Э.* Экологическое разнообразие и его измерение. – М.: Мир, 1992. – 181 с.

10. *Тихомиров А.И., Егоров А.Н.* Термический режим // Озера Лача и Воже. Материалы комплексных исследований. – Л.: Наука, 1975. – С. 8–10.

11. *Трифорова И.С.* Экология и сукцессия озерного фитопланктона. – Л.: Наука, 1990. – 184 с.

12. *Филенко Р.А.* Воды Вологодской области. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1966. – 131 с.

13. *Guiry M.D., Guiry G.M.* AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. 2023. <https://www.algaebase.org> (дата обращения 17.06.2023).

**Разнообразие диатомовых водорослей в биологических
почвенных корках северных регионов Урала на основе
морфологических и метагеномных подходов**

**Diversity of diatoms in biological soil crusts of the northern region
of the Urals on the basis of morphological and metagenomic
approaches**

**Патова Е.Н.¹, Гусев Е.С.², Шабалина Ю.Н.^{1,3}, Новаковская И.В.¹,
Сивков М.Д.¹**

**Elena N. Patova, Evgeniy S. Gusev, Julia N. Shabalina,
Irina V. Novakovskaya, Michail D. Sivkov**

¹Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар, Россия)

²Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова РАН (Москва, Россия)

³Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорокина
(Сыктывкар, Россия)

patova@ib.komisc.ru, algogus@yandex.ru

Приведены результаты изучения по разнообразию диатомовых водорослей в почвенных биологических корках, формирующихся на криогенных грунтах в горных тундрах Полярного, Приполярного и Северного Урала. Видовое разнообразие диатомей определяли в постоянных препаратах на среде Эльяшева и с использованием ДНК-метабаркодинга. Всего в ходе исследования по морфологическим и метагеномным данным выявлено 58 таксонов диатомей (рангом ниже рода). Наиболее разнообразны по составу роды *Pinnularia*, *Eunotia* и *Nitzschia*.

Ключевые слова: Bacillariophyta; почвенные водоросли; биологические почвенные корки; полифазный подход

We studied the diversity of diatoms in biological soil crusts which formed on cryogenic soils in the mountain tundras of the Polar, Subpolar and Northern Urals. We used the permanent Elyashev's medium and DNA metabarcoding for diatom species diversity. In total, 58 diatoms taxa (rank below the genus) identified based on morphological and metagenomic data analysis. The most diverse genera are *Pinnularia*, *Eunotia*, and *Nitzschia*.

Keywords: Bacillariophyta; soil algae; biological soil crusts; polyphasic approach

Биологические почвенные корки (Biological soil crust – BSC), сформированные широким спектром прокариотных и эукариотных организмов, являются доминирующими первичными продуцентами на оголенных криогенных субстратах в горных и арктических регионах. Диатомовые водоросли – участвуют в формировании таких криптогамных сообществ. *Цель* исследования – обобщение сведений по таксономическому разнообразию Bacillariophyta, обитающих в BSC с применением традиционных морфологических подходов и подходов ДНК-метабаркодинга. Видовое

разнообразие диатомей определяли в постоянных препаратах на среде Эльяшева и методами анализа тотальной ДНК с использованием ДНК-метабаркодинга. Для эукариотных водорослей использованы ПЦР-амплификации, нацеленные на регион SSU V9 и ITS1(5'-GTACACACCGCCCGTC-3')–ITS2(5'-GCTGCGTTCTTCATCGWTR-3'), предложенные в работах Boenigk et al. (2018) и Bock et al. (2020). Эти праймеры охватывают изменчивый регион V9 18S рДНК и полностью ITS1, что позволяет использовать их как для филогенетического анализа по участку 18S рДНК и для видовой идентификации эукариотных водорослей. Анализ ДНК выполнен в компании «Евроген» (Москва) на Illumina MiSeq.

Впервые на основе морфологических и метагеномных подходов получены сведения о таксономическом разнообразии диатомовых водорослей в различных вариантах биологических почвенных корок на криогенных пятнах в горно-тундровых сообществах северных районов Урала. С помощью морфологического подхода в BSC выявлен 51 вид диатомей. На основе высокопроизводительного секвенирования в восьми различных вариантах BSC, собранных на экологическом профиле в горных тундрах Урала, идентифицировано 44 операционные таксономические единицы (OTUs) относящиеся к Ochrophyta (включая Bacillariophyceae и Chrysophyceae). Для диатомей выявлено 10 OTUs, из которых идентифицировано семь таксонов. К ведущим по числу видов относятся роды *Pinnularia*, *Eunotia* и *Nitzschia*. Число таксономических единиц различалось для разных типов BSC и составляло от 9 до 22 видов.

Сочетание двух подходов классического (основанного на морфологических признаках) и ДНК-метабаркодирования с выделением тотальной ДНК из почвы с последующим ее анализом позволило расширить представления о разнообразии диатомовых водорослей участвующих в формировании пионерной растительности в горных тундрах. Всего в биологических почвенных корках из разных горных сообществ северных регионов Урала выявлено 58 таксонов диатомей (рангом ниже рода).

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФ № 22-24-00673 (<https://rscf.ru/project/22-24-00673/>).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Bock C., Jensen M., Forster D., Marks S., Nuy J., Psenner R., Beisser D., Boenigk J. Factors shaping community patterns of protists and bacteria on a European scale // *Environmental Microbiology*. 2020. Т.22, №6. P. 2243–2260. DOI:10.1111/1462-2920.14992
2. Boenigk J., Wodniok S., Bock C., Beisser D., Hempel C., Grossmann L., Lange A., Jensen M. Geographic distance and mountain ranges structure freshwater protist communities on a European scale // *Metabarcoding and Metagenomics*. 2018. Т. 2. P. e21519. DOI:10.3897/mbmg.2.21519

К флоре диатомовых водорослей р. Тулома (Мурманская обл.)

On the diatom flora from Tuloma River (Murmansk Region)

Рассадкин П.С.¹, Лупандин-Петренко К.С.¹, Фундовой Д.И.¹,
Джурко А.П.¹, Алпатова С.О.¹, Капустин Д.А.², Куликовский М.С.²

Pavel Rassadkin, Kirill Lupandin-Petrenko, Dmitry Fundovoi,
Arina Dzhurko, Snezhana Alpatova, Dmitry Kapustin, Maxim Kulikovskiy

¹Мурманский арктический университет (Мурманск, Россия)

²Институт физиологии растений имени К.А. Тимирязева РАН (Москва, Россия)

dima_kapustin@outlook.com

Проведено изучение разнообразия диатомовых водорослей р. Тулома (Мурманская обл.). Предварительно идентифицировано 35 видов, относящихся к 21 роду. Наиболее часто встречались моношовные диатомовые водоросли родов *Karayevia* (*K. laterostrata* (Hust.) Bukht., *K. suchlandtii* (Hust.) Bukht.) и *Skabitschewskia* (*S. oestrupii* (A. Cleve) Kulikovskiy et Lange-Bertalot). Впервые для Мурманской области приводится редкий вид *Gololobovia obliqua* (W. Gregory) Kulikovskiy et al.

Ключевые слова: диатомовые водоросли; редкие виды; Мурманская область

The diversity of diatoms from the Tuloma river (Murmansk region) was studied. Thirty-five species belonging to twenty-two genera were preliminary identified. Monoraphid diatoms from the genera *Karayevia* (*K. laterostrata* (Hust.) Bukht., *K. suchlandtii* (Hust.) Bukht.) and *Skabitschewskia* (*S. oestrupii* (A. Cleve) Kulikovskiy et Lange-Bertalot) were the most common. A rare species, *Gololobovia obliqua* (W. Gregory) Kulikovskiy et al., is reported for the first time for Murmansk Region.

Keywords: diatoms; rare species; Murmansk Region

Диатомовые водоросли являются одной из крупнейших групп гидробионтов. Их практически повсеместное распространение, а также высокая чувствительность к изменениям окружающей среды, позволяет использовать данную группу для оценки экологического состояния водоемов (Денисов, Косова, 2018).

Река Тулома протекает по территории Кольского района Мурманской области. Её длина – 64 км, площадь водосборного бассейна – 21500 км². Сведения о диатомовых водорослях реки довольно ограничены и содержатся в работах П.П. Ширшова (1933 а,б).

Пробы перифитона и бентоса отбирались 30 сентября 2022 г. (68°46'24.0" с.ш., 32°26'27.9" в.д.) Предварительно идентифицировано 35 видов, относящихся к родам: *Aneumastus*, *Cavinula*, *Cocconeis*, *Cymbopleura*, *Diploneis*, *Encyonema*, *Fragilaria*, *Gololobovia*, *Gomphonema*, *Karayevia*, *Navicula*, *Nitzschia*, *Parlibellus*, *Placoneis*, *Planothidium*, *Platessa*, *Psammothidium*, *Pseudostaurosira*, *Stauroforma*, *Stauroneis*, *Staurosirella* и *Tabellaria*. Наиболее часто встречались моношовные диатомовые водоросли: *Karayevia laterostrata* (Hust.) Bukht., *K. suchlandtii* (Hust.) Bukht. и *Skabitschewskia oestrupii* (A. Cleve) Kulikovskiy et Lange-Bertalot. Впервые в Мурманской области обнаружен редкий вид *Gololobovia obliqua* (W. Gregory) Kulikovskiy, Glushchenko

et Kociolek (\equiv *Achnanthes obliqua* (W. Gregory) Hust., *Psammothidium obliquum* (W. Gregory) Potapova, современное распространение которого ограничено Северной Евразией (Potapova, 2018).

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект № 19-14-00320-П).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Денисов Д.Б., Косова А.Л. Диатомовые водоросли в оценке качества вод озерно-речной системы Паз // Труды Фермановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2018. Т.15. С. 449–452. DOI: <https://doi.org/10.31241/FNS.2018.15.114>
2. Шишов П.П. Сравнительный очерк ценозов реофильных водорослей р. Туломы и некоторых других водоемов // Труды БИН АН СССР. Сер. 2. Споровые растения. 1933а. Вып.1. С. 65–92.
3. Шишов П.П. Очерк фитопланктона р. Туломы // Труды БИН АН СССР. Сер. 2. Споровые растения. 1933б. Вып.1. С. 97–114.
4. Potapova M.G. New and rare *Psammothidium* species (Bacillariophyta, Achnanthidiaceae) from Northeastern Siberia // Cryptogamic, Algologic. 2018. V.39, №4. P. 465–479. DOI: <https://doi.org/10.7872/crya/v39.iss4.2018.465>

**Видовой состав летнего комплекса диатомовых водорослей эпифитона
Ceratophyllum demersum L. в реке Припять
(Национальный парк «Припятский»)**

**Species composition of summer diatoms complex
of *Ceratophyllum demersum* L. epiphyton in the Pripyat river
(The national park «Pripyatsky»)**

Свирид А.А.¹, Михеева Т.М.², Петров В.Н.³

Anna A. Svirid, Tamara M. Mikheyeva, Vladimir N. Petrov

¹Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка,
факультет естествознания (Минск, Беларусь)

²Белорусский государственный университет, биологический факультет
(Минск, Беларусь)

³Институт экспериментальной ботаники НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

sviridanna.61@mail.ru

Диатомовый комплекс эпифитона *Ceratophyllum demersum* L., собранный в июле 2010 г. из р. Припять, насчитывает 58 видов. Они принадлежат к 3 классам, 9 порядкам, 13 семействам, 23 родам. Доминировали (по численности створок в препарате) *Cocconeis lineata* Ehrenberg (34,8%), *Cyclostephanos dubius* (Fricke) Round (11,3%), *Cocconeis euglipta* Ehrenberg (8,8%), *Aulacoseira ambigua* (Grunow) Simonsen (5,9%) и *Gyrosigma spencerii* (Bailey ex Quekett) Griffith et Henfrey (5,6%).

Ключевые слова: река Припять; *Ceratophyllum demersum* L.; эпифитон; диатомовые водоросли; доминанты

The diatom complex of the *Ceratophyllum demersum* L. epiphyton collected in July 2010 from Pripyat river includes 58 species. They belong to 3 classes, 9 orders, 13 families, 23 genera. The dominants (of the number of valves in the preparation) were *Cocconeis lineata* Ehrenberg (34,8%), *Cyclostephanos dubius* (Fricke) Round (11,3%), subdominants – *Cocconeis euglipta* Ehrenberg (8,8%), *Aulacoseira ambigua* (Grunow) Simonsen (5,9%) and *Gyrosigma spencerii* (Bailey ex Quekett) Griffith et Henfrey (5,6%).

Keywords: Pripyat river; *Ceratophyllum demersum* L.; epiphyton; diatoms; dominants

Работа выполнялась по проблеме инвентаризации флор заповедных территорий и дополняет имеющиеся литературные данные по фитопланктону (Михеева и др., 2016). Изучен эпифитон роголистника погруженного (*Ceratophyllum demersum* L.). Взятие пробы осуществлялось в реке Припять в конце июля 2010 г. на расстоянии от устья 295 км, со стороны правого высокого берега в 100 м выше причала паррома у деревни Дорошевичи Житковичского района. От уреза воды песчаные мелководья с глубиной 0,15 м простираются на ширину не более 1 м с последующим увеличением глубины до 0,85 м на расстояние 5 м. В русле побеги роголистника срезались ножницами и погружались с небольшим количеством воды в полиэтиленовый пакет. В лаборатории с помощью кисточки эпифитон снимали в эту же воду и фиксировали по Утермелю с

последующим добавлением формалина. Температура во время отбора пробы составляла 24,2 °С, рН – 7,8. По литературным данным водная масса реки относится к гидрокарбонатно-кальциевой группе с общей минерализацией 386,706 мг/дм³, рН – 6,9 (Водные ..., 2011).

Сжигание протопласта клеток проводились по общепринятой методике (Диатомовые..., 1974). Просмотр постоянных препаратов и фотографирование видов проводились на световом микроскопе Аксиоскоп (Carl Zeiss) с использованием иммерсионных объективов А-Plan 100 x / 1.32, (окуляр WPI 10x/23) цифровой камерой Canon PowerShot G5. Одновременно для выявления структурных особенностей диатомовых комплексов производился подсчет до 500 створок подряд по горизонтальному ряду в средней части препарата. По этому показателю диатомовые подразделялись по шкале, близкой к шкале Н.Н. Давыдовой, на доминанты (встречаются в пробах в количестве 10% и более), субдоминанты (от 5 до 9,9% подсчитанных в препарате створок). Обычные или сопутствующие виды составляют 1–4,9% численности, единичные – менее 1% (Давыдова, 1985).

В составе эпифитона обнаружено 58 видов диатомовых водорослей. Систематический список составлен по системе, принятой в научном издании «Определитель диатомовых водорослей России» (Куликовский и др., 2016).

Класс *Coccinodiscophyceae* представлен двумя порядками (*Stephanodiscales* и *Aulacoseirales*), двумя семействами (*Stephanodiscaceae* и *Aulacoseiraceae*), тремя родами (*Stephanodiscus*, *Cyclostephanos*, *Cyclotella* и *Aulacoseira*), включающими 5 видов (8,6% от общего числа выявленных видов и 23,3% численности створок). Класс *Fragilariophyceae* содержит один порядок *Fragilariales*, одноименное семейство, 5 родов (*Fragilaria*, *Staurosirella*, *Staurosira*, *Pseudostaurosira*, *Ulnaria*) и 13 видов (22,4% от общего числа обнаруженных видов диатомей и только 5,4 % численности створок). Большинство видов данного класса – единичные, доля участия в диатомовом комплексе менее 1%. Класс *Bacillariophyceae* наиболее многочисленный и объединяет 6 порядков, 10 семейств, 14 родов и 40 видов (68,9% от общего числа в пробе и 71,3% численности створок).

Доминировали типичный обрастатель *Cocconeis lineata* Ehrenberg (34,8% численности створок в препарате) и планктонный вид алкалибионт *Cyclostephanos dubius* (Fricke) Round (11,3%). Субдоминантами являлись обрастатель *Cocconeis euglipta* Ehrenberg (8,8%), планктонный вид *Aulacoseira ambigua* (Grunow) Simonsen (5,9%) и донный вид мезогалоб *Gyrosigma spencerii* (Bailey ex Quekett) Griffith et Henfrey (5,6%). Остальные виды по отношению к галобности – индифференты, к рН – алкалофилы. Присутствие индикаторов высокой минерализации и щелочности отражают соответствующий характер водной массы реки.

На повышенное содержание солей указывает и состав сопутствующего комплекса, для 5 из 12 видов которого незначительное повышение содержания в воде NaCl оказывает стимулирующее действие, олигогалобы-галлофилы: *Cyclotella meneghiniana* Kützing (2,3% численности створок), *Fragilaria gracilis* Østrup (1,2%), *Navicula reichardtiana* Lange-Bertalot (1,4%), *Amphora copulata* (Kützing) Schoeman et R.E.M. Archibald (1,7% численности).

В докладе систематическая и экологическая характеристики выявленного комплекса видов будут проанализированы в сравнении с таковыми стариц р. Припять.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Водные ресурсы Национального парка «Припятский»: справочник / Б.П. Власов, Т.В. Архипенко, И.А. Рудаковский, А.И. Зарубов. – Минск: БГПУ, 2011. – 96 с.

2. *Давыдова Н.Н.* Диатомовые водоросли – индикаторы природных условий в голоцене. – Л.: Наука, 1985. – 244 с.
3. Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Т.1. // Прошкина-Лавренко А.И. (ред.). – Л.: Наука, 1974. – 403 с.
4. *Куликовский М.С., Глуценко А.М., Генкал С.И., Кузнецова И.В.* Определитель диатомовых водорослей России. – Ярославль: Филигрань, 2016. – 804 с.
5. *Михеева Т.М., Свирид А.А., Хурсевич Г.К., Лукьянова Е.В.* Водоросли планктона водоемов и водотоков Национального парка «Припятский» / Под ред. Т.М. Михеевой. – Минск: Право и экономика, 2016. – 325 с.

Бентосные диатомовые водоросли восточной части Финского залива Балтийского моря

Benthic diatoms of the eastern part of the Gulf of Finland, Baltic Sea

Степанова В.А.

Vera A. Stepanova

Ботанический институт имени В.Л. Комарова РАН (Санкт-Петербург, Россия)

vera.stepanova@binran.ru

Более 150 лет назад началось изучение водорослей Финского залива, но большинство исследований было посвящено макрофитам и фитопланктону. Работы, посвященные бентосу, единичны. Лишь в последние годы этой группе водорослей уделяется больше внимания. В данной работе представлены результаты исследований бентоса восточной части Финского залива.

Ключевые слова: диатомовые водоросли; Финский залив; бентос

Over 150 years ago, the study of algae in the Gulf of Finland began, but most research was dedicated to macrophytes and phytoplankton. Studies on benthos were rare until recent years, when more attention was given to this group of algae. This study presents the results of benthic research in the eastern part of the Gulf of Finland.

Keywords: diatoms; Gulf of Finland; benthos

Исследований, посвященных изучению разнообразия диатомовых водорослей Балтийского моря, за последние 150 лет произведено немало. Однако большая часть работ была направлена на изучения планктона. Изучение же бентоса по большей части касалось водорослей-макрофитов и прибрежных растений. Исследования диатомовых водорослей восточной части Финского залива практически не проводились до последних лет, но и те, что есть, касаются лишь отдельных участков побережья. Материалом для изучения флоры диатомовых водорослей восточной части Финского залива послужили результаты собственных многолетних (2014–2021 гг.) исследований и литературные данные (Intercalibration..., 1993–1998; Потапова, 1999; Hällfors, 2004; Балашова и др., 2016; Степанова, 2019). Всего за прошедшие годы собрано 430 проб на 89 станциях на побережье восточной части Финского залива, в частности на побережье архипелага Березовые острова и острова Гогланд.

Балтийское море относится к бассейну Атлантического океана, это крупнейшее материковое море севера Европы. Основные параметры: площадь – 422,6 тыс. км², средняя глубина 48 м, максимальная глубина – 459 м, средняя соленость – 8‰. Береговая линия сильно изрезана, в море большое количество заливов и островов, особенно в его северной части. Пробы диатомовых водорослей для исследования собирались на побережье восточной части Финского залива. Общие параметры Финского залива: площадь – 29,7 тыс. км², средняя глубина – 38 м, максимальная глубина – 115 м, средняя

соленость – 3–4%. Побережье залива представлено песчаными пляжами, преимущественно на северном берегу, каменистыми субстратами, выходами гранитных пород, валунами, что особенно характерно для Березовых островов, и зарослями тростника, особенно это характерно для южного побережья и Выборгского залива.

Общий флористический список диатомовых водорослей бентоса исследуемого региона насчитывает 122 вида и внутривидовых таксона из 25 родов. Наибольший вклад в разнообразие вносят шовные диатомовые – 82 видов или 67% от общего числа видов, бесшовные занимают второе место – 31 вид или 25,4%, центрические – 9 видов и 7,6% от общего числа видов. По числу видов преобладают семейства Bacillariaceae – 17 видов, Naviculaceae – 12 видов и Fragilariaceae – 9 видов.

В пробах обрастаний и бентоса отмечалось незначительное число створок центрических диатомовых, чаще всего: *Aulacoseira subarctica*, *Cyclotella meneghiniana*, *Skeletonema subsalsum*, виды рода *Thalassiosira*.

В бентосных пробах преобладали мелкие диатомовые: *Martyana atomus*, *Pseudostaurosira trainorii*, *Opephora mutabilis*, *Staurophorm atomus*, виды рода *Achnanthes*. Многочисленны были также подвижные эпипелические диатомеи – *Navicula cryptocephala*, *Navicula perminuta*, *Nitzschia microcephala*, *Nitzschia palea*. На общем фоне небольших по размерам видов особенно выделяются крупные экземпляры *Gyrosigma acuminatum*, *Navicula tripunctata*, *Petronis humerosa.*, виды рода *Surirella* и др. Для диатомовых сообществ каменистых субстратов характерно преобладание видов родов *Diatoma*, *Navicula*, *Tabularia*, *Encyonema*, *Ctenophora*, *Fragilaria*. В обрастаниях макрофитов и водных растений преобладали *Ctenophora*, *Cocconeis*, *Diatoma*, *Encyonema*, *Gomphonema*, *Rhoicosphenia*, *Tabularia* и другими. Особенно многочисленны *Ctenophora pulchella*, *Diatoma tenuis* и *Tabularia fasciculata*. При большом разнообразии диатомовых бентоса и обрастаний, в сообществах преобладают бесшовные диатомовые.

Наиболее широко на побережье восточной части Финского залива распространены виды: *Ctenophora pulchella*, *Diatoma moniliformis*, *Fragilaria vaucheriae*, *Staurophorm atomus*, *Tabularia fasciculata* и *T. tabulata*. Виды *Diatoma polonica*, *Fragilaria tenera*, *Opephora krumbeinii*, *Pseudostaurosira trainorii*, *Staurophorm inermis* и *Tetracyclus emarginatus* – новые для флоры Балтийского моря. Впервые для флоры Ленинградской области выявлены: *Fragilaria amphicephaloides*, *F. gracilis*, *F. tenera*, *Licmophora gracilis* var. *anglica*, *Opephora krumbeinii*.

В изученном регионе преобладают морские и солоноватоводные виды – около 40% от общего числа видов, значительную часть составляют и пресноводные виды (29%). По отношению к кислотности среды: алкалофилы – 31% видов от общего числа, индифференты – 19%, ацидофилы – 7%. Большинство видов диатомовых являются космополитами – 31%, бореальные – 15%, аркто-бореально-тропические – 13%, меньше 10% другие.

Работа выполнена в рамках Госзадания плановой темы БИН РАН «Флора и систематика водорослей, лишайников и мохообразных России и фитогеографически важных регионов мира» (121021600184-6).

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Балашова Н.Б., Киселёв Г.А., Степанова В.А., Тобиас А.В. Диатомовые водоросли бентоса южного побережья Финского залива (заказник «Лебяжий») // Вестник СПбГУ. Серия 3. Биология. 2016. Вып.4. С. 9–25. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu03.2016.401>
2. Потанова М.Г. Диатомовые водоросли песчаной литорали в восточной части Финского залива // Ботанический журнал. 1999. Т.1. С. 59–65

3. Степанова В.А. Бесшовные диатомовые прибрежной зоны Березовых островов Финского залива // Ботанический журнал. 2019. Т.104 (5). С. 31–42. DOI: 10.1134/S0006813619050156
4. Hällfors G. Checklist of Baltic Sea Phytoplankton Species (including some heterotrophic protistan groups). –Baltic Sea Environment Proceedings. 2004. No.95. – 210 p.
5. Intercalibration and distribution of diatom species in the Baltic Sea. (eds. Snoeijls P.) The Baltic Marine Biologist Publication. N 16a. – Uppsala: Opulus Press, 1993. – V.1. – 129 p.
6. Intercalibration and distribution of diatom species in the Baltic Sea. (eds. Snoeijls P., Vilbaste S.) The Baltic Marine Biologist Publication. N 16b. – Uppsala: Opulus Press, 1994. – V.2. – 126 p.
7. Intercalibration and distribution of diatom species in the Baltic Sea. (eds. Snoeijls P., Potapova M.) The Baltic Marine Biologist Publication. N 16c. – Uppsala: Opulus Press, 1995. – V.3. – 126 p.
8. Intercalibration and distribution of diatom species in the Baltic Sea. (eds. Snoeijls P., Kasperoviciene J.) The Baltic Marine Biologist Publication. N 16d. – Uppsala: Opulus Press, 1996. – V.4. – 126 p.
9. Intercalibration and distribution of diatom species in the Baltic Sea. (eds. Snoeijls P., Balashova N.) The Baltic Marine Biologist Publication. N 16e. – Uppsala: Opulus Press, 1998. – V.5. – 144 p.

Состав и структура диатомовых водорослей в зоне влияния Нижегородской ГЭС

Composition and structure of diatoms in the zone of influence of the Nizhny Novgorod hydroelectric station

Шарагина Е.М., Воденеева Е.Л., Кулизин П.В., Мольков А.А.,
Середнева Я.В., Бондарев О.О., Охалкин А.Г.

Ekaterina M. Sharagina, Ekaterina L. Vodeneeva, Pavel V. Kulizin,
Alexander A. Molkov, Yana V. Seredneva, Oleg O. Bondarev,
Alexander G. Okhapkin

Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского
(Нижний Новгород, Россия)

sharaginaekaterinabio@gmail.com

В ходе данной работы был проведен анализ флористического состава и структурных показателей представителей диатомей в растительном планктоне реки Волга в зоне влияния Нижегородского гидроузла в вегетационный сезон 2022 г. В составе списка альгофлоры исследуемой акватории диатомовые водоросли занимали третье место, уступая зеленым и синезеленым водорослям и насчитывая 55 видовых и внутривидовых таксонов. Доминирование диатомей наблюдалось в мае и в октябре за счет вклада колониальных центрических диатомей. Отмечается присутствие инвазийных солоноватоводных видов – *Thalassiosira incerta* I.V. Makarova, *Skeletonema subsalsum* (A. Cleve) Bethge.

Ключевые слова: фитопланктон; альгофлора; Горьковское водохранилище; Нижегородская гидроэлектростанция; численность; биомасса; доминирование

During the present research, the analysis of the floristic composition and structural indicators of the diatoms in the Volga river's phytoplankton in the zone of influence of the Nizhny Novgorod hydroelectric station in the growing season of 2022 was performed. In the list of algaeflora of the studied water area, diatoms occupied the third place, giving way to green and blue-green algae, and numbering 55 species and intraspecific taxa. The dominance of diatoms was observed in May and October due to the contribution of colonial centric diatoms. The presence of invasive brackish-water species - *Thalassiosira incerta* I.V. Makarova, *Skeletonema subsalsum* (A. Cleve) Bethge is noted.

Keywords: phytoplankton; algal flora; Gorky reservoir; Nizhny Novgorod hydroelectric station; abundance; biomass; dominance

Горьковское водохранилище располагается в Нижегородской области в районе г. Городец и является частью каскада из 8 водохранилищ, расположенных на р. Волге, крупнейшей реке центральной России. Водохранилища и расположенные на них гидроэлектростанции образуют Волжско-Камский каскад. Заполнение водохранилища происходило в течение нескольких лет, в период 1955–1957 гг. (Охалкин и др., 1997). В участках акватории, расположенных в непосредственной близости к плотине, образуется

особое поле течений, оказывающее влияние на сообщества гидробионтов (Гречушников, 2022). Мониторинг гидроэкологического состояния водохранилища активно проводился вплоть до 1980-е гг., после произошло существенное сокращение наблюдений (Мольков и др., 2016). Диатомовые водоросли имеют большой потенциал при проведении биомониторинга, так как благодаря чувствительности к изменению разнообразных факторов водной среды являются перспективной группой организмов-биоиндикаторов (Хазанова, 2014).

Цель настоящей работы – анализ степени развития диатомовых водорослей реки Волга в верхнем и нижнем бьефах в зоне влияния Нижегородского гидроузла в вегетационный сезон 2022 г. Нижегородская ГЭС является важным инфраструктурным объектом комплексного назначения (Бурдин, 2011; Волга и ее жизнь, 1978).

Материалом для работы послужили результаты обработки проб растительного планктона, отобранных в ходе разовых съемок с десяти станций в верхнем и нижнем бьефах в зоне Нижегородского гидроузла в мае, августе и октябре 2022 г. (ВБ1 – станция в верхнем бьефе у правого берега близ Заволжья, ВБ2 и ВБ3 – две станции в верхнем бьефе посередине плотины, ВБ4 – станция в верхнем бьефе у левого берега близ Городца, ВБ5 – станция в речном участке на удалении от плотины; НБ1, НБ2, НБ3, НБ4, НБ5 – то же, но в нижнем бьефе). Пробы были собраны и обработаны в соответствии со стандартами, общепринятыми в гидробиологии (Методика ..., 1975). Отбирались как поверхностные, так и интегральные пробы. Ревизия списка диатомовых водорослей согласно актуальным данным их систематического положения производилась при помощи международной базы данных водорослей Algaebase (Guiry, Guiry, 2023). Перечень руководств, использованных при идентификации видов, указывался ранее (Воденеева и др., 2019).

В составе альгофлоры исследуемой акватории диатомовые водоросли насчитывали 55 видовых и внутривидовых таксонов, а также водорослей, определенных до рода, составляя 22% от всех обнаруженных видов (251 в. и в.в.т.) и уступая зеленым водорослям и цианобактериям. Диатомовые водоросли изученных станций принадлежали 3 классам (Mediophyceae, Coscinodiscophyceae, Bacillariophyceae), 20 порядкам и 24 родам. Наибольшим разнообразием характеризовался порядок центрических диатомей *Stephanodiscales*. По фактору насыщенности видами наиболее выделялся род *Aulacoseira*.

В мае диатомеи выступали в качестве доминантов как по численности, так и по биомассе. Основной вклад, как в верхнем, так и в нижнем бьефе на всех станциях, в том числе и на станции в русловом участке (ВБ5 и НБ5), вносили колониальные центрические диатомеи *Stephanodiscus binderanus* (Kütz.) H. Krieger, *Aulacoseira islandica* (O. Müll.) Simonsen, *Aulacoseira italica* (Ehrenb.) Simonsen. Представители отдела диатомовых водорослей слагали практически всю биомассу, их вклад достигал 99,41%. Общие значения биомассы в нижнем бьефе не превышали 4 г/м³, в верхнем бьефе на станции ВБ3 отмечалась вспышка цветения *Stephanodiscus binderanus* (значения биомассы данного вида в интегральной пробе доходили до 4,65 г/м³ при общих значениях биомассы 8,57 г/м³). В августе в сложении численности и в верхнем, и в нижнем бьефах диатомовые водоросли значительно уступали представителям цианобактерий (в частности, видам рода *Microcystis*), занимая вторую позицию, при максимальных значениях биомассы 3,61 г/м³. Схожая картина наблюдалась и в октябре, при цветении *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs. По биомассе в августе наблюдается дифференциация относительно бьефов – в верхнем диатомеи по-прежнему уступают синезеленым водорослям, а в нижнем бьефе наблюдали доминирование *Aulacoseira granulata* (Ehrenb.) Simonsen и *Nitzschia pusilla* Grunow в медианной части плотины. В октябре в акватории как до прохождения плотины, так и после отмечается доминирование диатомей, в частности таких видов как *Stephanodiscus binderanus*,

Aulacoseira granulata, *Melosira varians* C. Agardh., общие значения биомассы не превышали 3 г/м³.

В настоящее время отмечается присутствие инвазивных солоноватоводных видов – *Thalassiosira incerta* I.V. Makarova, *Skeletonema subsalsum* (A. Cleve) Bethge.

Работа выполнена в рамках реализации Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» ННГУ (№ темы Н-468-99_2021-2023).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Бурдин Е.А. Горьковский гидроузел: особенности проектирования (1946-1957 гг.) // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2011. №2 (54). С. 11–12.
2. Воденеева Е.Л., Кулизин П.В. Водоросли Мордовского заповедника (аннотированный список видов). – М.: Изд-во: Объединенная дирекция Мордовского государственного природного заповедника имени П.Г.Смидовича и национального парка «Смольный», 2019. 62 с. [Флора и фауна заповедников. Вып. 134]
3. Волга и ее жизнь / Под ред. Н.В. Буторина, Ф. Д. Мордохай-Болтовского. – Л.: Наука, 1978. – 352 с.
4. Гречушников М.Г., Доброхотова Д.В., Капустин И.А., Мольков А.А., Лещев Г.В. Исследование изменчивости гидроэкологических характеристик в приплотинном участке Горьковского водохранилища в 2022 году // Труды 7-й всероссийской научной конференции «Проблемы экологии Волжского бассейна» («ВОЛГА-2022»). Выпуск 5. – Н.Новгород: изд. ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2022. – С. 1–6.
5. Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. – М.: Наука, 1975. – 239 с.
6. Мольков А.А., Калинин Д.В., Капустин И.А., Корчемкина Е.Н., Пелевин В.В., Коновалов Б.В., Беляев Н.А., Соловьев Д.М. О перспективах дистанционной оценки гидробиооптических характеристик вод внутренних пресных водоемов по результатам экспедиций на Горьковское водохранилище в 2016 г. // Тезисы докладов научной конференции «Мировой океан: модели, данные и оперативная океанология», Севастополь, 26–30 сентября 2016 г. – ФГБУН МГИ, Севастополь, 2016. – С. 102–103.
7. Охалкин А.Г., Микульчик И.А., Корнева Л.Г., Минеева Н.М. Фитопланктон Горьковского водохранилища. – Тольятти, 1977. – 224 с.
8. Хазанова К.П. Биологический мониторинг и оценка качества вод реки Москвы по сообществу бентосных диатомовых водорослей // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16, №1 (4). С. 1039–1042.
9. Guiry M.D., Guiry G.M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. 2023. <http://www.algaebase.org> (дата обращения: 21.06.2023)

Секция 3.

Использование диатомовых водорослей в биостратиграфии и палеореконструкциях

Причины высокой продуктивности диатомей в неогеновых водоемах Южного Приморья

Causes of high diatom productivity in Neogene Lake of the Southern Primorye

Авраменко А.С.¹, Пушкарь В.С.²

Aleksandra S. Avramenko, Vladimir S. Pushkar

¹ФНЦ биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН
(Владивосток, Россия)

²Дальневосточный геологический институт ДВО (Владивосток, Россия)

avramenko@biosoil.ru

Изучение диатомей из неогеновых кремнистых органогенных отложений Приморья позволило установить таксономический состав, оценить качественную (экологическую) и количественную характеристики диатомовых флор, их образующих. Анализ особенностей ископаемых микрофоссилий позволил определить условия формирования пород и причины, определившие высокую продуктивность диатомей. Ими могли быть: развитие густой озерно-речной сети в регионе; длительный вегетационный период в условиях сформировавшегося к этому времени муссонного климата с мягкой зимой; активный вулканизм, продукты извержения которого были источником веществ, необходимых для поддержания жизнедеятельности водорослей и формирования их створок.

Ключевые слова: ископаемые диатомеи; продуктивность; неоген; Приморье

The fossil diatoms were studied from Neogene siliceous organogenic deposits of Primorye. The taxonomic composition of the diatom flora, to evaluate its qualitative (ecological) and quantitative characteristics were established. Based on analysis of the fossil microfossils features to established the conditions for the formation of rocks and the causes that determined the high productivity of diatoms. The probable causes could be: the development of a dense lake-river network; a long growing season under the conditions of a monsoon climate with mild winters that had formed by that time; active volcanism, the eruption products of which were a source of substances necessary for the maintaining vital activity of diatoms and formation of their valves.

Keywords: fossil diatoms; diatom productivity; Neogene; Primorye

Диатомеи являются важнейшими и наиболее распространенными представителями фитопланктонных сообществ и встречающиеся практически повсеместно во всех водных экосистемах. Являясь чуткими показателями изменчивости любых естественных факторов окружающей среды, они служат индикаторами событий, происходящих как в настоящем, так и прошлом. В тоже время, взаимодействие между изменениями климата и диатомеями это сложный механизм, поскольку и другие факторы, такие как характеристики озера, наличие биогенных элементов в зоне фотосинтеза, степень освещения, перемешивание и др., имеют влияние на диатомеи. Интересными объектами для изучения из геологического прошлого являются диатомиты – породы, состоящие более чем на 50% из кремнистых створок диатомей. Условия формирования диатомитовых отложений вплоть до настоящего времени остаются во многом неясными (Евзеров, 2011). Одной из

главных научных задач является установление причин, обеспечивающих благоприятные условия для богатого развития диатомей и сохранения их в осадках. Реконструкция этих условий позволит установить причинно-следственные отношения между состоянием окружающей среды и высокой продуктивностью диатомей, и определить факторы, обеспечивающие диатомовый биогенный седиментогенез.

В кайнозойских отложениях Приморского края диатомиты и туфодиатомиты достаточно широко распространены, что представляет уникальную возможность детально исследовать процессы, происходящие в то время и имевшие влияние на развитие сообществ диатомей. Отметим, что помимо научной значимости, диатомиты представляют собой ценный биогенный источник минерального сырья, которое имеет широкое применение в хозяйственной деятельности человека.

Главной особенностью времени формирования диатомитов Приморья явилась трансформация климата, связанная с рядом геологических событий, включающих тектоническую активизацию и поднятие Тибетского плато, что привело к резкому контрасту в прогреве суши и поверхностных вод окраинных морей (Royden et al., 2008). Этими событиями было обусловлено формирование Азиатского муссона и усиление засушливости в Центральной Азии (Jiang, Ding, 2008; Pushkar et al., 2019). Еще одним глобальным событием этого времени был продолжительный положительный экскурс изотопов углерода, или «Monterey Excursion», совпадающий с границей ранний-средний миоцен и началом значительного потепления после 16,9 млн. л.н. (Flower, Kennett, 1993; Holbourn et al., 2007). Возможно, и оно определило в регионе максимум тепла во время миоценового климатического оптимума, завершившегося примерно 13,5 млн. л.н. тенденцией на похолодание, которое продолжилось в плиоцене, и прерывалось в самом раннем (5,2–5,0 млн. л.н.) и среднем (3,3–3,0 млн. л.н.) плиоцене (Harry et al., 2014). Подобные изменения климата в миоцен-плиоценовое время были зафиксированы и для Приморского края (Короткий и др., 1996; Павлюткин, Петренко, 2010; Pushkar et al., 2019).

Целью данного исследования стал анализ пространственно-временного распределения диатомей, их таксономического состава и высокой концентрации створок в миоцен-плиоценовых озерных осадках Южного Приморья и выяснение причин их обусловивших.

В основу работы положены результаты диатомового анализа образцов, отобранных из трех диатомитов, расположенных в разных районах Приморского края: 1) западный берег оз. Ханка, между населенными пунктами Турий Рог и Новокачалинск (Ханкайский район) – новокачалинский диатомит; 2) верховья р. Сергеевки (Партизанский район) – сергеевский диатомит; 3) вблизи с. Тереховка (Надеждинский район) – тереховский диатомит.

Таксономический анализ и подсчет створок диатомей осуществлялись с помощью световых Amplival Carl-Zeiss и Axioskop 40 Carl Zeiss и сканирующих электронных микроскопов Carl Zeiss EVO 40 и Merlin в Центре коллективного пользования «Биотехнология и генетическая инженерия» ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН. Определение содержания створок диатомей в 1 г осадка (N) проводилось согласно стандартной методике.

В результате были определены особенности миоцен-плиоценовых диатомовых флор, рассмотрены события этого времени и высказаны предположительные причины высокой продуктивности диатомей.

Во всех изученных диатомитах обнаружено значительное содержание створок, свидетельствующее о высокой продуктивности диатомей. Наибольшая концентрация установлена для тереховского диатомита – 1,5 млрд., средняя – для новокачалинского – 1,4 млрд. и наименьшая – для сергеевского – 610 млн. ств./1 г сухого осадка.

Для новокачалинского и тереховского диатомитов характерно преобладание планктонных центрических диатомей *Aulacoseira* Thwaites с доминированием *A. praegranulata* var. *praeislandica* f. *praeislandica* (Jousé) Moisseeva до 84.7 % и до 93.2% соответственно. В сергеевском диатомите преобладают бентосные пеннатные мелкостворчатые формы *Staurosira venter* (Ehrenberg) Cleve et Möller до 84.8%, присутствуют *Aulacoseira italica* (Ehrenberg) Simonsen до 15.6% и крупностворчатые виды рода *Cymbella* Agardh (около 2%).

Доминирование во флорах новокачалинского и тереховского диатомитов представителей рода *Aulacoseira*, обитающих в планктоне современных крупных и глубоких озер (Трифенова, 1979), свидетельствует, что их накопление происходило в подобных водоемах. Представители родов *Staurosira* Ehrenberg из сергеевского диатомита, скорее всего, обитали в небольшом, относительно мелководном водоеме, возможно, старичного типа. Таксоны с маленькими створками из сергеевского диатомита, считаются пионерными видами во вновь появившихся современных олиготрофных арктических водоемах (Michelutti et al., 2003).

Реконструкции климата с помощью палинологического анализа (Короткий и др., 1996) позволили предположить, что в среднем миоцене на юге Приморского края, во время которого формировался новокачалинский диатомит, условия были схожи с современными субтропиками со среднегодовыми температурами +15–17°C, июльскими – +27–29°C, январскими – +4–7°C, и годовой суммой осадков – 1200–1400 мм. Именно обилие осадков и формирующийся муссонный климат обеспечивали развитие густой сети озер в регионе, а относительно теплая зима могла обуславливать продолжительный вегетативный период для развития диатомовых водорослей. С начала позднего миоцена и в течение плиоцена на юге Приморья отмечается похолодание климата: температура января – -2–3°C, температура июля – +22°C, годовая сумма осадков – свыше 1200 мм (Короткий и др., 1996). Такие условия определяли активное развитие диатомей в плиоценовых водоемах, результатом которого явилось формирование тереховского и сергеевского диатомитов.

Еще одним необходимым условием повышенной продуктивности диатомей является достаточное количество биогенных элементов и растворенного кремнезема, необходимых для этих водорослей. Основным источником поступления кремнезема и питательных веществ в озера Приморья в миоцене и плиоцене служили продукты активного вулканизма, что подтверждают мощные туфодиатомитовые толщи новокачалинской свиты и базальтовые потоки шуфанского горизонта (Павлюткин, Петренко, 2010). Доказательством высокого содержания кремнезема в воде являются окремненные панцири практически всех изученных диатомей. Возможно, что и вулканический пепел мог замедлять растворение биогенно-опалового кремнезема, способствуя формированию диатомовых залежей.

Фотосинтезирующие диатомовые водоросли, поглощающие углекислый газ, активно участвуют в углеродном цикле Земли, вырабатывая почти 25% кислорода на нашей планете (Kirk et al., 2011). Поэтому глобальное углеродное событие Монтерей, во время которого содержание такого парникового газа, как CO₂ в атмосфере повышалось до 470–630 ppm (Sosdian et al., 2018), в отличие от современного, составляющего 300–450 ppm, несомненно могло повлиять на продуктивность диатомей (Пушкарь, 2020). Именно для новокачалинского диатомита, сформировавшимся в среднем миоцене, была отмечена максимальная концентрация створок в осадках.

Таким образом, причинами высокой продуктивности диатомей в неогеновых озерах Южного Приморья могли быть, прежде всего: благоприятная палеогеографическая обстановка, отличающаяся особым климатическим режимом, при котором формируются водоемы с богатой и обильной диатомовой флорой; высокое количество растворенного кремнезема и других питательных веществ в воде.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 121031500274-4).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Евзеров В.Я. Формирование месторождений диатомита на крайнем Северо-Западе России // Вестник Воронежского Государственного Университета. Серия: геология. 2011. № 2. С.55–65.
2. Короткий А.М., Гребенникова Т.А., Пушкарь В.С., Разжигаева Н.Г., Волков В.Г., Ганзей Л.А., Мохова Л.М., Базарова В.Б., Макарова Т.П. Климатические смены на территории юга Дальнего Востока в позднем кайнозое (миоцен-плейстоцен). – Владивосток: ДВО РАН, 1996. – 57 с.
3. Павлюткин Б.И., Петренко Т.И. Стратиграфия палеоген-неогеновых отложений Приморья. – Владивосток: Дальнаука, 2010. – 164 с.
4. Трифонова И.С. Состав и продуктивность фитопланктона разнотипных озер Карельского перешейка. – Ленинград: Наука, 1979. – 168 с.
5. Flower B.P., Kennett J.P. Middle Miocene ocean-climate transition: High-resolution oxygen and carbon isotopic records from Deep Sea Drilling Project Site 588A, southwest Pacific // *Paleoceanography*. 1993. 8 (6). P. 811–843. DOI: <https://doi.org/10.1029/93pa02196>
6. Harry J.D., Chandler M.A., Cronin T.M., Dwyer G.S. Mid Pliocene Sea surface temperature variability // *Paleoceanography*. 2005. V.20, Is.2. PA2014. DOI: <https://doi.org/10.1029/2005PA001133>
7. Holbourn A., Kuhnt W., Schulz M., Flores J.A., Andersen N. Orbitally-paced climate evolution during the middle Miocene “Monterey” carbon-isotope excursion // *Earth and Planetary Science Letters*. 2007. V.261, №3–4. P. 534–550.
8. Jiang H., Ding Z.A. 20 Ma pollen record of East-Asian summer monsoon evolution from Guyuan, Ningxia, China // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2008. V.265. P. 30–38.
9. Kirk J.T.O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. – Cambridge: Cambridge University Press, 2011. – 649 p.
10. Michelutti N., Holtham A.J., Douglas M.S.V., Smol J.P. Periphytic diatom assemblages from ultraoligotrophic and UV transparent lakes and ponds on Victoria Island and comparisons with other diatom surveys in the Canadian Arctic // *Journal of Phycology*. 2003. V.39. P. 465–480.
11. Royden L.H., Burchfiel B.C., van der Hilst R.D. The geological evolution of the Tibetan plateau // *Science*. 2008. V.321. P. 1054–1058.
12. Pushkar V.S., Likhacheva O.Yu., Usoltseva M.V. Zonal Diatom Scale of the Continental Neogene in Primorye (Most Southern Territory of the Russian Far East) // *International Journal on Algae*. 2019. V.22, №3. P. 163–176. DOI: <https://doi.org/10.1615/InterJAlgae.v21.i2.60>
13. Sosdian S.M., Greenop R., Hain M.P., Foster G.L., Pearson P.N., Lear C.H. Constraining the evolution of Neogene ocean carbonate chemistry using the boron isotope pH proxy // *Earth and Planetary Science Letters*. 2018. V.498. P. 362–376.

Состав диатомовых ассоциаций голоценовых отложений северо-восточной части Норвежско-Гренландского бассейна

Diatom assemblages of the Holocene sediments from the northeastern Norwegian-Greenland Basin

Агафонова Е.А.¹, Ключиткина Т.С.², Кравчишина М.Д.¹,
Чеховская М.П.¹, Лозинская Л.А.¹

Elizaveta A. Agafonova, Tatiana S. Klyuvitkina, Marina D. Kravchishina,
Maria P. Chekhovskaya, Lyubov A. Lozinskaya

¹Институт океанологии имени П.П. Шириова РАН (Москва, Россия)

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
географический факультет (Москва, Россия)

agafonovaelizaveta@mail.ru

Приводятся данные диатомового анализа голоценовых отложений северо-восточной части Норвежско-Гренландского бассейна, результаты анализа сопоставляются с ранее выполненными исследованиями состава цист динофлагеллят, бентосных и планктонных фораминифер. Микропалеонтологический анализ позволил установить основные палеогеографические события Норвежско-Гренландского региона, предположительно, в голоцене.

Ключевые слова: диатомовый анализ; палеогеографические реконструкции; Северная Атлантика

This paper presents the results of diatom analysis of Holocene sediments from the northeastern part of Norwegian-Greenland Basin in comparison with palynomorph and foraminifera data. Main Holocene paleogeographic events of Norwegian-Greenland Basin were established by micropaleontological data.

Keywords: diatom analysis; paleogeographic reconstructions; North Atlantic

Северная Атлантика относится к зоне взаимодействия Атлантического и Северного Ледовитого океанов и является одним из районов, где происходит формирование глобальной термогалинной циркуляции (Фалина, Сарафанов, 2015). История исследований состава диатомовых ассоциаций планктонных сообществ в поверхностных осадках и плейстоцен-голоценовых отложениях Северной Атлантики насчитывает несколько десятилетий (Andersen et al., 2004; Коç et al., 2013; Oksman et al., 2019 и др.). Поскольку в субарктических районах Северной Атлантики ярко проявляются недавние изменения климата (Renaut et al., 2018), необходим детальный микропалеонтологический анализ голоценовых отложений для понимания особенностей формирования современных процессов, происходящих в океане.

В данной работе приводятся результаты диатомового анализа, выполненного для 31 образца из колонки отложений АМК-6150 с интервалом опробования 1 см, и сравниваются с ранее полученными данными исследований состава цист динофлагеллят, бентосных и планктонных фораминифер (Ключиткина и др., 2022). Колонка отложений

АМК-6150, вскрывающая 31 см темно-коричневых алевритистых илов, получена в северо-восточной части Норвежско-Гренландского бассейна (74°46.813' с.ш., 08°26.052' в.д.) с глубины 3013 м в 75-ом рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» в 2019 г. Возраст отложений оценивался на основе предварительных данных о климатостратиграфии по составу планктонных и бентосных фораминифер и не превышает 7 тыс. лет (Клювиткина и др., 2022). Техническая обработка образцов, предварительно высушенных с помощью лиофильной сушки ALPHA 1-4 LDplus, проводилась по стандартной методике (Диатомовые водоросли СССР, 1974) в ИО РАН. Видовые определения диатомей в препаратах осуществлялись с помощью микроскопа Axiostar plus (Carl Zeiss) при увеличении в 1000 раз с использованием иммерсии Immersol 518 N (Carl Zeiss Microscopy GmbH) с показателем преломления 1,518. Подсчет концентраций диатомей в отложениях осуществлялся по методу Battarbee (1973).

Суммарные концентрации диатомей существенно изменяются по колонке от 55 до 693 тыс. ств./г, в целом, увеличиваясь снизу вверх. Диатомовые ассоциации представлены 54 видами и разновидностями, из них 38 морских неритических и панталасных, 9 морских сублиторальных и 7 пресноводных.

В основании алевритистых илов темно-коричневых оттенков, в интервале 29–24 см (в двух образцах на глубине 31–29 см диатомовых водорослей обнаружено не было), концентрации диатомей изменяются от 55 до 430 тыс. ств./г, а их таксономическое разнообразие достигает 21 таксона. В составе диатомовых ассоциаций, как и по всей колонке отложений, преобладают (76-80%) морские неритические относительно тепловодные виды, типичные для этой части Атлантического океана (Oksman et al., 2019). Абсолютным доминантом в процентном отношении среди них является *Thalassionema nitzschioides* (30-57%). Доля сублиторальных видов, представленных до глубины 7,5 см исключительно *Paralia sulcata*, в данной части колонки уменьшается снизу вверх с 14,3 до 2,2%. Также были обнаружены единичные створки вымерших видов диатомей, характерных для палеогеновых отложений (Атлас микроорганизмов..., 1977), представленных следующими видами: *Thalassiosira undulosa*, *Hemiaulus polymorphus*, *Euryxidicula turris*, *Pyxilla caput-avis* var. *gracilis*, *Creswellia ferox*. Источником поступления этих видов в северо-восточную часть Норвежско-Гренландского бассейна, скорее всего, являются осадки баренцевоморского шельфа, где ископаемые палеогеновые и неогеновые виды диатомовых водорослей часто встречаются в современных и четвертичных отложениях (Полякова и др., 2021).

В залегающих выше отложениях суммарные концентрации диатомей сперва растут до глубины 21,5 см и значений 519 тыс. ств./г, затем снижаются до 117 тыс. ств./г, а начиная с 18,5 см вновь увеличиваются до значений 475 тыс. ств./г на глубине 15,5 см. В интервале 24–14 см было обнаружено 22 вида диатомовых водорослей. С глубины 23–24 см и выше в отложениях появляются створки ледово-морского вида *Attheya septentrionalis*. На этом фоне максимума достигают содержания ледово-неритических и холодноводных диатомей (8,9 и 30,3% соответственно). Первые представлены: *Porosira glacialis*, *Rhizosolenia hebetata* f. *hebetata* и *Thalassiosira gravida*, а вторые – *Actinocyclus curvatulus*, *Rh. borealis*, *T. angustelineata* и др. Доля сублиторальных видов увеличивается до 14,3%. Локальные пики ледово-морских и ледово-неритических диатомей наблюдаются на глубине 20–21 см, в то же время несколько снижается (до 75,9%) доля относительно тепловодных видов, представленных *A. divisus*, *Coscinodiscus asteromphalus*, *C. radiatus*, *Thalassionema nitzschioides* и *Shionodiscus oestrupii*. Выше, до глубины 14–15 см, последовательно сокращается до 9,8% и 1,2% доля относительно холодноводных и сублиторальных видов, а содержание относительно тепловодных видов повышается до 91,3% на глубине 18–19 см.

В интервале глубин 14–12 см доля относительно холодноводных видов диатомей, представленных в основном представителями рода *Thalassiosira*, возрастает до 29,3%, а

также увеличивается до 7,1% число ледово-неритических видов. При этом из состава диатомовых ассоциаций практически исчезают ледово-морские и морские сублиторальные диатомеи. На глубине 13,5 см до 66,6% снижается доля относительно тепловодных видов, что обусловлено уменьшением содержания вида *Thalassionema nitzschioides*.

В верхней части колонки суммарные концентрации диатомей достигают максимальных значений на глубине 8,5 см – 693 тыс. ств./г и 3,5 см – 661 тыс. ств./г. В интервале 12–3 см обнаружено 34 вида диатомей. На глубинах 8,5–3,5 см доля морских холодноводных видов увеличивается снизу вверх практически в два раза до 22%. Исключительно на глубинах 3,5–7,5 см в составе диатомовых ассоциаций появляются пресноводные виды, представленные планктонными *Aulacoseira islandica*, *A. subarctica*, *Cyclotella meneghiniana* и бентосными видами *Amphora copulata* и *Gomphonema parvulum*.

В верхних 3 см отложений концентрации диатомей изменяются незначительно, в целом уменьшаясь снизу вверх до 471 тыс. ств./г. Для этого интервала осадков отмечены увеличение доли ледово-морских видов и снижение количества ледово-неритических.

На основе данных микропалеонтологических исследований удалось установить следующие события голоценовой истории северо-восточной части Норвежско-Гренландского бассейна. Судя по появлению ледово-морских и увеличению доли ледово-неритических видов диатомей наряду со сменой комплекса диноцист (Клювиткина и др., 2022) на более тепловодный (14–24 см), вероятно, происходило относительное повышение температуры и солености поверхностных вод за счет усиления влияния Северо-Атлантического течения и, как следствие, отступления границы сезонных морских льдов и таяния льда, которое способствовало поступлению ледово-морских видов диатомей во время их вегетации в прикромочной зоне льдов в осадочное вещество и их сохранению в отложениях (Limoges et al., 2018; Agafonova et al., 2023).

Во второй половине голоцена установлено уменьшение температуры поверхностных вод, отражающееся в увеличении выше по колонке, на глубине 12–14 см, доли холодноводных видов микроорганизмов в отложениях, которое также прослеживается в Баренцевом (Duplessy et al., 2005) и Белом (Polyakova et al., 2023) морях. Более того, снижение роли относительно тепловодного североатлантического комплекса диатомовых водорослей и преобладание арктических видов в отложениях совпадают с таковыми в отложениях Норвежского моря и Датского пролива (Andersen et al., 2004; Коç et al., 2013).

Появление пресноводных видов диатомовых водорослей в интервале глубин 3–8 см вместе с увеличением доли ледово-морских видов может быть связано с более южным положением полярного фронта и/или с поступлением айсбергов. Источником пресноводных видов во льдах, вероятно, являются водотоки Земли Франца Иосифа.

Состав микроводорослей верхних 3 см осадков соответствует современным условиям осадконакопления, для которых в целом характерно увеличение влияния арктических водных масс, судя по увеличению доли ледово-морских и относительно холодноводных (в верхних 1,5 см) видов диатомовых водорослей.

Работа выполнена по гранту РНФ №21-17-00235 при дополнительной поддержке по теме госзаданий Минобрнауки №ФМВЕ-2021-0006 и Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова №121051100135-0.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Жузе А.П. (ред.). Атлас микроорганизмов в донных осадках океанов (диатомеи, радиолярии, силикофлагелляты, кокколиты). – М.: Наука, 1977. – 196 с.

2. Ключиткина Т.С., Новичкова Е.А., Киреенко Л.А., Чеховская М.П., Матуль А.Г. Микроводоросли и климат Северной Атлантики // Природа. 2022. № 11 (1287). С. 48-53. DOI: 10.7868/S0032874X22110059.
3. Полякова Е.И., Новичкова Е.А., Агафонова Е.А. Диатомеи и водные палиноморфы в донных осадках Баренцева моря: основные закономерности распространения и использование в палеоокеанологических исследованиях // Лисицын А.П. (ред.). Система Баренцева моря. – М.: ГЕОС, 2021. – С. 64–95.
4. Прошкина-Лавренко А.И. (ред.). Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Т. 1. – Ленинград: Наука, 1974. – 403 с.
5. Фалина А.С., Сарафанов А.А. О формировании нижнего звена меридиональной термохалинной циркуляции вод Северной Атлантики // Доклады РАН. 2015. Т. 461, № 6. С. 710–714.
6. Agafonova E., Novichkova E., Novigatsky A., Kravchishina M., Klyuvitkin A., Bulokhov A. Diatom and dinocyst production, composition and flux from the annual cycle sediment trap study in the Barents Sea // Geosciences. 2023. № 13(1). DOI: 10.3390/geosciences13010001.
7. Andersen C., Koç N., Jennings A., Andrews J. Nonuniform response of the major surface currents in the Nordic Seas to insolation forcing: Implications for the Holocene climate variability // Paleoclimatology. 2004. № 19. PA2003. DOI: 10.1029/2002PA000873.
8. Battarbee R.W. A new method for the estimation of absolute microfossil numbers, with reference especially to diatoms // Limnology and Oceanology. 1973. №. 18(4). P. 647–653.
9. Duplessy J.C., Cortijo E., Ivanova E., Khusid T., Labeyrie L., Levitan M., Murdmaa I., Paterne M. Paleoclimatology of the Barents Sea during the Holocene // Paleoclimatology. 2005. Vol. 20, PA4004. DOI: 10.1029/2004PA001116
10. Koç N., Miettinen A.I., Stickley C. Diatom records. North Atlantic and Arctic // Elias S.A. (ed.). Encyclopedia of Quaternary Science. – Netherlands, Amsterdam: Elsevier, 2013. – P. 567–576. DOI: 10.1016/B978-0-444-53643-3.00227-2.
11. Limoges A., Masse G., Weckström K., Poulin M., Ellegaard M., Heikkila M., Geilfus N.-X., Sejor M.K., Rysgaard S., Ribeiro S. Spring succession and vertical export of diatoms and IP25 in a seasonally ice-covered High Arctic fjord // Frontiers in Earth Science. 2018. V. 6, № 226. DOI: 10.3389/feart.2018.00226
12. Oksman M., Juggins S., Miettinen A., Witkowski A., Weckström K. The biogeography and ecology of common diatom species in the northern North Atlantic, and their implications for paleoclimatographic reconstructions // Marine Micropalaeontology. 2019. № 148. P. 1–28. DOI: 10.1016/j.marmicro.2019.02.002.
13. Polyakova Y., Agafonova E., Novichkova E., de Vernal A. Holocene paleoenvironmental implications of diatom, non-pollen palynomorph, and organic carbon records from the Kandalaksha Bay of the White Sea (European Arctic) // Geosciences. 2023. № 13, 56. DOI: 10.3390/geosciences13020056.
14. Renaut S., Devred E., Babin M. Northward expansion and intensification of phytoplankton growth during the early ice-free season in Arctic // Geophysical Research Letters. 2018. Vol. 45. P. 10590–10598. DOI: 10.1029/2018GL078995.

Диатомовый анализ донных отложений тундрового озера бассейна реки Еркута (полуостров Ямал, Россия)

Diatom analysis of the bottom sediments from the tundra lake of the Yerkuta River basin (Yamal Peninsula, Russia)

Валиева Э.А., Фролова Л.А., Нигматуллин Н.М., Глушко П.А.

Elvira A.Valieva, Larisa A. Frolova, Niyaz M.Nigmatullin,
Polina A. Glushko

Казанский (Приволжский) федеральный университет (Казань, Россия)

Zinnatova.1994@mail.ru

В данной работе представлены результаты диатомового анализа колонки донных отложений безымянного озера под условным названием 21-Уа-02 (68°09'90.3" с.ш.; 068°57'61.0" в.д., полуостров Ямал). Возраст отобранной колонки длиной 67 см составил 6200 кал. лет. В составе донных отложений было идентифицировано 118 таксонов диатомовых водорослей, принадлежащих к 38 родам. Наиболее высокое таксономическое богатство отмечено для рода *Eunotia* (21 таксон). По числу створок диатомовых в донных отложениях исследованной колонки озера доминировал ацидофильный таксон *Tabellaria flocculosa* (Roth) Kutzing. Диатомовый анализ донных отложений исследуемого озера позволил выделить основные этапы эволюции водоема в среднем и позднем голоцене. В период ~6200–5100 кал.л.н. в озере 21-Уа-02 доминировали ацидофильные таксоны *Eunotia triodon*, *Tabellaria flocculosa*, предпочитающие мелководные участки водоемов с низкой минерализацией. Далее во временном промежутке ~5100–3600 кал.л.н. отмечен переход к доминированию планктонных алкалофильных таксонов, предположительно отражая уменьшение ацидофикации в водоеме. ~3600–700 кал.л.н. в донных отложениях наблюдалось абсолютное доминирование планктонных диатомовых водорослей, практически исчезли ацидофильные таксоны, что может указывать на смену слабокислых условий водной среды на слабощелочные в результате смены экологических и климатических условий. Однако около 700 лет назад снова увеличилось значение ацидофильных и холодноводных таксонов, что возможно отражает увеличение площадей мелководий и заболоченных участков на территории водоема при ухудшении климатических условий.

Ключевые слова: диатомовые водоросли; донные отложения; озеро; изменение климата; полуостров Ямал

This paper presents the results of a diatom analysis of a column of bottom sediments of an unnamed lake under the conditional name 21-Ya-02 (68°09'90.3" N; 068°57'61.0" E, Yamal Peninsula). The age of the selected column with a length of 67 cm was 6200 cal. years. 118 taxa of diatoms belonging to 38 genera were identified in the bottom sediments. The highest taxonomic richness is noted for the genus *Eunotia* (21 taxa). According to the number of diatom valves, the acidophilic taxon *Tabellaria flocculosa* (Roth) Kutzing dominated in the bottom sediments of the studied column of the lake. Diatom analysis of the bottom sediments of the studied lake allowed us to identify the main stages of the evolution of the reservoir in the Middle and Late Holocene. Acidophilic taxa *Eunotia triodon*, *Tabellaria flocculosa* dominated in Lake 21-Ya-02 in the period ~6200–5100 cal. years BP, preferring shallow areas of reservoirs with low mineralization. Further, in the time interval ~5100–3600 cal. years BP, a transition to the dominance of planktonic alkaliphilic taxa was noted, presumably reflecting a decrease in acidification in the reservoir. 3600–700 cal. years BP absolute dominance of planktonic diatoms was observed in the bottom sediments, acidophilic taxa practically disappeared, which may indicate a change of slightly acidic conditions of the aquatic environment to slightly alkaline ones as a result of a change in environmental and climatic

conditions. However, about 700 years ago, the importance of acidophilic and cold-water taxa increased again, which may reflect an increase in the areas of shallow waters and wetlands on the territory of the reservoir with worsening climatic conditions.

Keywords: diatoms; bottom sediments; lake; climate change; Yamal peninsula

Исследование диатомовых комплексов озерных донных отложений является общепризнанным и важным методом реконструкций экологических и климатических событий в водоемах (Давыдова, 1985; Таций и др., 2020). Донные отложения арктических озер, не подверженных прямым антропогенным нагрузкам, в свою очередь, являются палеоклиматическими и палеогеохимическими архивами, которые содержат информацию о биогеохимических процессах, как в самом водоеме, так и на водосборе (Давыдова и др., 1988; Valieva et.al, 2020; Nazarova et.al., 2021).

Целью исследования колонки донных отложений озера 21-Уа-02 являлось изучение таксономического состава диатомовых водорослей с применением палеоэкологических методов и последующей реконструкцией изменений условий водоема в периоды среднего и позднего голоцена.

Озеро 21-Уа-02 (68°09'90.3" с.ш.; 068°57'61.0" в.д.) находится на территории полуострова Ямал в бассейне реки Еркута, в труднодоступном регионе севера России. Озеро небольшое, округлой формы, площадь озера составляет 0,02 км², максимальная глубина – 5,1 м, глубина в месте отбора колонки составила – 4,3 м.

Колонка донных отложений 21-Уа-02 В (68°09'89.7" с.ш., 068°57'60.2" в.д.) была отобрана с использованием пробоотборника Gravity Corer Uwitec (Австрия) в рамках летней научно-исследовательской экспедиции НИЛ «Палеоклиматологии, палеоэкологии и палеомагнетизма» КФУ в июле 2021 года. Абсолютное датирование отложений было проведено радиоуглеродным методом в Лаборатории NTUAMS (национальный Тайваньский университет). Возраст колонки длиной 67 см. составил 6200 лет.

Пробоподготовка образцов донных отложений на диатомовый анализ проводилась с использованием стандартного метода с некоторыми изменениями (Battarbee, 2000). Для изготовления постоянных препаратов использовалась высокопреломляющая смола Naphrax (коэффициент преломления 1,73). Подсчет и определение створок проводились по параллельным трансектам до 300 и более створок в образце с использованием светового микроскопа Zeiss Axio Emager A2 (иммерсионный объектив x100, п.а.=1,4) с применением дифференциально-интерференционного контраста (DIC) Номарского. Микрофотосъемку производили посредством фотокамеры Axio Cam MRc5. Диатомовая диаграмма была создана с помощью программы Тилиа (версия 2.0.41) (Grimm, 2004). Таксономическая идентификация проводилась с использованием отечественных и зарубежных определителей, систематических сводок и статей (Забелина и др., 1951; Krammer, Lange-Bertalot, 1988, 1991; Lange-Bertalot, Ulrich, 2014; Чудаев, Гололобова, 2016, Куликовский и др., 2016, Horst Lange-Bertalot, 2017).

В результате проведенных исследований в донных отложениях озера 21-Уа-02 идентифицировано 118 таксонов диатомовых водорослей, принадлежащих к 38 родам. А именно отмечено таксонов по родам: *Eunotia* – 21 таксон, *Pinnularia* (13), *Stauroneis* (6), *Encyonema* (6), *Neidium* (5), *Gomphonema* (5), *Psammothidium* (5), *Aulacoseira* (4), *Pseudostaurosira* (4), *Staurosira* (4), *Achnantheidium* (3), *Cymboplectra* (3), *Fragilaria* (3), *Brachysira* (2), *Caloneis* (2), *Cavinula* (2), *Diploneis* (2), *Fragilariforma* (2), *Frustulia* (2), *Platessa* (2), *Sellaphora* (2), *Surirella* (2), *Tabellaria* (2), *Amphora* (2), *Asterionella* (1), *Cocconeis* (1), *Cymbella* (1), *Ellerbeckia* (1), *Hantzschia* (1), *Navicula* (1), *Nitzschia* (1), *Placoneis* (1), *Planothidium* (1), *Stauroforma* (1), *Staurosirella* (1), *Tabularia* (1), *Tetracyclus* (1), *Ulnaria* (1). Наиболее высокое таксономическое богатство отмечено для рода *Eunotia* (21 таксон). Представители рода исключительно пресноводные организмы, преимущественно обитающие в дистрофных и олиготрофных экосистемах. Большинство

встреченных видов данного рода предпочитают водоемы, богатые гуминовыми кислотами: стоячие воды торфяников и сфагновых болот. Таксоны рода *Eunotia* распространены всесветно (Куликовский и др., 2016; Kulikovskiy et.al. 2021). В количественном отношении доминирует ацидофильная планктонно-бентосная *Tabellaria flocculosa* (Roth) Kutzing, предпочитающая олиготрофные и мезотрофные водоемы.

С помощью кластерного анализа на основе изменений в таксономическом составе, в колонке донных отложений было выделено 4 диатомовых зоны.

Зона ДЗ-I (67–57 см; ~6200–5100 кал.л.н.). Число таксонов в нижней части колонки донных отложений менялось от 15 до 18. Данная диатомовая зона характеризовалась низким видовым разнообразием и количеством диатомовых таксонов. В составе диатомовых комплексов по численности преобладали эпифиты *Tabellaria flocculosa* (Roth) Kutzing (34,09%), *Eunotia triodon* Ehrenberg, предпочитающие кислые условия местообитания и в обилии развивающиеся в условиях с низким содержанием питательных веществ. Субдоминантное положение занимали представители ацидофильного рода *Eunotia*, а именно виды: *Eunotia minor* (Kutzing) Grunow, составляющий 9,4% от общего числа таксонов в данной диатомовой зоне, *Eunotia incisa* W.Smith ex W.Gregory, (6,36%), характерные для торфяных, сфагновых болот и прочих кислых водоемов с низким содержанием минеральных веществ. Основу диатомового комплекса представляли бентосные таксоны родов: *Eunotia*, *Tabellaria*, *Encyonema*. Менее 5% занимали представители рода *Fragilariforma*, *Pinnularia*, *Neidium*, планктонные виды отсутствовали. Описанный выше комплекс диатомовых водорослей отвечает условиям мелководного, заросшего водной растительностью водоема с признаками заболачивания и закисления.

Зона ДЗ-II (57–37 см; 5100–3600 кал.л.н.). Число таксонов в пределах зоны колебалось от 16 до 28. Количество и разнообразие диатомовых створок возросло за счет появления таких видов как: *Aulacoseira subarctica*, *Cavinula vincentii*, *Frustulia krammeri*, *Stauroforma exiguiformis*, *Pseudostaurosira brevistriata*, *Stauroneis smithii*, холодноводных, аркто-альпийских видов *Tetracyclus glans*, *Pinnularia borealis*. Состав доминантных видов оставался неизменным, однако уменьшилось их количество: *Eunotia triodon* (14,24%), *Tabellaria flocculosa* (12,03%). Доля субдоминантов возросло за счет появления типичного обрастателя *Staurosira venter* (7,28%) и увеличения числа ацидофильного олиготрофно-мезотрофного *Tabellaria fenestrata* (6,78%).

Зона ДЗ-III (37–13 см; ~3600–700 кал.л.н.). Количество таксонов в образцах зоны варьировало от 20 до 27. Также отмечалась смена доминирующих видов на преобладание *Fragilariforma virescens* (10,61%), *Aulacoseira sp.* (10,14%), неизменным доминантом осталась *Tabellaria flocculosa* (12,03%), однако количество вида значительно уменьшилось. Из диатомового комплекса практически исчезли ацидофильные представители рода *Eunotia*, за исключением видов *Eunotia minor*, *Eunotia incisa*. Субдоминантами комплекса являлись: обрастатели *Stauroforma exiguiformis* (17,84%), *Staurosira venter* (9,84%) и типичные представители диатомового планктона холодноводных озер *Aulacoseira islandica* (8,04%), *Aulacoseira subarctica* (7%). Резкое снижение содержания представителей рода *Eunotia* указывает на изменение галобности и pH в водоеме. Максимальное число планктонных видов свидетельствует об обводнении озера в данный период его существования.

Зона ДЗ-IV (13–0 см; ~700–0 кал.л.н.). В данной зоне отмечалось максимальное видовое разнообразие диатомовых водорослей. Вновь увеличилось число ацидофильного доминирующего вида *Tabellaria flocculosa* (20,65%). Доминантом комплекса являлся вид *Stauroforma exiguiformis* (17,84%), который ранее занимал субдоминантное положение. Отмечены субдоминанты, такие как: *Staurosira venter* (9,07%), *Tetracyclus glans* (5,48%), *Aulacoseira islandica* (6,93%).

По результатам диатомового анализа донных отложений озера 21-Уа-02 можно сделать вывод о том, что ~6200-5100 кал.л.н в озере сложились слабокислые прохладные условия с низкой минерализацией и заболоченностью водосбора. ~5100–3600 кал.л.н появление алкалинных и доминирование планктонных видов может указывать на увеличение глубоководных участков с открытой водой. Высокая численность представителей рода *Aulacoseira* в данной зоне также может говорить о существовании значительных глубин в водоеме, так как вследствие массивности кремниевых панцирей большинство из них, как правило, нуждается в определенной мощности водной толщи (Smol, Cumming, 2000). Высокое таксономическое богатство диатомовых водорослей в верхней части колонки донных отложений указывает на повышение продуктивности озера за счет улучшения климатической обстановки в целом, что возможно соответствует субатлантическому теплому периоду. В период ~700 кал. лет вновь увеличивается число ацидофильных эпифитов рода *Eunotia*, *Tabellaria flocculosa*, *Stauroforma exiguiformis* и холодноводного альпийского вида *Tetracyclus glans*, вероятно происходит увеличение зоны мелководий, зарастание и заболачивание озера. О чем говорит также тот факт, что из планктонных видов в данный период развития озера представлена только *A. islandica*, которая более устойчива к низким температурам и толерантна к содержанию биогенов, нежели *A. subarctica*.

Мы благодарны всем участникам экспедиции за помощь в организации и проведении полевых работ. Диатомовый анализ выполнен в рамках Программы стратегического академического лидерства Казанского федерального университета (Приоритеты-2030), а также за счет средств субсидии, выделенных Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания № FZSM-2023-0023 в сфере научной деятельности.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Давыдова Н.Н. Диатомовые водоросли-индикаторы природных условий водоемов в голоцене. 1985.
2. Давыдова Н.Н., Субетто Д.А., Хомутова В.И. Позднеледниковый этап в развитии малых озер Северо-Запада России. История плейстоценовых озер Восточно-Европейской равнины. СПб., 1988. С. 166–193.
3. Забелина М.М., Киселев И.А., Прошкина-Лавренко А.И., Шешукова В.С. Диатомовые водоросли: Определитель пресноводных водорослей СССР. – М.: Советская наука. Вып. 4, 1951. – 620 с.
4. Куликовский М.С., Глуценко А.М., Генкал С.И., Кузнецова И.В. Определитель диатомовых водорослей России. – Ярославль: Филигрань, 2016. – 804 с.
5. Тацый Ю.Г., Моисеенко Т.И., Разумовский Л.В., Борисов А.П., Хорошавин В.Ю., Баранов Д.Ю. Донные отложения арктических озер Западной Сибири как индикаторы изменений окружающей среды // Геохимия. 2020. 65(4). С. 362–378.
6. Чудаев Д.А. Диатомовые водоросли озера Глубокого (Московская область) / Д. А. Чудаев, М. А. Гололобова. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2016. – 447 с.
7. Battarbee R.W. Palaeolimnological approaches to climate change, with special regard to the biological record // Quaternary Science Reviews, 2000. P. 107–124.
8. Grimm E. Tilia software 2.0.2. Illinois State Museum Research and Collection Center. – Springfield, 2004.
9. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae, Bacillariaceae, Epitemiaceae, Surirellaceae: Suesswasserflora von Mitteleuropa. – Stuttgart, Jena: Gustav Fischer Verlag, 1988. P. 596.
10. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae, Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. Süßwasserflora von Mitteleuropa 2/3. – Stuttgart & Jena, Gustav Fischer Verlag, 1991. P. 576.
11. Kulikovskiy M., Chudaev D., Glushchenko A., Kuznetsova I., Frolova L., Kociolek J.P. Two new species of the diatom genus *Navicula* Bory (Bacillariophyceae) from Vietnam (Southeast Asia) // Diatom Research. 2021. V.36, is.1. P. 63–75. DOI: 10.1080/0269249X.2020.1853608.
12. Lange-Bertalot H., Ulrich S. Contributions to the taxonomy of needle-shaped *Fragilaria* and *Ulnaria* species // Lauterbornia. 2014. V.78. P. 1–73.

13. *Lange-Bertalot H., Hofmann G., Werum M., Cantonati M., Kelly M.G.* Freshwater benthic diatoms of Central Europe: over 800 common species used in ecological assessment. – Schmitt-Oberreifenberg : Koeltz Botanical Books, 2017. – P. 942.

14. *Nazarova L.B.* Recent shift in biological communities: A case study from the Eastern European Russian Arctic (Bol'shezemelskaya Tundra) / L.B. Nazarova, L.A. Frolova, O.V. Palagushkina, N.A. Rudaya, L.S. Srykh, N. Solovieva, O.A. Loskutova // *Polar Biology*. 2021. V.44, is.6. P. 1107–1125. DOI: 10.1007/s00300-021-02876-7.

15. *Smol J.P., Cumming B.F.* Tracking long-term changes in climate using algal indicators in lake sediments // *Journal of Phycology*. 2000. T.36, №6. P. 986–1011.

16. *Valieva E., Frolova L., Nigamatzyanova G., Nigmatullin N., Gareev B.* Diatoms in bottom sediments of the Arctic lake in the Pechora River delta (Nenets Autonomous Okrug, Russia) // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*. 2020. 20(4.1). P. 391–398.

Структура четвертичной и неогеновой систем в Международной стратиграфической шкале: модификации последних лет

Structure of Quaternary and Neogene systems in the International Stratigraphic Scale: modifications of the last years

Гладенков А.Ю.

Andrey Yu. Gladenkov

Геологический институт РАН (Москва, Россия)

agladenkov@ilran.ru

Обсуждаются изменения в структуре четвертичной и неогеновой систем в Международной стратиграфической шкале, которые произошли в последние годы.

Ключевые слова: кватер; неоген; Международная стратиграфическая шкала

Changes concerning the structure of Quaternary and Neogene systems occurred in recent years in the International Stratigraphic Scale are discussed.

Keywords: Quaternary; Neogene; International Stratigraphic Scale

С изучением ископаемых диатомовых водорослей из четвертичных и неогеновых отложений связан достаточно широкий круг специалистов. Результаты этих работ предоставляют ценную информацию как для детальных стратиграфических исследований, так и проведения различного рода реконструкций параметров окружающей среды прошлого, а также прогнозирования возможных изменений в будущем. В этой связи диатомологам важно быть в курсе модификаций, происходящих в структуре неогена и кватера Международной стратиграфической шкалы (МСШ). При этом достаточно актуальными представляются и методические аспекты выделения подразделений этих систем.

МСШ представляет собой «документ», который разработан с целью использования на международном уровне и служит универсальным средством профессионального общения специалистов (прежде всего, геологов) разных стран, определяющим методику расчленения толщ земной коры. Все изменения, касающиеся структуры геологических систем, статуса выделяемых внутри них подразделений, проведения границ и их датировок в МСШ, рассматриваются и утверждаются Международной комиссией по стратиграфии (МКС) Международного союза геологических наук (МСГН). В настоящее время в МСГН входят представители 115 стран, включая Россию. Официально принятыми изменения считаются только после их ратификации Исполнительным комитетом МСГН. В случае такой ратификации решения по данным вопросам не пересматриваются в течение 10 лет. Инициатива обсуждения и

продвижения предложений по изменениям, касающихся той или иной системы, проявляется на уровне соответствующих подкомиссий, которые входят в состав МКС. Если при голосовании, в котором принимают участие голосующие члены подкомиссии, внесенное предложение одобряется необходимым количеством голосов (минимум 60% от числа проголосовавших), оно передается на рассмотрение бюро МКС. В случае утверждения, МКС направляет предложение по изменениям в Исполнительный комитет МСГН на ратификацию.

В последние годы наиболее существенные модификации затронули структуру четвертичной системы МСШ. Во-первых, бюро МКС утвердило предложение о выделении и принятии официального статуса подотделов в рамках отделов четвертичной системы (плейстоцена и голоцена), внесенное подкомиссией по стратиграфической классификации МКС. После поддержки со стороны МКС это предложение в 2020 г. было ратифицировано Исполнительным комитетом МСГН (Head et al., 2021). Таким образом, в настоящее время в четвертичной системе МСШ выделяются два отдела: плейстоцен (2,58-0,0117 млн лет) и голоцен (0,0117-0,00 млн лет). Оба отдела разделены на три подотдела: верхний, средний и верхний, каждому из которых соответствует один ярус (за исключением нижнего плейстоцена, включающего два яруса: гелазский и калабрийский). При этом нижняя граница недавно утвержденного среднеплейстоценового чибанианского яруса проводится на уровне 0,774 млн лет (Suganuma et al., 2021), а нижняя граница верхнего яруса плейстоцена (еще не имеющего названия) пока не утверждена. Во-вторых, необходимо отметить, что несколько ранее (в 2018 г.) были приняты и ратифицированы ярусы голоцена (соответствующие подотделам) и их границы. Как известно, при характеристике ярусов, согласно существующим в МКС правилам, выбираются не стратотипы самих ярусов, а используется методика «золотых гвоздей» для определения границ этих подразделений. То есть определяется стратотип нижней границы того или иного яруса, для чего выбирается и утверждается разрез и точка глобального стратотипа границы (Global Stratotype Section and Point = GSSP). В случае голоцена в качестве GSSP для двух нижних его ярусов (гренландского и северогриппианского) утверждены границы в разрезах скважин, пробуренных во льдах Гренландии (соответственно, уровни 0,0117 и 0,0082 млн лет), а для верхнего (мегалаянского) – в спелеотеме (0,0042 млн лет) в пещере, расположенной в северо-восточной части Индии (Walker et al., 2018). Говоря об упомянутых ярусах голоцена, необходимо отметить два важных методических аспекта. 1) По своей длительности эти ярусы значительно меньше плейстоценовых и резко отличаются (в сотни раз меньше) от таковых других систем фанерозоя. 2) Выделение голоценовых ярусов проводилось в континентальных образованиях и, прежде всего, на основе учета изменений изотопного состава отложений, знаменующих климатические события и изменения параметров окружающей среды. То есть, в данном случае использовались критерии, которые кардинально отличаются от традиционных для выделения ярусов и предусматривающих изучение разрезов морских фаций, с детальным анализом их палеонтологической характеристики.

Напомним, что до последнего времени подотделы/подэпохи в качестве официальных подразделений в структуре кайнозойских систем (неогена и палеогена) МСШ отсутствовали, а отделы расчленялись сразу на ярусы. То есть, определения «нижний», «средний» и «верхний» в рамках отделов относились к терминам неформального пользования. Однако утверждение подотделов в структуре четвертичной системы МСШ создало «прецедент», который предполагает возможность выделения подотделов и в других системах. В этой связи члены подкомиссии по стратиграфической классификации МКС проголосовали за предложение придания подотделам формального официального статуса в целом. Это предложение было поддержано бюро МКС и в 2021 г. ратифицировано Исполнительным комитетом МСГН (Aubry et al., 2022b). По

существо, такое решение дает право подкомиссиям МКС по стратиграфии различных систем обсуждать целесообразность выделения подразделов в той или иной системе и при положительном исходе голосования направлять такое предложение на утверждение бюро МКС.

Используя предоставленную возможность, руководство подкомиссии по стратиграфии неогена МКС инициировало в 2021 г. обсуждение иерархии подразделений неогеновой системы и целесообразность возвращения официального статуса подразделов в рамках отделов (миоцена и плиоцена) неогеновой системы (Aubry et al., 2022a). После проведенной дискуссии, вопрос о присвоении подразделам неогена официального статуса был вынесен на голосование. В итоге, необходимое большинство высказались за официальный статус подразделов. После этого голосования решение подкомиссии было утверждено на бюро МКС, а позже (в октябре 2021 г.) ратифицировано Исполнительным комитетом МСГН (Aubry et al., 2022a). Таким образом, в настоящее время в МСШ миоценовый отдел неогеновой системы разделен на три подраздела: нижний (включающий аквитанский и бурдигальский ярусы), средний (лангийский и сerratальский ярусы) и верхний (торгонский и мессинский ярусы), а плиоценовый отдел – на два подраздела: нижний (занклийский ярус) и верхний (пьяченцкий ярус).

В заключение отметим, что можно по-разному реагировать на решения МКС и с определенным скепсисом относиться к упомянутым изменениям в структуре четвертичной и неогеновой систем МСШ. Особенно это касается новых подразделений, утвержденных для квартера (прежде всего, ярусов голоцена). Однако российские специалисты, как часть международного сообщества, должны быть в курсе произошедших модификаций, обсуждать их и учитывать в своей работе.

Работа выполнена по теме государственного задания Геологического института РАН, г. Москва.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Aubry M.-P., Head M.J., Piller W.E., Berggren W.A. Subseries/Subepochs approved as a formal rank in the International Stratigraphic Guide // *Episodes*. 2020. V. 43, №4. P. 1041–1044. DOI: <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2020/020066>
2. Aubry M.-P., Miller K.G., Turco E., Flores J.A., Gladenkov A., Grunert P., Hilgen F., Nishi H., Holbourn A., Krijgsman W., Lirer F., Piller W.E., Quillévéré F., Raffi I., Robinson M., Rook L., Tian J., Triantaphyllou M., Vallejo F. Ratification of Neogene subseries as formal units in international chronostratigraphy // *Episodes*. 2022a. V. 45, №4. P. 445–453. DOI: <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2022/022008>
3. Aubry M.-P., Piller W.E., Gibbard P.L., Harper D.A.T., Finney S.C. Ratification of subseries/subepochs as formal rank/units in international chronostratigraphy // *Episodes*. 2022b. V. 45, №1. P. 97–99. DOI: <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2021/021016>
4. Head M.J., Pillans B., Zalasiewicz J.A., the ICS Subcommittee on Quaternary Stratigraphy. Formal ratification of subseries for the Pleistocene Series of the Quaternary System // *Episodes*. 2021. V. 44, №3. P. 241–247. DOI: <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2020/020084>
5. Saganuma Y., Okada M., Head M.J., Kameo K., Haneda Y., Hayashi H., Irizuki T., Itaki T., Izumi K., Kubota Y., Nakazato H., Nishida N., Okuda M., Satoguchi Y., Simon Q., Takeshita Y. Formal ratification of the Global Boundary Stratotype Section and Point (GSSP) for the Chibanian Stage and Middle Pleistocene Subseries of the Quaternary System: the Chiba Section, Japan // *Episodes*. 2021. V.44, №3. P. 317–347. DOI: <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2020/020080>
6. Walker M., Head M.J., Berkelhammer M., Björck S., Cheng H., Cwynar L., Fisher D., Gkinis V., Long A., Lowe J., Newnham R., Rasmussen S.O., Weiss H. Formal ratification of the subdivision of the Holocene Series/Epoch (Quaternary System/Period): two new Global Boundary Stratotype Sections and Points (GSSPs) and three new stages/subseries // *Episodes*. 2018. V.41, №4. P. 213–223. DOI: <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2018/018016>

Результаты диатомового анализа колонок донных отложений из южной части Азовского моря и Керченского пролива

Results of diatom analysis of bottom sediment columns from the southern part of the Sea of Azov and the Kerch strait

Ковалёва Г.В.

Galina V. Kovaleva

Южный научный центр РАН (Ростов-на-Дону, Россия)

kovaleva_galina@mail.ru

Исследованы особенности видового состава диатомовых водорослей из древнеазовских и новоазовских отложений Азовского моря. Для новоазовских слоев характерно доминирование нескольких таксонов: вид и разновидности *Actinocyclus octonarius*, *Actinoptychus senarius*, покоящиеся споры рода *Chaetoceros* spp., *Thalassiosira decipience*. Установлено, что в качестве индикаторных таксонов, которые маркируют новоазовские слои следует считать *Actinocyclus octonarius* var. *tonsure* и *A. pseudopodolicus*. Для древнеазовских слоев характерно существенное снижение численности *A. octonarius*, отсутствие таких таксонов, как *A. octonarius* var. *tonsure*, *A. pseudopodolicus*, *Actinoptychus senarius*. Маркирующим древнеазовские отложения (период новочерноморской трансгрессии) видом можно считать *Paralia sulcata*.

Ключевые слова: *Actinocyclus octonarius* var. *tonsure*; *Actinocyclus pseudopodolicus*; *Paralia sulcata*; новоазовские слои; древнеазовские слои; голоцен; Азовское море

The features of the species composition of diatoms from the Ancient and New Azov deposits of the Sea of Azov were studied. For New Azov deposits, the dominance of several taxa was revealed: species and varieties of *Actinocyclus octonarius*, *Actinoptychus senarius*, resting spores of the genus *Chaetoceros* spp., *Thalassiosira decipience*. *Actinocyclus octonarius* var. *tonsure* and *A. pseudopodolicus* should be considered indicator taxa, which mark the Novoazovsk layers. The Ancient Azov layers are characterized by a significant decrease in the abundance of *A. octonarius*, the absence of such taxa as *A. octonarius* var. *tonsure*, *A. pseudopodolicus*, *Actinoptychus senarius*. *Paralia sulcata* can be considered as marking species the Ancient Azov deposits (the period of the New Black Sea transgression).

Keywords: *Actinocyclus octonarius* var. *tonsure*; *Actinocyclus pseudopodolicus*; *Paralia sulcata*; New Azov layers; Ancient Azov layers; Holocene; Sea of Azov

Азовское море оформилось как самостоятельный водоем около 6,5–7 тыс. лет назад. Древнеазовский период существования Азовского моря (древнеазовские слои) длился от 6,5 до 3 тыс. лет назад. Наиболее близкие к современным условия сформировались в Азовском море около 3 тыс. лет назад (новоазовские слои). За последнее время собран и обобщен обширный фактический материал по биостратиграфии, литологии и абсолютному возрасту осадков (Ковалева, 2019).

Данная работа является продолжением исследований (Ковалева, 2021), направленных на изучение флоры диатомовых водорослей, обитавших в бассейне древнего Азовского моря с момента его обособления в самостоятельный водоем.

В ходе данного исследования впервые приводятся сведения об особенностях видового состава диатомовых водорослей из древнеазовских слоев, полученные в результате исследования двух колонок из южной части Азовского моря и северной части Керченского пролива. Мощность колонок составляла около 3 м, детальность отбора образцов для диатомового анализа 2–5 см. Максимальный возраст отложений составлял от 3900±130 лет назад – до современности. Определение абсолютного возраста выполнено радиоуглеродным методом (¹⁴C) по образцам раковин моллюсков, в работе используются калиброванные значения возраста.

В результате анализа получены данные о видовом составе и относительной численности диатомовых водорослей средне- и верхнечетвертичных отложений из северной части Керченского пролива и южного района Азовского моря. Анализ данных позволил выделить 10 экостратиграфических зон (7 для новоазовских слоев и 3 для древнеазовских). Выделенные методом диатомового анализа экостратиграфические зоны, соответствующую схеме, опубликованной ранее (Ковалева, 2019).

Полученные ранее данные (Ковалева, 2021) диатомового анализа новоазовских отложений (от 3,1 тыс. лет до настоящего времени), образовавшихся в течение фанагорийской регрессии и нимфейской трансгрессии, показали общие тенденции в смене видового состава микроводорослей. В колонках из южных районов выявлено типичное для верхнечетвертичных отложений Азовского моря доминирование нескольких таксонов: разновидности *Actinocyclus octonarius* var. *octonarius*, *Actinoptychus senarius*, покоящиеся споры диатомовых водорослей из рода *Chaetoceros* spp., представители рода *Thalassiosira*. Из всех вариантов *Actinocyclus octonarius* наиболее массовым была разновидность *A. octonarius* var. *ralfsii*, что характерно для голоценовых отложений Азовского моря. Помимо указанных выше таксонов, одним из часто встречающихся видов был *Thalassiosira decipience* (Grunow) E.G. Jørg.

Особое внимание было уделено встречаемости редких эндемичных таксонов (Гогорев, Ковалева, 2018) *Actinocyclus octonarius* var. *tonsurea* Kovaleva et Gogorev и *A. pseudopodolicus* Kovaleva et Gogorev. Анализ распространения *Actinocyclus octonarius* var. *tonsurea* и *A. pseudopodolicus* в кернах показал, что самые ранние находки этих таксонов приходятся на нижние слои новоазовских отложений, которые соответствуют началу фанагорийской регрессии (около 3000 лет назад). Для этого этапа развития Азовского моря характерно массовое развитие вида и разновидностей *Actinocyclus octonarius*. Исчезновение *Actinocyclus octonarius* var. *tonsurea* и *A. pseudopodolicus* во флористических комплексах диатомовых водорослей отмечено в период ордынской трансгрессии (от 600 до 400 лет назад). Таким образом, мы рассматриваем эти виды в качестве индикаторных таксонов, которые маркируют новоазовские слои.

Отличительной особенностью древнеазовских отложений в южном районе Азовского моря можно считать отсутствие в комплексе таких видов, как *Actinoptychus senarius*, *Actinocyclus octonarius* var. *tonsurea* и *A. pseudopodolicus*. Поскольку в новоазовских слоях самым массовым представителем рода *Thalassiosira* является *T. decipience*, то еще одним отличием древнеазовских слоев можно считать частую встречаемость *Thalassiosira eccentrica* (Ehrenberg) Cleve.

Еще один вид, который может иметь стратиграфическую значимость в качестве маркера древнеазовских отложений - *Paralia sulcata* (Ehrenberg) Cleve. *P. sulcata* изредка встречается в современном планктоне южной части Азовского моря (Прошкина-Лавренко, 1963) и, вероятно, его заносит с течением из Черного моря. В ископаемом состоянии вид указан для миоцена Таманского полуострова, но в голоценовых отложениях Азовского моря данный вид ранее не был обнаружен. Мы так же связываем обнаружение *P. sulcata* в древнеазовских слоях с адвекциями черноморских вод. Возраст древнеазовских отложений, в которых регулярно встречается *P. sulcata* составляет от 3900±130 до 3140±180 лет назад, что сопоставимо с периодом новочерноморской

(джеметинской) трансгрессии. Подтверждением этого служит и тот факт, что в некоторых слоях, где обнаружена *P. sulcata*, так же отмечено значительное количество фораминифер. Фораминифер крайне редко находят в современном Азовском море, но они обычны для Черного моря. Исходя из этих предположений, мы рассматриваем *P. sulcata* в качестве индикаторного таксона, которые маркируют новочерноморскую (джеметинскую) трансгрессию (древнеазовские слои).

Керны, отобранные в южном районе моря и, особенно, в северной части Керченского пролива, представляют определенный интерес, поскольку именно здесь наиболее существенно сказывается влияние черноморских вод, что отражается на видовом составе диатомовых водорослей и дает максимально полное представление о времени и масштабах голоценовых трансгрессий в Азовском море.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 23-17-00232 «Изменение уровня Азовского и Черного морей в конце плейстоцена и в голоцене». В ходе исследования использовалось оборудование Центра коллективного пользования объектов (№ 501994) Южного научного центра РАН.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Гогорев Р.М., Ковалева Г.В., Назаренко А.В. *Actinocyclus pseudopodolicus* sp. nov. и внутривидовой комплекс *A. octonarius* (Bacillariophyta) из голоценовых отложений Азовского моря // Новости систематики низших растений. 2018. Т.52, Вып. 1. С. 33–61.
2. Ковалева Г.В. Палеогеография и стратиграфия средне- и верхнечетвертичных отложений Азовского моря по результатам диатомового анализа. // Матишов Г.Г. (отв. ред.). Палеогеография Приазовья в голоцене. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2019. – С. 54–111.
3. Ковалева Г.В. Стратиграфическая значимость *Actinocyclus octonarius* var. *tonsurata* и *Actinocyclus pseudopodolicus* в верхнечетвертичных отложениях Азовского моря // Диатомовые водоросли: морфология, биология, систематика, флористика, экология, палеогеография, биостратиграфия: материалы XVII Междунар. науч. конф. (Минск, 23–28 авг. 2021 г.) – Минск, 2021. – С. 156–159.
4. Прошкина-Лавренко А.И. Диатомовые водоросли планктона Азовского моря. – М.-Л.: Из-во АН СССР, 1963. –190 с.

Диатомовые комплексы из донных отложений озера Семеновского (г. Мурманск)

Diatom complexes from bottom sediments of Lake Semenovskoe (Murmansk)

Косова А.Л.¹, Денисов Д.Б.¹, Слукровский З.И.^{1,2}, Вокуева С.И.¹

Anna L. Kosova, Dmitrii B. Denisov, Zakhar I. Slukovskii, Sofia I. Vokueva

¹Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН (Апатиты, Россия)

²Геологический институт КарНЦ РАН (Апатиты, Россия)

kosova@inep.ksc.ru

Впервые исследован состав диатомовых комплексов донных отложений оз. Семеновского, расположенного в черте г. Мурманска. В колонке ДО мощностью 43 см обнаружено 117 видов и внутривидовых таксонов диатомовых водорослей. Выявлены значительные перестройки в таксономическом составе и структуре по направлению от нижних слоев к верхним. В нижних слоях колонки массовыми видами являлись бентосные ацидофильные формы *Frustulia rhomboides* (Ehrb.) De Toni (32%) *Brachysira seriata* (Bréb.) Round & Mann (8,5%), *Semiorbis hemicyclus* (Ehrb.) Patrick (6,1%). В современных слоях доминирующими видами стали: планктонный алкалибионт *Aulacoseira subarctica* (Müll.) Haworth (46%), планктонно-бентосный алкалофил *Cyclotella meneghiniana* Kütz. (10%). Полностью исчезли бентосные ацидофильные виды *S. Hemicyclus* и *Oxynois binalis* (Ehrb.) Round.

Ключевые слова: диатомовые водоросли; донные отложения; городской водоем; Мурманск

For the first time, the composition of diatom complexes of the bottom sediments of Lake Semenovskoe was studied, located within the city of Murmansk. In the core 44 cm thick, 117 species and intraspecific taxa of diatoms were found. Significant rearrangements in the taxonomic composition and structure in the direction from the lower layers to the upper ones were revealed. In the lower layers of the core are benthic acidophilic forms of *Frustulia rhomboides* (Ehrb.) De Toni (32%) *Brachysira seriata* (Bréb.) Round & Mann (8,5%), *Semiorbis hemicyclus* (Ehrb.) Patrick (6,1%). In modern layers, the dominant species are: planktonic alkaliphile *Aulacoseira subarctica* (Müll.) Haworth (46 %), planktonic-benthic alkaliphile *Cyclotella meneghiniana* Kütz. (10 %). The benthic acidophilic species *S. hemicyclus* and *Oxynois binalis* (Ehrb.) Round completely disappeared.

Keywords: diatoms; sediments; urban lake; Murmansk

Исследование экологического состояния водоемов Арктического региона имеет важное научное и прикладное значение в связи с глобальными изменениями климата и загрязнениями, усиливающимися в последние десятилетия. Существенный вклад в формирование химического состава вод и донных отложений вносит антропогенный фактор. Донные отложения (ДО) озер накапливают информацию как об естественных изменениях озерных экосистем, так о динамике антропогенного влияния на них.

Озеро Семеновское (68°59'27"; 33°5'019") расположено в центральной части г. Мурманска. Город Мурманск – самый крупный город в России за Полярным кругом. Основными источниками загрязнения среды в г. Мурманске являются выбросы Мурманской ТЭЦ, ГОУТЭП «ТЭКОС» и АО «Завод ТО ТБО», занимающийся сжиганием

мусора. В результате исследования химического состава воды оз. Семеновского установлено его значительное загрязнение. Одним из основных источников загрязнения озера, которое проявляется в увеличении содержания V и Ni, а также Cd и Pb в воде озера, является Мурманская ТЭЦ, где в качестве топлива используется мазут. Минерализация воды (73 мг/л) выше, чем в озерах северо-восточной части Мурманской области водосбора Баренцева моря. Зафиксировано высокое содержание Fe (более 200 мкг/л) и органического материала. Вода озера Семеновского относится к хлоридному классу и натриевой группе (Даувальтер и др., 2020; Даувальтер и др., 2021).

С помощью диатомового анализа изучена колонка мощностью 43 см. Всего в ней обнаружено 117 видов диатомовых водорослей рангом ниже рода, в 43 родах. Наибольшего таксономического разнообразия достигают представители родов *Eunotia* (22), *Pinnularia* (11), *Aulacoseira* (7). Преобладающими таксонами являются *Frustulia rhomboides* (Ehrenberg) De Toni (до 42%), *Aulacoseira alpigena* (Grunow) Krammer (до 30%), *Aulacoseira subarctica* (Otto Müller) E.Y.Haworth (до 30%), *Cyclotella meneghiniana* Kützing (до 29%), *Diatoma tenuis* C.Agardh (до 54%), *Tabellaria flocculosa* (Roth) Kützing (до 25%), *Pseudostaurosira brevistriata* (Grunow) D.M.Williams & Round (до 15%).

Выявлены значимые изменения в составе и структуре диатомовых комплексов по направлению от нижних слоев к верхним. Зафиксирована смена доминантных видов. Наблюдается изменение относительной численности *Frustulia rhomboides*: в интервале 43–21 см вид занимает доминирующее положение в диатомовых комплексах (ДК), значения достигают 42%, выше численность снижается до 10%, а после слоя 15–14 см для вида характерно сопутствующее положение (2–7%). В нижней части колонки ДО 43–31 см значительной относительной численности достигает олиготрофный вид *Aulacoseira alpigena* (до 29%), выше по профилю ДО вид выявлен не во всех слоях и численность его низкая (до 5%), а после слоя 12–11 см полностью исчезает. В верхней части колонки существенно снижается доля ацидофильных видов родов *Brachisira* и *Eunotia*. Полностью исчезают ацидофильные виды *Eunotia (Semiorbis) hemicyclus* (Ehrenberg) R.M.Patrick и *Oxynesis binalis* (Ehrenberg) Round.

Резкая перестройка состава ДК связана с появлением и массовым развитием видов, ранее не встречавшихся. С глубины 28–27 см зафиксировано развитие *Asterionella formosa* Hassall, вида, характерного для ранних этапов антропогенного эвтрофирования. Наибольшие значения наблюдаются в слоях 20–19, 15–14, 8–7 см (5–7%). С глубины 20–19 см отмечено массовое развитие типичных представителей высокотрофных водоемов *Cyclotella meneghiniana* Kützing (до 28%), *Diatoma tenuis* C.Agardh (3–54% общего числа видов), а также планктонного алкалибионтного вида *Aulacoseira subarctica* (Otto Müller) E.Y.Haworth с мелкими створками. Следует отметить, что именно в районе слоя 18–17 см изученной колонки донных отложений происходит увеличение концентраций таких тяжелых металлов, как V, Ni, Pb, Sb, Cd, W (Slukovskii et al., 2020), что связывается с усилением антропогенного фактора на водную экосистему. В первую очередь, это происходит за счет выбросов Мурманской ТЭЦ, работающей на мазуте. Мелкоклеточный планктонный вид *Discostella pseudostelligera* (Hustedt) Houk зафиксирован в интервале 10–4 см ДО, относительная численность на глубине 7–6 см достигает 17%. Обнаружены тератологические изменения штриховки и формы створок диатомовых водорослей, как следствие токсического загрязнения вод.

Анализ экологических групп диатомей по отношению к местообитанию показал, что в интервале 43–21 см доминируют обрастатели и донные виды (54–82%), выше по профилю их доля снижается до 12%. Содержание планктонных форм варьирует вверх по разрезу, достигая 46% в верхнем слое.

В озере, на протяжении всего изученного периода накопления ДО, развивалась олигогалобная диатомовая флора. Но в интервале ДО 43–17 см в составе комплексов доминировали виды-галофобы (43–71%), доля индифферентных форм изменялась в

пределах 18–52%. Резкое развитие видов, предпочитающих повышенную минерализацию, наблюдается с глубины 17–16 см, и их доля достигает доминантного положения (66%) в слое 13–12 см. Выше по разрезу преобладают виды индифференты (до 68%), галофилы преобладают над галофобами

По отношению к рН в развитии диатомовой флоры озера выделяются два этапа: период накопления ДО в интервале 43–17 см характеризуется господством ацидофильных диатомей (54–79%). На глубине 17–16 см происходит резкая смена условий среды: доля ацидобионтов уменьшается до 22%, а доля алкалофилов возрастает до 54%, появляются алкалобионты (9%) и их относительная численность в верхнем слое достигает 46%.

Реконструированный по ДК показатель рН изменяется от 6,32 до 7,54 и демонстрируют тренд к повышению по направлению к верхним слоям отложений. В нижней части колонки (43–17 см) значения рН указывают на кислые и слабокислые условия среды (6,32–6,74), с 17–16 см – на слабощелочные и щелочные условия (7,07–7,54).

Индекс сапробности (*S*) был использован в качестве косвенного показателя изменения уровня трофии озера. В исследованном периоде развития водоема можно выделить два этапа. В интервале 43–21 см значения индекса (0,92–1,23) соответствуют олигосапробной зоне. Выше по колонке ДО индекс сапробности увеличивается и в современном слое достигает значения 2,07, что соответствует β-мезосапробной зоне.

Работа выполнена в рамках темы НИР № 122022400122-6.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Даувальтер В.А., Слуковский З.И., Денисов Д.Б., Черепанов А.А. Геоэкология городских озер Мурманска // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2020. №17. С. 153–157. DOI: <https://doi.org/10.31241/FNS.2020.17.028>.
2. Даувальтер В.А., Слуковский З.И., Денисов Д.Б., Черепанов А.А. Особенности химического состава воды городских озер Мурманска // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2021. Т. 66, № 2. С. 252–266. DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.204>. EDN: OTLWFF.
3. Slukovskii Z., Dauvalter V., Guzeva A., Denisov D., Cherepanov A., Siroezhko E. The Hydrochemistry and Recent Sediment Geochemistry of Small Lakes of Murmansk, Arctic Zone of Russia // Water. 2020. V.12, Iss. 4. Article number: 1130. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12041130>. EDN: SCEKUV.

Диатомовые комплексы в позднеледниковых-голоценовых отложениях озера Большого Щучьего (Полярный Урал)

Diatom assemblages in the Lateglacial-Holocene sediments of Lake Bolshoye Shchuchye (Polar Urals)

Лудикова А.В.

Anna V. Ludikova

Институт озероведения РАН – СПб ФИЦ РАН (Санкт-Петербург, Россия)

ellerbeckia@yandex.ru

Исследованы диатомовые комплексы из колонки донных отложений озера Большого Щучьего (Полярный Урал). Состав диатомовых комплексов позднеледниковых отложений характеризуется чередованием периодов преобладания планктонных и бентосных диатомей. В голоцене устойчиво доминируют планктонные виды, из которых максимальной численности достигает *Aulacoseira subarctica*. Улучшение климатических условий первой половины голоцена способствовало увеличению численности крупноклеточных диатомей, видов с широким географическим распространением, а также видов, предпочитающих высокотрофные условия. В свою очередь, похолодание позднего голоцена привело к возрастанию доли холодноводных видов, характерных для олиготрофных водоемов. Морфологическая изменчивость *A. subarctica*, наблюдаемая в голоценовых отложениях, по-видимому, является результатом адаптации к изменениям гидродинамических условий.

Ключевые слова: диатомовые водоросли; озеро Большое Щучье; позднеледниковье; голоцен

The study of the diatom assemblages from the sediment core from Lake Bolshoye Shchuchye (Polar Urals) was performed. The composition of diatom assemblages in the Lateglacial sediments characterizes alternating periods of predominance of planktonic and benthic diatoms. In the Holocene, planktonic species predominate with *Aulacoseira subarctica* being the most abundant. The climate amelioration during the first half of the Holocene resulted in increased proportions of large-celled diatoms, the taxa with a wide geographical distribution, as well as species preferring higher trophicity. The cooling of the Late Holocene, in turn, caused an increase in the proportion of cold-water species characteristic of oligotrophic lakes. The morphological variability of *A. subarctica* observed in the Holocene sediments apparently results from its adaptation to changes in hydrodynamic conditions.

Keywords: diatoms; Lake Bolshoye Shchuchye; Late Glacial; Holocene

Озеро Большое Щучье (67°52,8' с.ш., 66°18.0' в.д.), крупнейшее озеро Полярного Урала (длина ок. 13 км, ширина – до 1,4 км, площадь 11,74 км², объем водной массы – 0,78 км³, максимальная глубина озера – 136 м, средняя – ок. 67 м) и 15-е из самых глубоких озер России. Озеро расположено на северо-восточном макросклоне Уральских гор на высоте 185,9 м над у.м., в пределах ориентированной с северо-запада на юго-восток 25-км тектонической впадины. Водосбор озера сложен вулканическими и метаморфическими породами протерозой-кембрийского и ордовикского возраста. Четвертичные отложения представлены делювиальными, коллювиальными и солифлюкционными образованиями. Питание озера осуществляют 12 временных водотоков, наиболее крупный из которых – р. Пырятанё. Из южной части озера вытекает

р. Щучья, левый приток р. Оби. Озеро Большое Щучье – мономиктическое, с полным перемешиванием водной толщи в безледный период, продолжающийся ок. 2–2,5 мес. В зимний период устанавливается обратная термическая стратификация. Озерные воды относятся к гидрокарбонатному классу, характеризуются очень низкой минерализацией, бедны органическим веществом. Для озера характерна высокая прозрачность (8 м), температура поверхностного слоя воды летом не поднимается выше 10–14°C.

Согласно данным сейсмического профилирования, мощность толщи озерных отложений составляет 160 м. Колонка донных отложений длиной 54 м, отобранная в рамках совместного российско-немецкого проекта PLOT (Paleolimnological Transect) в центральной части озера с глубины 136 м, соответствует периоду осадконакопления 2-й половины МИС2 – МИС1. Дегляциация водосбора имела место 18–15 тыс. л.н. (Lenz et al., 2022).

Пробоподготовка для диатомового анализа выполнена по стандартной методике (Жузе и др., 1974). Виды с процентным содержанием створок <1% относили к единичным, 1–5% – к обычным, 5–10% – к субдоминантам, >10% – к доминантам.

В позднеледниковых отложениях чередуются интервалы доминирования планктонных (до 92%) и бентосных (до 98%) диатомей. Первые характеризуются преобладанием олиго-мезотрофной *Aulacoseira subarctica* и гиперэвтрофного *Stephanodiscus hantzschii*; с численностью обычных видов отмечаются *Pantocsekiella ocellata*, *P. schumannii*, *P. tripartita*, *Stephanodiscus minutulus* и *S. neoastraea*. Очевидно, этим интервалам соответствуют периоды потепления, когда в сезон вегетации озеро полностью или большей частью освобождалось от льда, что способствовало массовому развитию планктонных диатомей. Среди наиболее типичных представителей бентосных диатомей следует отметить бореальных *Reimeria sinuata* и *Gomphonema angustum* (достигают численности доминантов), характерных для водоемов с нейтральной и щелочной реакцией среды. С численностью субдоминантов и обычных видов встречаются также бореальные *Cocconeis placentula* et var. *euglypta* и *Nitzschia angustata*. Другие обычные виды представлены космополитами *Encyonema silesiacum*, *Amphora libyca* и *A. pediculus*, бореальными *Eunotia praeurupta*, *G. olivaceum* и *Opephora martyi*, североальпийским *Diploneis elliptica* var. *ladogensis* и др. Многие из них отмечены в современном фитоэпилитоне озера (Винокурова, 2017). Высокое содержание бентосных диатомей соответствует периодам похолодания, когда озеро в летний период не освобождалось ото льда полностью, что ограничивало развитие планктонных диатомей. Наиболее холодные эпизоды характеризовались оттаиванием только узкой прибрежной части, где происходило развитие диатомей бентоса.

В голоцене устанавливается абсолютное доминирование планктонных диатомей (>95%). В составе диатомовых комплексов преобладает *Aulacoseira subarctica* – холодолюбивый, олиго-мезотрофный вид, широко распространенный в крупных и малых водоемах умеренных, субарктических и арктических широт северного полушария (Gibson et al., 2003). Некоторые авторы относят *A. subarctica* к ацидофилам, предпочитающим pH<7, (напр., van Dam et al., 1994). Однако тот факт, что *A. subarctica* является одним из массовых видов фитопланктона в Ладожском и Онежском озерах, характеризующихся нейтральной реакцией среды, позволяет отнести ее к нейтрофилам. Важным фактором, благоприятствующим развитию диатомей рода *Aulacoseira*, как правило, имеющих массивные створки, является постоянное перемешивание водной толщи, позволяющее ее длинным нитевидным колониям удерживаться в фотической зоне.

В голоценовых отложениях озера Большого Щучьего ярко выражена смена различных морфотипов *A. subarctica*, характеризующихся различным соотношением высоты (h) и диаметра (d) створки. В самом начале голоцена наиболее многочисленной является низкопанцирная толстостенная *A. subarctica* – морфотип 2 (h<d). Очевидно,

преобладанию этого морфотипа способствовало интенсивное перемешивание водной толщи в сезон вегетации в условиях начавшегося потепления климата. В раннем голоцене абсолютного доминирования (до 80%) достигает *A. subarctica* – морфотип 1 ($h/d \geq 2$), отличающаяся высоким, узким и тонкостенным панцирем. Можно предположить, что в этот временной интервал водная толща была периодически стратифицированной, с более высокой по сравнению с современной разницей температур поверхностного и придонного слоев. Известно, что установление стратификации приводит к значительному стрессу для трофогенных популяций *Aulacoseira*, вызывая дефицит биогенных элементов в эпилимнионе, а также потери численности за счет оседания на дно в условиях ослабления циркуляции (Reynolds, 1994). Таким образом, указанные морфологические изменения у *A. subarctica* могли явиться результатом адаптационной стратегии, позволившей ей удерживаться в фотической зоне и продолжать вегетировать в условиях более стабильной водной толщи.

В дальнейшем доминирование переходит к *A. subarctica* – морфотип 3 ($1 < h/d < 2$), однако, начиная со второй половины голоцена, в составе диатомовых комплексов отмечается устойчивый рост численности низкопанцирной *A. subarctica* – морфотип 2. В позднем голоцене этот морфотип становится доминирующим (до 75%), что, очевидно, отражает ухудшение климатических условий, уменьшение продолжительности безледного периода и прогрева верхних слоев водной толщи, а также сокращение разницы поверхностных и придонных температур. Последнее должно было способствовать существованию интенсивной конвективной циркуляции в течение всего периода вегетации. В настоящее время преобладание морфотипов 2 и 3 характерно для диатомовых комплексов Ладожского и Онежского озер, где *A. subarctica* массово развивается в середине – второй половине биологической весны, характеризующейся интенсивным перемешиванием водной толщи. Ранее различные морфотипы *A. subarctica* определялись в этих озерах как три разных таксона: *Aulacoseira italica*, *A. italica* ssp. *subarctica* и *Aulacoseira (distans* var.) *alpigena* (Лудикова, 2023). Вероятно, по этой же причине в составе современного фитопланктона озера Большого Щучьего вместо *A. subarctica* указаны виды *A. alpigena* и *A. valida* (Митрофанова, 2017). Очевидно, *A. alpigena* соответствует в данном случае морфотипу 2, имеющему низкие и широкие створки, тогда как под *A. valida*, для которой характерны высокие и широкие створки, следует понимать морфотип 3 *A. subarctica*.

В составе диатомовых комплексов голоценовых отложений озера Большого Щучьего отмечаются различные представители планктонных диатомей рода *Cyclotella* sensu lato. Так, на протяжении большей части голоцена с численностью обычных видов, реже субдоминантов, отмечаются крупноклеточные *Lindavia bodanica* и *Pantocsekiella schumannii*. Первая из них – редкий пресноводный вид, характерный для альпийских и субальпийских олиготрофных озер, обитающий в Онежском озере и в некоторых водоемах азиатской части России (Генкал и др., 2013). Вторая, представленная круглыми и эллиптическими створками, предпочитает олиготрофные-мезотрофные озера, где развивается в течение всего вегетационного периода. Этот вид характерен для Ладожского и Онежского озер и других водоемов Северо-Запада Европейской части России и Западной Сибири (Генкал, 2012). В первой половине голоцена отмечается также увеличение содержания *Pantocsekiella ocellata*, космополита, обитающего в широком диапазоне трофических условий. Доминирование этого вида отмечалось, в частности, в современном фитопланктоне крупных глубоководных озер Хубсугул и Эльгыгытгын (Генкал, Поповская, 2007; Харитонов, Генкал, 2010). В первой половине голоцена в диатомовых комплексах озера Большого Щучьего происходит заметный рост численности планктонного крупноклеточного *Stephanodiscus neoastraea*, имеющего широкое географическое распространение, предпочитающего водоемы со слабощелочной средой, хорошо обеспеченные биогенными элементами. В среднем

голоцене в составе доминант-субдоминантного комплекса появляется планктонный алкалибионт *Stephanodiscus minutulus*, характерный для высокотрофных условий. Оба эти вида отмечаются в весенне-летнем фитопланктоне Ладожского и Онежского озер (Петрова, 1968), фитопланктонных сообществах водоемов и водотоков Западной Сибири (напр. Генкал и др., 2010), других водоемах Евразии. Высокотрофные *Stephanodiscus* spp., а затем и крупноклеточные *L. bodanica* и *P. schumannii* исчезают из состава диатомовых комплексов во второй половине голоцена. Одновременно происходит увеличение содержания мелкоклеточной *Pantocsekiella tripartita*, имеющей циркумполярное распространение и характерной для крупных, глубоководных олиготрофных и ультраолиготрофных водоемов с нейтральной – слабощелочной реакцией среды. В позднем голоцене в озере Большом Щучьем она входит в состав доминант-субдоминантного комплекса. В этот период в составе диатомовых комплексов с численностью обычного вида появляется холодноводный *Pliocaenicus costatus*. Оба эти вида характерны для современного фитопланктона озера Большого Щучьего, других водоемов Полярного Урала, Восточной Сибири, Чукотки (Ярушина, Генкал, 2007).

Таким образом, особенности состава диатомовых комплексов озера Большого Щучьего позволяют говорить о том, что в позднеледниковье развитие диатомовых водорослей определялось наличием или отсутствием ледового покрова на озере в вегетационный период. Это нашло отражение в чередовании периодов преобладания планктонных и бентосных диатомей. Уже в это время складываются характерные для последующих этапов черты видового состава диатомовых комплексов с доминированием планктонной *A. subarctica* при сравнительно небольшом участии других планктонных диатомей – представителей родов *Cyclotella sensu lato* и *Stephanodiscus*. Улучшение климатических условий первой половины голоцена способствовало увеличению численности крупноклеточных диатомей, видов с широким географическим распространением и предпочитающих высокотрофные условия. Похолодание позднего голоцена привело к возрастанию доли холодноводных видов – обитателей олиготрофных водоемов. Морфологическая изменчивость *A. subarctica*, наблюдаемая в голоценовых отложениях, по-видимому, является результатом адаптации к изменениям гидродинамических условий.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИНОЗ РАН по теме FMNG-2019-0004.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Винокурова Г.В. Фитоэпипитон озера Большое Щучье и связанных с ним рек (Полярный Урал) // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2017. №1. С. 11–14.
2. Генкал С.И. К морфологии, таксономии, экологии и распространению *Cyclotella vorticos* (Bacillariophyta) // Поволжский экологический журнал. 2012. №3. С. 243–251.
3. Генкал С.И., Поповская Г.И. О морфологической изменчивости *Cyclotella ocellata* Pantocsek (Bacillariophyta) // Биология внутренних вод. 2007. №1. С. 3–12.
4. Генкал С.И., Митрофанова Е.Ю., Куликовский М.С. Морфологическая изменчивость, таксономия и распространение *Cyclotella bodanica* Eulenstein (Bacillariophyta) в России // Биология внутренних вод. 2013. №2. С. 3–15.
5. Генкал С.И., Щур Л.А., Ярушина М.И. Диатомовые водоросли некоторых водоемов северо-востока Западной Сибири. Сообщение 1. Centrophyceae // Сибирский экологический журнал. 2010. №4. С. 551–561.
6. Жузе А.П., Прошкина-Лавренко А.И., Шешукова-Порецкая В.С. Методы исследования // Глезер З.И., Жузе А.П., Макарова И.В., Шешукова-Порецкая В.С. (ред.) Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). – Л.: Наука, 1974. – С. 50–79.
7. Лудикова А.В. Диатомовые комплексы из седиментационных ловушек в Онежском озере // Биология внутренних вод. 2023. № 3. С. 301–312. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0320965223030142>

8. Митрофанова Е.Ю. Фитопланктон озера Большое Щучье и рек его бассейна в августе 2016 года // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2017. №1. С. 55–61.
9. Петрова Н.А. Фитопланктон Ладожского озера // Растительные ресурсы Ладожского озера. – Л.: «Наука», 1968. – С. 73–130.
10. Харитонов В.Г., Генкал С.И. Центрические диатомовые водоросли (Centrophyceae) ультраолиготрофного озера Эльгыгытгын и водомов его бассейна (Чукотка, Россия) // Биология внутренних вод. 2010. №1. С. 3–12.
11. Ярушина М.И., Генкал С.И. К изучению флоры центрических диатомовых водорослей (Centrophyceae) водоемов восточного склона Полярного Урала (Россия) // Альгология. 2007. Т.17., №2. С. 237–252.
12. Gibson Ch.E., Anderson N.J., Haworth E.Y. *Aulacoseira subarctica*: taxonomy, physiology, ecology and palaeoecology // European Journal of Phycology. 2003. V. 8. P. 83–101. DOI: <https://doi.org/10.1080/0967026031000094102>
13. Lenz M.M., Andreev A., Nazarova L., Syrykh L.S., Scheidt S., Hafliðason H., Meyer H., Brill D., Wagner B., Gromig R., Lenz M., Rolf C., Kuhn G., Fedorov G., Svendsen J.I., Melles M. Climate, glacial and vegetation history of the polar Ural Mountains since c. 27 cal ka BP, inferred from a 54m long sediment core from Lake Bolshoye Shchuchye // Journal of Quaternary Science. 2022. V.37, №5. P. 818–835. DOI: <https://doi.org/10.1002/jqs.3400>
14. Reynolds C.S. The long, the short and the stalled: on the attributes of phytoplankton selected by physical mixing in lakes and rivers // Hydrobiologia. V. 89. P. 9–21. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00007405>
15. Van Dam H., Mertens A., Sinkeldam J. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from the Netherlands // Netherlands Journal of Aquatic Ecology. 1994. V.28. P. 117–133.

Диатомеи в колонках голоценовых отложений средней части дельты р. Волга (в районе с. Бараний Бугор)

Diatoms from the cores containing Holocene deposits from the central part of the Volga Delta (Baraniy Bugor region)

Лысенко Е.И., Макшаев Р.Р.

Elena I. Lysenko, Radik R. Makshaev

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
географический факультет (Москва, Россия)

lenobl1996@gmail.com

В данной работе были исследованы ископаемые диатомовые ассоциации из двух колонок в центральной части дельты Волги. В скв. С1 на правом берегу р. Болда диатомеи приурочены к тёмно-серым суглинистым отложениям. В рамках этого литологического слоя по диатомовым выделяются два этапа осадконакопления. Этап седиментации в более застойных условиях с преобладанием в структуре ассоциаций *Epithemia adnata* (30,0%) и *Aulacoseira granulata* (15,7%) по мере осадконакопления сменяется более проточными условиями. Структура ассоциации более проточной обстановки схожа с условиями мелких зарастающих проток в современной дельте Волги: *A. granulata* (72%), *Stephanodiscus astraea* var. *intermedia* и *Aulacoseira italica* (4,3 и 3,4% соответственно). В скв. ВВ9 на левобережье р. Болда в верхней части предположительно лиманной толши осадков реконструированы слабопроточные условия или обстановки малых рек.

Ключевые слова: диатомеи; биостратиграфия; новокаспийская трансгрессия; палеореконструкции

In this article we present the study of fossil diatom assemblages in the two cores from the central part of the Volga Delta. In the core C1 from the right bank of the Bolda River diatoms were found in the dark-grey lithological layer consisting of silt. In this layer we distinguish two stages of sedimentation. The first stage corresponds to more stagnant water regime and is represented by prevailing *Epithemia adnata* (30,0 %) and *Aulacoseira granulata* (15,7%). These conditions are replaced by more riverine-like ones during the process of sedimentation. The structure of diatom assemblages of the riverine-like conditions is similar to the assemblages from the environments of shallow overgrowing distributary channels in the recent Volga Delta: *A. granulata* (72%), *Stephanodiscus astraea* var. *intermedia* и *Aulacoseira italica* (4,3 и 3,4% respectively). In the core ВВ9, taken from the left bank of the Bolda River, we studied the upper part of the sediments, which probably deposited in a bay (liman), and reconstruct low-flow conditions or environments of small rivers.

Keywords: diatoms; biostratigraphy; Neocaspian transgression; palaeoreconstructions

Голоценовые отложения дельты Волги формировались под влиянием трансгрессии Каспийского моря, происходившей в указанный период в несколько этапов и именуемой новокаспийской. Согласно палеогеографическим и геоморфологическим исследованиям, уровень моря в максимум новокаспийской трансгрессии составлял -20 м (Янина и др., 2019). Поле высот поверхности дельты в изучаемом районе близ с. Бараний Бугор составляет от -22 м до -23 м (Коротаев, 2011). По ряду геоморфологических свидетельств, центральная часть современной дельты Волги подвергалась затоплению водами Каспия в течение голоцена.

Метод диатомового анализа ископаемых ассоциаций из отложений центральной части дельты был применён для реконструкций осадконакопления в изучаемом районе и выявления возможного влияния Каспийских вод на формирование осадков.

Отбор материала проводился в ходе полевых работ летом 2021-2022 гг. в районе археологического комплекса Семибугры (район с. Бараний Бугор) совместно с исследователями археологической экспедиции ООО «Археоцентр» и института Океанологии им. П.П. Ширшова РАН по изучению поселения эпохи Хазарского каганата. Колонки голоценовых отложений отобраны с поверхности дельтовой равнины на правом и левом берегах р. Болда методом шурфования и ручного бурения.

Скважина С1 на правом берегу р. Болда заложена в днище шурфа. Отбор образцов для диатомового анализа произведён из шурфа С1 глубиной 180 см и из керна, полученного методом ручного бурения, длиной 240 см. Абсолютная высота бровки шурфа составляет -21,7 см. Общая мощность изученных отложений составила 420 см. Всего диатомовым методом изучено 25 образцов.

Скважина ВВ9 заложена на поверхности дельтовой равнины на левом берегу р. Болда. Абсолютная высота заложения скважины составила -23,0 м, глубина скважины – 570 см. Методом диатомового анализа изучено 26 образцов из верхних 300 см керна.

Материал обеих скважин крайне скудно охарактеризован остатками диатомовой флоры. Все изученные створки относятся к пресноводным диатомовым водорослям. Образцы из стенок шурфа С1 оказались «немыми». В скважине С1 диатомеи выявлены в трёх образцах из следующих интервалов: 180–195 см; 340–350 см; 390–415 см. Для интервала 180–195 см, в котором вскрыты тёмно-серые алевролиты, характерны единичные створки пресноводных бентосных *Epithemia adnata*, *Craticula cuspidata*, *Rhopalodia gibba* и планктонных *Aulacoseira italica* диатомей, широко распространённых в современных осадках дельты Волги (Штыркова, Полякова, 2019). В остальных образцах содержание створок диатомей заметно выше, статистическая выборка составила 300–350 экземпляров. На глубине 340–350 см в толще чередующихся тёмно-серых супесей/суглинков преобладают планктонные виды. Доминантным видом является *A. granulata* (доля от общего числа створок 72%), у субдоминантных видов *Stephanodiscus astraea* var. *intermedia* и *Aulacoseira italica* доля створок низкая (4,3 и 3,4% соответственно). В интервале выявлены диатомеи, принадлежащие 16 родам и 19 видам. Образец из интервала 390–415 см относится к этому же литологическому слою супесей-суглинков, однако отличается иным соотношением диатомей и более богатым таксономическим разнообразием: выявлено 19 родов и 33 вида. Преобладает бентосный вид *Epithemia adnata* (30,0%), субдоминантным видом является *A. granulata* (15,7%), доля створок *R. gibba*, *Epithemia turgida* и *Nitzschia heufleriana* составляет примерно по 6%. Большинство видов представлено небольшим количеством створок (до 5). В обоих интервалах (340–350 и 390–415 см) отмечены спикулы губок (6–8 шт.).

В отложениях скважины ВВ9 диатомеи выявлены только в одном образце на глубине 280–290 см в толще средних и тяжёлых суглинков сизовато-коричневых. Содержание диатомовых водорослей в осадках крайне низкое, статистическая выборка составила 97 створок. Наибольшая доля створок относится к *A. granulata* (47,4%), субдоминантный вид – *Ulnaria ulna* (9,3%), около 5% приходится на *Epithemia sorex* и *Craticula cuspidata*. Таксономическое разнообразие насчитывает 16 видов 10 родов, наиболее богатый по видовому разнообразию род – *Epithemia* (3 вида). Также выявлено большое количество спикул губок (110 шт.).

В обеих скважинах наибольшее количество створок диатомовых приурочено к суглинистым тёмно-серым отложениям, обогащённым органикой. В скв. С1 внутри этого горизонта ближе к основанию колонки выделяются более застойные условия с преобладанием бентосного алкалибионтного вида *E. adnata* и широким видовым разнообразием, достигающимся преимущественно за счёт бентосных таксонов. По мере

осадконакопления условия становились более проточными, при этом трофический статус вод был довольно высоким, о чём свидетельствует резкое преобладание планктонного вида *A. granulata*, обитающего в эвтрофных водоёмах. Структура ассоциации схожа с таковыми, выделенными в современных осадках мелких зарастающих протоков в нижней части дельты Волги (Штыркова, 2019). В скважине ВВ9 толща сизоватых суглинков (260–570 см), судя по литологическим характеристикам, представляет собой лиманные отложения (Макшаев и др., 2022). Диатомовый анализ на данный момент проведён только для верхней части толщи, для которой характерны слабопроточные условия, судя по доминированию планктонных диатомей и широкому видовому разнообразию бентосных таксонов. Это также подтверждается большим количеством спикул губок. Согласно исследованиям А.Н. Неваленного с соавторами (2019), в современной дельте пресноводные губки достигают наибольшей биомассы в основном на малых реках или на участках реки со слабым течением. Все изученные в скважинах таксоны диатомей принадлежат к пресноводным, что говорит об опосредованном влиянии подъёма уровня моря во время формирования осадков.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Дельта Волги. Эволюция природной среды в условиях изменений климата / Ред. Янина Т.А. – М.: Географический факультет МГУ, 2019. – 168 с.
2. *Коротаев В.Н.* Геоморфология дельты Волги и динамика русловых разветвлений // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2011. №2. С. 103–109.
3. *Макшаев Р.Р., Бадюкова Е.Н., Матлахова Е.Ю., Лобачева Д.М., Лысенко Е.И., Бердникова А.А., Котеньков С.А., Соловьев Д.С.* Динамика русловой сети центральной части дельты р. Волги в контексте существования Семибугоринского археологического комплекса // Динамика экосистем в голоцене. Сборник статей по материалам всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург, 17–21 октября 2022 года. – СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2022. – С. 102–106.
4. *Неваленный А.Н., Сокольский А.Ф., Франов Н.А.* Анализ продуктивности губки из семейства Spongillidae, произрастающей в водоемах реки Волги, в период регрессии Каспийского моря // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2019. №2. С. 57–65.
5. *Штыркова Е.И., Полякова Е.И.* Диатомеи в голоценовых осадках дельты Волги (Дамчикский участок) как индикаторы палеоэкологических условий осадконакопления // Вопросы современной альгологии (Issues of modern algology) – algology.ru. 2019. №20. С. 270–273. URL: <http://algology.ru/1542> (дата обращения: 18.06.2023). DOI: [https://doi.org/10.33624/2311-0147-2019-2\(20\)-270-273](https://doi.org/10.33624/2311-0147-2019-2(20)-270-273).

Диатомовые комплексы донных отложений озера Яктыкуль (Южный Урал)

Diatom assemblages of Yaktykul lake sediments (Southern Urals)

Масленникова А.В., Гулаков В.О.

Anna V. Maslennikova, Vasiliy O. Gulakov

Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН
(Миасс, Россия)

adenophora@inbox.ru

На основе исследования диатомовых комплексов колонки донных отложений изучено изменение глубокого горно-степного олиго-мезотрофного озера Яктыкуль (Банное) за последние 230 лет. Идентифицировано 126 видов и разновидностей диатомовых водорослей, представленных преимущественно планктонно-бентосными алкалифилами, олигогалолами, β -мезосапробами и олигосапробами. Выделено пять диатомовых зон и установлено возрастание количества мелких циклических диатомей (*Stephanodiscus parvus*, *Pantocsekiella comensis*) в верхней части колонки донных отложений. Выполнены реконструкции изменения содержания общего фосфора (TP) в воде. Установлено, что до середины XX века содержание TP коррелировало с температурой вегетационного периода, а затем с годовой суммой осадков, что может объясняться возрастанием роли притока фосфора с водосбора.

Ключевые слова: диатомей; озеро; потепление; антропогенное воздействие; эвтрофирование; общий фосфор; колонка донных отложений

Changes of deep mountain-steppe oligo-mesotrophic lake Yaktykul (Bannoe) over the past 230 years were studied based on diatom analysis of the sediments core. Identified species and varieties of diatoms (126) were represented mainly by planktonic-benthic alkaliphiles, oligohalobes, β -mesosaprobies and oligosaprobies. Five diatom zones were distinguished. Small cyclic diatoms (*Stephanodiscus parvus*, *Pantocsekiella comensis*) increase in the upper part of the sediment core was observed. Changes in total phosphorus (TP) concentration were reconstructed. Until the middle of the twentieth century, the content of TP correlated with growing season temperature, and then with annual precipitation, which could be explained by increasing role of phosphorus inflow from the catchment.

Keywords: diatoms; lake; climate warming; human impact; eutrophication; total phosphorus; lake sediments core

Озеро Яктыкуль (Банное) является самым глубоким озером республики Башкортостан. Озеро имеет тектоническое происхождение, максимальную глубину 28 м и площадь 7,7 км². Вода в озере гидрокарбонатная магниевая-кальциевая с минерализацией около 200 мг/дм³. Согласно данным 2021–2022 гг., содержание общего фосфора (TP) в летней и весенней воде с места отбора колонки донных отложений составляет 8–10 мкг/дм³, а концентрация общего азота (TN) – 0,31–0,41 мг/дм³. Концентрация TP в начале октября 2021 года – 48 мкг/дм³, а TN – 0,56 мг/дм³. Глубина по диску Секки варьирует от 4 до 6,5 м. Оз. Яктыкуль является гидрологическим памятником природы регионального значения. Озеро подвергается существенной рекреационной нагрузке,

аномальная жара в отдельные годы приводит к снижению его уровня. Природные и антропогенные факторы могут привести к неблагоприятным изменениям озерной экосистемы и ухудшению качества его воды. Для оценки динамики озерной экосистемы за последние 230 лет выполнено палеоолиминологическое исследование на основе диатомового анализа колонки донных отложений.

Колонка донных отложений (53°59'30.00" с.ш., 58.63'01.78" в.д.) мощностью 24 см отобрана с глубины 13 м в апреле 2021 г. Возраст и скорость осадконакопления определены с помощью анализа активности ^{210}Pb (аналитик В. А. Григорьев, СПбГУ). Диатомовый анализ выполнен для 35 проб на микроскопе Микмед-6 вар. 7 при увеличении в 1000 раз. Приуроченность видов к местообитанию оценивалась по методике Бариновой и Медведевой (2006). Отношение к рН, сапробности, минерализации, трофическому статусу определялось по Van Dam, 1994. Количественные реконструкции общего фосфора выполнены на основе комбинированной Европейской базы данных (EDDI) (Lotter, 1989; Bennion, 1994; Wunsam & Schmidt, 1995; Bennion et al., 1996) и региональной базы данных озер Урала (Maslennikova, 2020). Для определения взаимосвязи изменений экосистемы с климатическими параметрами использованы данные по Оренбургу с 1832 года (<http://www.pogodaiklimat.ru/history/35121.htm>).

В результате диатомового анализа колонки донных отложений оз. Яктыкуль идентифицировано 126 видов и разновидностей диатомовых водорослей. По приуроченности к местообитанию диатомовые водоросли представлены главным образом планктонно-бентосными видами. По отношению к рН — алкалифилами, по сапробности — олигосапробами и β -мезосапробами, по трофическому статусу — мезоэвтрофами и индифферентами, по минерализации — олигогалолами. Индекс разнообразия Шеннона (H) варьирует от 2,0 до 2,8, а индекс выравненности по Шеннону (S) изменяется от 0,5 до 0,7.

Согласно данным анализа активности ^{210}Pb , колонка донных отложений охватывает более 230 лет, скорость осадконакопления составляет $0,95 \pm 0,03$ мм/год.

В результате кластерного анализа с учетом стратиграфических ограничений выделено пять диатомовых зон:

DZI (22–15 см, 1790–1865 гг.) характеризуется доминированием *Pseudostaurosira brevistriata* (Grunow) D.M. Williams & Round 1988 и *Staurosira venter* (Ehrenberg) Cleve & J.D. Möller 1879. Субдоминантами являются *Staurosira construens* Ehrenberg 1843, *Staurosira tabellaria* (W. Smith) Leuduger-Fortmorel 1878, *Staurosirella lapponica* (Grunow) D.M. Williams & Round 1987, *S. pinnata* (Ehrenberg) D.M. Williams & Round 1988, *Amphora indistincta* Levkov 2009, *A. pediculus* (Kützing) Grunow in A.W.F. Schmidt 1875, *Karayevia clevei* (Grunow) Bukhtiyarova 1999. Постоянно встречаются *Halumphora thumensis* (A. Mayer) Levkov 2009, *Cocconeis neothumensis* Krammer 1990, *Staurosira binodis* (Ehrenberg) Lange-Bertalot in Hofmann, Werum & Lange-Bertalot 2011, *Cymbella falsa diluviana* (Krasske) Lange-Bertalot & Metzeltin in Metzeltin, Lange-Bertalot & Nergui 2009, *Navicula cari* Ehrenberg 1836, *Planothidium joursacense* (Héribaud-Joseph) Lange-Bertalot 1999.

Среди планктонных видов доминирует *Aulacoseira ambigua* (Grunow) Simonsen 1979, субдоминантами являются *Pantocsekiella comensis* (Grunow) K.T. Kiss & E. Ács in Ács et al. 2016, *Stephanodiscus alpinus* Hustedt in Huber-Pestalozzi 1942 и виды, отнесенные к *Handmania comta* (Ehrenberg) Kociolek & Khursevich 2012 (по Куликовскому и др., 2016). Кроме того, постоянно встречается *Stephanodiscus neoastraea* Håkansson & Hickel 1986. Отмечаются единичные створки *Asterionella formosa* var. *formosa* Hassall 1850, *Fragilaria crotonensis* Kitton 1869, а также *Pantocsekiella ocellata* (Pantocsek) K.T. Kiss & E. Ács in Ács et al. 2016. Индекс разнообразия Шеннона составляет 2,1–2,5, а индекс выравненности – 0,6–0,7.

DZII (15–11,5 см, 1865–1900 гг.) отличается возрастанием концентрации диатомовых створок, в основном за счет *Pseudostaurosira brevistriata*. Доля *Staurosira venter*, *Cocconeis neothumensis*, *Gyrosigma attenuatum* (Kützing) Rabenhorst 1853 и *Staurosirella martyi* (Héribaud-Joseph) E.A.Morales & K.M.Manoylov 2006 падает. Разнообразие и выравненность уменьшаются ($H=2,0-2,2$, $S=0,5-0,6$).

DZIII (11,5–7,5 см, 1900–1945 гг.). Уменьшается концентрация диатомей и содержание *Pseudostaurosira brevistriata*, увеличивается участие *Staurosira venter*, *Staurosirella pinnata*, появляется *Staurosira aff. sviridae* Kulikovskiy, Genkal et Mikheeva 2011 (по Чудаеву, Гололобовой, 2016). Вновь возрастает роль *Cocconeis neothumensis*, *Gyrosigma attenuatum* и *Staurosirella martyi*. Разнообразие и выравненность увеличиваются ($H=2,2-2,4$, $S=0,6-0,7$).

DZIV (7,5–4,5 см, 1945–1975 гг.) характеризуется снижением роли *Staurosira venter* и *Staurosira construens*, резким возрастанием доли *Staurosirella lapponica*. Немного повышается количество *Cymbellafalsa diluviana*, *Aulacoseira ambigua*, *Pantoksekiella comensis* и *Stephanodiscus alpinus*.

DZV (4,5–0 см, 1975–2021 гг.). Снижается содержание *Staurosirella lapponica*. Доля *Staurosira venter* и *S. construens* возрастает. Увеличивается роль *Pantoksekiella comensis* и *Asterionella formosa var. formosa*. Появляется *Stephanodiscus parvus* Stoermer & Håkansson 1984. Постепенно возрастает концентрация диатомей, а индексы разнообразия и выравненности достигают максимальных значений ($H=2,6-2,8$, $S=0,7$).

Содержание общего фосфора, реконструированное с помощью комбинированной базы данных по диатомовому комплексу поверхностного слоя донных отложений, было существенно завышено (35 мкг/дм^3) по сравнению с реальным ($8-10 \text{ мкг/дм}^3$). Содержание ТР, полученное на основе региональной трансферной функции (17 мкг/дм^3) больше соответствует реальным значениям. При сравнении данных содержания общего фосфора в воде и климатических параметров выявлены закономерности. Так, до середины XX века при повышении средней температуры периода с мая по октябрь и снижении годовой суммы осадков содержание фосфора в летней воде возрастало. С середины XX века наблюдается обратная закономерность. Содержание фосфора возрастает в многоводные периоды, которые обычно характеризуются снижением температуры.

Видовой состав диатомовых комплексов соответствует гидрохимическим параметрам оз. Яктыкуль. В связи с широкой экологической амплитудой основных доминантов диатомовых комплексов озера Яктыкуль очень сложно по видовому составу диатомей сделать вывод об изменениях озерной экосистемы. В то же время, отчетливо выявляется закономерность, отмеченная ранее для некоторых озер лесной зоны Южного Урала (Maslennikova et al., 2023). Также как для оз. Тургойак и оз. Сырыткуль, в верхней части колонки возрастает количество мелких циклических диатомовых водорослей и появляется *Stephanodiscus parvus*. Такие изменения могут быть связаны как с потеплением климата, так и с антропогенным воздействием. Возрастание содержания *Stephanodiscus parvus*, имеющего высокий ТР-оптимум, может быть связано с эвтрофированием водоема. В то же время, количество *Pantocsekiella comensis*, имеющей низкий ТР-оптимум, также возрастает. Это может объясняться тем, что мелкие циклические диатомовые водоросли получают преимущество в условиях увеличения продолжительности периода стратификации (Rühland et al., 2015).

Из-за изменений в термической структуре и сроках стратификации питательные вещества, высвобождаемые из отложений, в значительной степени ограничены гипolimнионом, а продуктивность фитопланктона поддерживается главным образом внешней нагрузкой (Radbourne et al., 2019). Этим можно объяснить изменение взаимосвязи концентрации общего фосфора с климатическими параметрами с середины XX века. Так, положительная корреляция ТР и количества осадков с середины XX века

может быть связана с возрастанием роли притока фосфора с водосбора. Это, в свою очередь, может объясняться как снижением поступления биогенных элементов из придонных вод в связи со стратификацией озера, так и с возрастанием содержания фосфора в водах, поступающих с антропогенно модифицированного водосбора. Подобная закономерность отмечалась ранее для озера Таватуй (Средний Урал) (Maslennikova, 2022). Значительное повышение разнообразия диатомовых водорослей с 1960-х может указывать на начало эвтрофирования водоема.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант No. 21-17-00071, <https://rscf.ru/project/21-17-00071/>).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Баринаева С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. – Тель-Авив: PiliesStudio, 2006. – 498 с.
2. Куликовский М.С., Глуценко А.М., Генкал С.И., Кузнецов И.В. Определитель диатомовых водорослей России. – Ярославль: Филигрань, 2016. – 803 с.
3. Погода и климат. <http://www.pogodaiklimat.ru/history/35121.htm> (дата обращения: 30.03.2023).
4. Чудаев Д.А., Гололобова М.А. Диатомовые водоросли озера Глубокого (Московская область). – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2016. – 447 с.
5. Bennion H. A diatom-phosphorus transfer function for shallow, eutrophic ponds in southeast England // *Hydrobiologia*. 1994. V. 275. P. 391–410. <https://doi.org/10.1007/BF00026729>.
6. Bennion H., Juggins S., Anderson N.J. Predicting epilimnetic phosphorus concentrations using an improved diatom-based transfer function and its application to lake eutrophication management // *Environmental Science and Technology*. 1996. V. 30. P. 2004–2007. <http://dx.doi.org/10.1021/es9508030>.
7. Lotter A.F. Subfossil and modern diatom plankton and the paleolimnology of Rotsee (Switzerland) since 1850. *Aquatic Science*. 1989. V. 51. P. 338–350. <https://doi.org/10.1007/BF00877176>.
8. Maslennikova A.V. Development and application of an electrical conductivity transfer function, using diatoms from lakes in the Urals, Russia // *Journal of Paleolimnology*. 2020. V.63. P. 129–146. <https://doi.org/10.1007/s10933-019-00106-z>
9. Maslennikova A.V. Holocene environments in the Middle Urals: Paleolimnological proxies from the Lake Tavatui (Russia) // *Quaternary International*. 2022. V.622. P. 51–64. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2022.02.033>.
10. Maslennikova A., Udachin V., Deryagin V., Artemyev D., Filippova K., Gulakov V., Udachin N., Aminov P. Sediment records of lake eutrophication and oligotrophication under the influence of human activity and climate warming in the Urals metallurgical region (Russia) // *Hydrobiologia*. 2023. V.850. P. 1669–1698 <https://doi.org/10.1007/s10750-023-05177-8>
11. Radbourne A.D., Elliott J.A., Maberly S.C., Ryves D.B., Anderson N.J. The impacts of changing nutrient load and climate on a deep, eutrophic, monomictic lake // *Freshwater Biology*. 2019. V. 64. P. 1–14. <https://doi.org/10.1111/fwb.13293>
12. Rühland K.M., Paterson A.M., Smol J.P. Lake diatom responses to warming: reviewing the evidence // *Journal of Paleolimnology*. 2015. V.54. P. 1–35. <https://doi.org/10.1007/s10933-015-9837-3>
13. Van Dam H., Mertens A., Sinkeldam J. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from The Netherlands // *Netherlands Journal of Aquatic Ecology*. 1994. V.28. P. 117–133. <https://doi.org/10.1007/BF02334251>
14. Wunsam S., Schmidt R. A diatom-phosphorus transfer function for Alpine and pre-alpine lakes // *Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiologia*. 1995. V.53. P. 85–99.

Обзор материалов изучения диатомовых в Пермском Прикамье и первые результаты диатомового анализа отложений озера Новожилово

Review of materials for the study of diatoms in the Permian Kama region and the first results of diatom analysis of Lake Novozhilovo sediments

Мехоношина Е.А.

Elizaveta A. Mekhonoshina

*Пермский государственный национальный исследовательский университет
(Пермь, Россия)*

elizamkh@psu.ru

В статье приводится обзор геологических и палеогеографических исследований, в которых получены материалы, основанные на диатомовом анализе. Часть этих исследований взята из базы данных палеоархивов позднего плейстоцена и голоцена Пермского Прикамья – PaleoPerm. Далее приводятся результаты первичного просмотра, полученных образцов оз. Новожилово (Камско-Кельтминская низменность, бассейн Верхней Камы), на наличие диатомовых. В ближайшее время будет проведено видовое определение створок диатомовых, их подсчет, визуализация полученных данных и их интерпретация.

Ключевые слова: диатомовый анализ; Камско-Кельтминская низменность; палеоархивы; Пермское Прикамье

The article provides an overview of geological and paleogeographic studies in which materials based on diatom analysis were obtained. Part of these studies is taken from the database of paleoarchives of the Late Pleistocene and Holocene of the Permian Kama region – PaleoPerm. The following are the results of the initial viewing of the obtained samples of the lake Novozhilovo (Kama-Keltma lowland, Upper Kama basin), for the presence of diatoms. In the near future, a species determination of diatom flaps, their counting, visualization of the data obtained and their interpretation will be carried out.

Keywords: diatom analysis; Kama-Keltma lowland; paleoarchives; Permian Kama region

Территория Пермского Прикамья характеризуется достаточно неравномерной палеогеографической изученностью. Большая часть палеоархивов сосредоточена в районе Верхней Камы (от Тюлькино до Гайн) – 43 объекта, ее притоки и заболоченные водораздельные пространства – 35, остров Дедюхинский и окрестности Чашкинских озер – 7; окрестности г. Перми – 5; Кунгурская лесостепь – 18; Седименты Камы от Усоля и до Чусового (исключая район г. Перми) – 8 (Мехоношина и др., 2022).

Первые сведения об ископаемой диатомовой флоре Прикамья были опубликованы И.А. Купцовой (Купцова, 1962; Вишневецкая и др., 1974), описавшей водоросли из омарского горизонта нижнего апшерона (N_{2apt}) (Лосева, 2000).

В базе данных палеоархивов Пермского Прикамья «PaleoPerm» есть несколько исследований, в которых присутствуют материалы диатомового анализа. Так в Стратиграфии четвертичных (антропогенных) отложений Урала (Яхимович и др., 1965) изучен комплекс пресноводных диатомовых водорослей, состоящий из 52 видов, в разрезе верхней Камы (Кротов и др., 1961).

В междуречье Еловки и Ларевки, немного севернее оз. Чусовское, и в двух разрезах долины р. Вишерки вблизи пос. Фадино описаны диатомовые комплексы с точки зрения видового состава и частоты встречаемости диатомей (Степанов, 1976).

Материалы по диатомовым голоцена представлены в исследованиях района междуречья Печоры и Колвы. Описан диатомовый комплекс суглинков разреза на р. Березовка, представленный современными пресноводными донными, планктонными формами и обрастателями (Степанов, 1976).

Методом диатомового анализа изучены образцы из обнажения высокой поймы, расположенного на левом берегу р. Камы вблизи пос. Тюлькино. Обнаружены пресноводные виды, зафиксирована их встречаемость (единично, редко, часто и очень часто), определены виды-доминанты. Также проведен экологический анализ, который показал, что диатомовая флора разреза представлена холодноводными стеногалинными формами, типичными для современных пресных водоемов, частично выдерживающих незначительное повышение концентрации растворенных солей (Бочарникова и др., 1961).

Первые результаты диатомового анализа колонки оз. Новожилово

Озеро Новожилово – одно из наиболее крупных озер Камско-Кельтминской низменности, которая является ключевым звеном для реконструкции позднеледниковых и голоценовых событий северо-востока Восточно-Европейской равнины (Назаров и др., 2020; Panin et. al., 2020).

Зимой 2023 года произведено измерение глубины лотом со льда оз. Новожилово (60°19'18" с. ш., 55°25'16" в. д.). Максимальная глубина – 3,7 м. Для выяснения литологии донных отложений ручным буром с полуцилиндрическим пробоотборником было пробурено 18 скважин по 2 поперечным профилям длиной 2940 м и 3435 м соответственно. С помощью поршневого бура Ливингстона извлечены 2 опорных керна (Копытов и др., 2023).

Донные отложения NZH-1: 300–670 см – ил/сапропель коричневатый, слабо консолидированный, с растительными остатками на глубине 450 см; 670–725 см – сапропель плотный, зеленовато-желтоватый, минерализованный; 725–810 см – ил серый (буровато-серый), минеральный, с единичными растительными остатками, по всему слою зерна тонкозернистого песка; к низу минерализация увеличивается, и он становится плотнее; на глубине 785 см – прослой сильно оторфованный (мощность 3 см); 810–820 см – песок тонкозернистый с прослоями торфа (до 2–3 см), с древесиной в торфе (Копытов и др., 2023).

Диатомовый анализ образцов проводился по методике (Battarbee, 1986). Для скважины NZH-1 было изучено 53 образца в диапазоне 320–820 см с интервалом 10 см.

На участке 300–670 см – створки диатомовых водорослей практически не встречаются. Только на глубинах 550 см, 570 см, 610 см и 670 см встречаются единичные.

Интервал 670–725 см – количество створок и их видовое разнообразие значительно увеличивается. За исключением глубины 700 см, где створки отсутствуют.

На следующем интервале 725–820 см, в котором прослеживается ритмичная слоистость, проявляющаяся в чередовании плотного минерального буровато-серого и темного оторфованного ила, торфа и светлых опесчаненных слоев (Копытов и др., 2023), во всех образцах присутствуют створки, причем ярко заметно увеличение количества к

глубине 780 см и постепенное уменьшение створок (встречаются единичные) до глубины 820 см.

В ближайшее время будет проведено видовое определение створок диатомовых, их подсчет, визуализация полученных данных и их интерпретация.

Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда № 22-77-00086, <https://rscf.ru/project/22-77-00086/>.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Бочарникова А.Д., Мартынова З.И., Полухина В.А. Леонова Е.А. Изучение спорово-пыльцевых комплексов, остракод, диатомовых водорослей и литологии характерных разрезов четвертичных отложений рек Тобол, Тогузак, Аят, Тура, Тавда, Ница, Исеть, Колва, Вишера, среднего течения р. Камы и верховьев р. Печора. – Свердловск: Уралгеология, 1961. – 220 с.
2. Вишневецкая Е.М., Джиноридае Р.Н., Купцова И.А. Диатомеи позднего плейстоцена и голоцена // Диатомовые водоросли СССР. Т. 1. – Ленинград: Наука, 1974. – С. 254–259.
3. Копытов С.В., Санников П.Ю., Мехоношина Е.А. Предварительные результаты палеолимнологических исследований на озере Новожилово (Камско-Кельтминская низменность, бассейн Верхней Камы) // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов = Modern problems of reservoirs and their catchments: труды IX Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. Участ. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2023. – С. 118–123.
4. Кротов А.И., Шибкова К.Г. Комплексы диатомовых и кремневых жгутиковых водорослей в верхнемеловых, палеогеновых и неогеновых отложениях восточного склона Урала и Зауралья. Матер, по геол. и полезн. исков. Урала. – М.: 1961. – С. 191–249.
5. Купцова И.А. Новый вид рода *Stephanodiscus* Ehr. из плиоценовых отложений Нижней Камы // Ботанические материалы Отдела споровых растений Бот. Ин-та АН СССР. 1962. Т. 15. С. 37–39.
6. Лосева Э.И. Плио-плейстоценовая диатомовая флора Северо-Востока Европы. 04.00.09. Автореферат диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук 2000. <https://earthpapers.net/plio-pleystotsenovaya-diatomovaya-flora-severo-vostoka-evropy-1>.
7. Мехоношина Е.А., Копытов С.В., Санников П.Ю., Шумиловских Л.С. База данных палеоархивов позднего плейстоцена и голоцена Пермского Прикамья – PaleoPerm // Антропогенная трансформация природной среды. 2022 Т. 8, № 1. С. 58–77. DOI: <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2022-1-58-77>.
8. Назаров Н.Н., Копытов С.В., Жуйкова И.А., Чернов А.В. Плейстоценовые каналы стока в южной части Кельтминской ложбины (Камско-Вычегодское междуречье) // Геоморфология. 2020. № 4. С. 74–88.
9. Степанов А.Н. Плиоцен(?)–плейстоценовые отложения междуречья Печоры и Колвы // Вопросы стратиграфии и корреляции плиоценовых отложений северных и южных частей Предуралья. – БФАН СССР, Уфа, 1976. – С. 62–83.
10. Стратиграфия четвертичных (антропогеновых) отложений Урала // В.Л. Яхимович, В.А. Лидер (ред.). – М.: Недра, 1965. – 250 с.
11. Battarbee R.W. Diatom analysis. In Handbook of Holocene Paleocology and Paleohydrology (Ed. Berglund, B.). – Wiley & Sons, Chichester, 1986. – P. 527–570.
12. Panin A.V., Astakhov V.I., Lotsari E., Komatsu G., Lang J., Winsemann J. Middle and Late Quaternary glacial lake-outburst floods, drainage diversions and reorganization of fluvial systems in northwestern Eurasia // Earth-Science Reviews. 2020. V. 01. 103069.

**Диатомовые водоросли и геохимические особенности донных
осадков морей Восточной Сибири
и их значение для палеореконструкций**

**Diatoms and geochemical features of bottom sediments of the
Eastern Siberia seas and their implication for
paleoreconstructions**

Обрезкова М.С., Цой И.Б., Астахов А.С.

Maria S. Obrezkova, Ira B. Tsoy, Anatolii S. Astakhov

*Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичева – ТОИ ДВО РАН
(Владивосток, Россия)*

obrezkova@poi.dvo.ru

Изучение диатомей в поверхностных осадках морей Восточной Сибири (МВС) показало, что с конца прошлого века произошли значительные изменения в составе видов и их количестве в диатомовых комплексах этого региона. Перспективным направлением в реконструкции изменений природной среды в голоцене является изучение диатомовых водорослей и геохимических параметров вмещающих осадков, что позволяет получать более содержательную и объективную информацию о палеоусловиях и процессах осадкообразования в МВС в голоцене и других регионах.

Ключевые слова: диатомеи; донные осадки; геохимия; трансферные функции; голоцен; море Лаптевых; Восточно-Сибирское море; Чукотское море

The study of diatoms in the surface sediments of the seas of Eastern Siberia (SES) has shown that since the end of the last century there have been significant changes in the composition of species and their number in the diatom assemblages of this region. A promising direction in the reconstruction of changes in the natural environment in the Holocene is the study of diatoms and geochemical parameters of the host sediments, which allows us to obtain more meaningful and objective information about the paleoconditions and processes of sedimentation in the SES and other regions.

Keywords: diatoms, sediments, geochemistry, transfer functions, Holocene; Laptev Sea, East-Siberia Sea, Chukchi Sea

Широкомасштабные и быстрые изменения климата последних десятилетий привели к значительным изменениям среднегодовой температуры воздуха, таянию вечной мерзлоты и резкому уменьшению площади ледяного покрова в Арктике (Третий ..., 2022). Эти процессы находят отражение в изменении характеристик поверхностных вод морей и океанов, а также в особенностях осадкообразования в бассейнах. Изучение донных осадков морских бассейнов важно для понимания современных процессов осадкообразования и изменениях природной среды в геологическом прошлом. Анализ распределения диатомовых водорослей в донных осадках морей Восточной Сибири (МВС) позволяет оценить их связь с водными массами и их характеристиками, такими

как температура, гидрохимические условия поверхностных вод, течения, формирование и дрейф морских льдов, продуктивность морских вод и другие факторы. Изучение геохимии осадков этих морей дает возможность определить источники осадков, реконструировать изменения климата и ледовых условий (Astakhov et al., 2019, 2020, 2023 (в печати); Sattarova et al., 2023; и др.). Расшифровка происхождения осадочного материала в Арктике может способствовать более глубокому пониманию современных процессов переноса и седиментации. Особенно перспективно использование редкоземельных элементов (РЗЭ), поскольку они могут служить индикаторами источников, а также химических и физических условий и процессов (Sattarova et al., 2023).

Наше исследование диатомей было мотивировано значительным потеплением в Арктике в последние десятилетия и влиянием этого потепления на диатомовые водоросли, которые являются основными продуцентами в МВС. С этой целью мы изучили состав и концентрации диатомей в поверхностных осадках МВС и Северного Ледовитого океана (СЛО), отобранных в морских экспедициях ТОИ ДВО РАН в начале 21 века. Установлено, что по сравнению с концом прошлого века произошли значительные изменения в видовом составе и количественном соотношении видов в комплексах диатомей осадков моря Лаптевых, Восточно-Сибирского моря и СЛО, в то время как в Чукотском море существенных изменений в комплексах диатомей не наблюдалось (Obrezkova et al., 2023). Изменения в диатомовых комплексах связаны со значительными изменениями температуры воды, речного стока, солёности, таянием льда и длительными периодами отсутствия льда, связанными с глобальным потеплением в Северном полушарии в последние десятилетия. Изучение количественного распределения диатомей в этих осадках показало, что концентрация диатомей растёт с запада на восток, как это отмечалось и ранее (Полякова, 1997; Обрезкова и др., 2014; Цой, Обрезкова, 2017; Obrezkova et al., 2023). Высокое содержание диатомей в осадках восточной части МВС подтверждается высоким содержанием кадмия в этих осадках, который накапливается в диатомовых водорослях (Sattarova et al., 2021).

Основное направление наших работ последних лет связано с комплексным микропалеонтологическим и геохимическим исследованием голоценовых осадков МВС для палеореконокструкций. В частности, мы провели сопоставление данных диатомового анализа с реконструкциями продолжительности безледного периода (IF₁₀) и аномалиями среднегодовой температуры воздуха (ΔT_{10}) за последние столетия и тысячелетия, полученные методом «трансферных функций» (Astakhov et al., 2019; 2022; 2023 (в печати)). Трансферные функции были разработаны при сопоставлении временных рядов химического состава донных осадков, накопившихся за период наблюдений, с гидрометеорологическими данными.

Использование метода трансферных функций, основанного на данных о геохимических временных рядах накопления донных отложений (Astakhov et al., 2023), позволило впервые реконструировать ледовые условия и климат Восточно-Сибирского моря в голоцене. Была выявлена синхронная периодичность изменений ледяного покрова и температуры воздуха, которые сопоставимы с климатическими циклами Бонда. Эти результаты указывают на взаимосвязь атлантических процессов, климата Восточно-Сибирского моря и преобладания циклонического типа атмосферной циркуляции в голоцене.

В море Лаптевых, на примере керна LV83-32 (Astakhov et al., 2023 (в печати)), отобранного в палеодолине р. Яна, голоценовые отложения по составу и вариациям диатомовых комплексов, гранулометрическому составу, солёности и другим параметрам подобны комплексу отложений послеледниковой трансгрессии, хорошо изученному на шельфе моря Лаптевых (Polyakova et al., 2009; Taldenkova et al., 2010). По изменениям комплексов диатомовых водорослей, $\delta^{13}\text{C}_{\text{ТОС}}$ и вариациям солёности, выраженным индексом Br/ТОС было установлено, что на приустьевом шельфе рек Лена и Яна

голоценовые отложения накапливались при последовательной смене континентальных условий прибрежно-морскими и шельфовыми в ходе послеледниковой трансгрессии с соответствующим увеличением солености вод (Вт/ТОС) и сменой экологических комплексов диатомей. Максимально быстрая смена условий и скоростей осадконакопления была 8,8–7,4 ка, когда континентальные условия сменялись собственно шельфовыми и осадконакопление происходило в зоне смешения морских и пресных вод реки Яна. Условия, близкие к современным, судя по стабилизации солености, диатомовых комплексов, гранулометрического состава осадков, установились около 6,0 тыс. лет назад.

Таким образом, установлено, что за последние десятилетия произошли значительные изменения в составе диатомовых комплексов в осадках моря Лаптевых, Восточно-Сибирского моря и СЛЮ, связанные с глобальным потеплением в Северном полушарии. Изучение диатомовых водорослей совместно с геохимическими параметрами позволяет получать более содержательную и объективную информацию о палеоусловиях и процессах осадкообразования в морях Восточной Сибири в голоцене, что может быть полезно и для изучения других регионов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 21-17-00081 и в рамках госзадания ТОИ ДВО РАН (№ 121021700342-9).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Обрезкова М.С., Колесник А.Н., Семилетов И.П. Особенности распределения диатомей в поверхностных осадках морей Восточной Арктики России (на основе кластерного анализа) // Биология моря. 2014. Т.40, №6. С. 473–480.
2. Полякова Е.И. Арктические моря Евразии в позднем кайнозое. – М.: Научный мир, 1997. – 146 с.
3. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме / Росгидромет. – Санкт-Петербург: Научное издание технологий, 2022. – 124 с.
4. Цой И.Б., Обрезкова М.С. Атлас диатомовых водорослей голоценовых осадков морей восточной Арктики России. – Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2017. – 146 с.
5. Astakhov A., Xuefa Shi, Darin A., Kalugin I., Limin Hu, Tsoy I., Babich V., Kolesnik A., Obrezkova M., Alatorsev A., Plotnikov V. Reconstructing ice conditions in the southern Chukchi Sea during the last millennium based on chemical composition of sediments and diatom assemblages // Marine Geology. 2020. V.427. P. 106220. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2020.106220>
6. Astakhov A.S., Bosin A.A., Liu Y.G., Darin A.V., Kalugin I.A., Artemova A.V., Babich V.V., Melgunov M.S., Vasilenko Yu.P., Vologina E.G. Reconstruction of ice conditions in the northern Chukchi Sea during recent centuries: Geochemical proxy compared with observed data // Quaternary International. 2019. V. 522. P. 23–37 DOI:10.1016/j.quaint.2019.05.009
7. Astakhov A.S., Babich V.V., Shi-X., Hu L., Obrezkova M.S., Aksentov K.I., Alatorsev A.N., Darin A.V., Kalugin I.A., Karnaukh V.N., Melgunov M.S. Climate and Ice conditions of the East Siberian Sea during Holocene: reconstructions on sedimentary geochemical multiproxy // Holocene. 2022. V.33, Iss.1. P. 3–13. <https://doi.org/10.1177/09596836221126049>
8. Astakhov A.S., Obrezkova M.S., Babich V.V., Shi X., Hu L., Kuzmin Y.V., Tsoy I.B., Alatorsev A.V., Mariash A.A., Aksentov K.I., Lopatnikov E.A. Sea ice and Holocene paleoenvironments of the Arctic shelf (Laptev Sea) strongly influenced by freshwater runoff: reconstructions based on sediment geochemistry and diatoms // Holocene (в печати)
9. Cremer H. Distribution patterns of diatom surface sediment assemblages in the Laptev Sea (Arctic Ocean) // Marine Micropaleontology. 1999. V.38. P. 39–67.
10. Obrezkova M.S., Tsoy I.B., Kolyada A.E., Shi X., Liu Y. Distribution of Diatoms in the Surface Sediments of the Seas of Eastern Siberia and the Arctic Ocean Distribution of diatoms in seafloor surface sediments of the Laptev, East Siberian, and Chukchi seas: implication for environmental reconstructions // Polar Biology. 2023. V.46. P. 21–34. <https://doi.org/10.1007/s00300-022-03105-5>
11. Polyakova Ye.I., Klyuvitkina T.S., Novichkova E.A., Bauch H.A., Kassens H. Changes in the Lena River Runoff during the Holocene // Water Resources. 2009. V.36, №3. P. 273–283.

12. *Sattarova V.V., Aksentov K.I., Ivanov M.V., Alatortsev A.V., Kim D.V., Obrezkova M.S.* Distribution and assessment of trace metals in modern bottom sediments in the southwestern Chukchi Sea // *Marine Pollution Bulletin*. 2022. V.180. 113797. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113797>

13. *Sattarova V., Aksentov K., Astakhov A., Shi X., Hu L., Alatortsev A., Mariash A., Yaroshchuk E.* Trace metals in surface sediments from the Laptev and East Siberian Seas: Levels, enrichment, contamination assessment, and sources // *Marine Pollution Bulletin*. 2021. V.173, Part A. P. 112997. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112997>

14. *Sattarova V., Astakhov A., Aksentov K., Shi X., Hu L., Liu Y., Polyakov D., Alatortsev A., Kolesnik O.* Geochemistry of the Laptev and East Siberian seas sediments with emphasis on rare-earth elements: Application for sediment sources and paleoceanography // *Continental Shelf Research*. 2023. V.254. P. 104907. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2022.104907>.

15. *Taldenkova E., Bauch H.A., Gottschalk J., Nikolaev S., Rostovtseva Y., Pogodina I., Ovsepyan Y., Kandiano E.* History of ice-rafting and water mass evolution at the northern Siberian continental margin (Laptev Sea) during Late Glacial and Holocene times // *Quaternary Science Reviews*. 2010. V.29, Iss.27–28. P. 3919–3935. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.09.013>.

**Диатомовые в отложениях термокарстовых озер в Ямало-
Ненецком автономном округе,
Западно-Сибирская Арктика, Россия**

**Diatoms in deposits of termocarstic lakes in Yamalo-Nenets
Autonomous Okrug, West Siberian Arctic, Russia**

Палагушкина О.В., Фролова Л.А.

Olga V. Palagushkina, Larisa A. Frolova

Казанский Приволжский федеральный университет (Казань, Россия)

opalagushkina@mail.ru

Из донных отложений трех термокарстовых озер на водоразделе р. Пур (Ямало-Ненецкий автономный округ – ЯНАО, Западно-Сибирская Арктика, Российская Федерация) было выявлено 114 видов диатомовых водорослей двух классов тридцати трех родов. В видовом составе преобладали пенатные космополитные бентосные олигогалобные виды, предпочитающие щелочные условия среды.

Ключевые слова: диатомовые водоросли; озера; донные отложения; Ямало-Ненецкий автономный округ; Западно-Сибирская Арктика

114 species of diatoms of two classes of thirty-three genera were identified from bottom sediments of three thermokarst lakes on the watershed of the river Pur (Yamalo-Nenets Autonomous Okrug - YNAO, West Siberian Arctic, Russian Federation). The species composition was dominated by penate cosmopolitan benthic oligohalobic species preferring alkaline environmental conditions.

Keywords: diatoms; lakes; bottom sediments; Yamalo-Nenets Autonomous Okrug; West Siberian Arctic

Чувствительность арктических экосистем к колебаниям температуры делает их особенно важными для изучения прошлых и настоящих экологических изменений, связанных с климатом (Douglas et al., 1994, John P. Smol et al., 2005, Nazarova et al., 2013; Нигаматзянова. и др., 2016, Фролова, 2018; , Палагушкина и др., 2019). Водоросли, в том числе и диатомовые, водоемов Западной Сибири в целом изучены недостаточно.

Целенаправленное изучение водорослей водоемов полуострова Ямал в Ямало-Ненецком автономном округе началось только в последние два десятилетия в связи с интенсивным промышленным освоением в связи с необходимостью оценки состояния водных экосистем. Видовой состав водорослей, в том числе диатомовых, представлен в немногочисленных публикациях на основе световой микроскопии (Генкал и др., 2018). Также в литературе имеются сведения о диатомовых водорослях Явайского полуострова (Киселев и др., 2015), по изучению некоторых рек Западной Сибири, например, Надым, Харасавэй (Генкал и др., 2018, Семенова, 2019). Целью нашей работы было изучение таксономического состава и экологических характеристик диатомовых водорослей в

отложениях термокарстовых озер водосборного бассейна р. Пур (Ямало-Ненецкий автономный округ, Западно-Сибирская Арктика).

Река Пур, одна из крупнейших на севере Западной Сибири, с площадью водосбора 112 000 км², образуется при слиянии рек Айваседапур и Пяку-Пур, берущих начало на северных склонах Сибирского Увала. Она течет с юга на север и впадает в Тазовскую губу. В пределах исследуемой территории Пур имеет широкую долину протяженностью 15 км (Карманова, 2012).

На состав вод тундровых и лесотундровых рек влияет многолетняя мерзлота. Река Пур характеризуется низкой минерализацией во все фазы водного режима. По классификации О.А. Алекина, воды реки относятся к маломинерализованным, гидрокарбонатного класса, натриевой группы (Уварова, 2010, 2012).

Это согласуется с основной особенностью природных поверхностных вод Ямало-Ненецкого автономного округа; гидрохимически они характеризуются слабой минерализацией (менее 100 мг/дм³), с минимальными значениями в период весеннего половодья. В целом поверхностные воды Западно-Сибирской Арктики относятся к классу ультрапресных, гидрокарбонатных, натриевой, реже кальциевой группы с низким содержанием сульфатов, хлоридов и ионов натрия. По содержанию биогенных элементов поверхностные воды олиготрофные, с низким содержанием соединений азота, с низкой жесткостью (0,1–0,34 ммоль/дм³), т. е. «очень мягкие» (Генкал и др., 2017).

Характерной особенностью большинства водных экосистем водосборных бассейнов рек Ямало-Ненецкого округа является наличие небольших по размерам и площади (менее 1 км²), мелких, промерзающих до дна термокарстовых озер. Эти термокарстовые озера в подавляющем большинстве представляют собой котловины блюдцеобразной формы с низкими заболоченными берегами (Уварова, 2010).

В таких условиях образуются озера с водой малой минерализации, гидрокарбонатного класса, со значительным количеством органического вещества. Активная реакция воды в них слабокислая, близкая к нейтральной (рН 5,2–7,6). Сумма ионов колеблется от 16 до 80 мг/дм³ в течение года и лишь в отдельные годы в период зимней межени достигает 200 мг/дм³. (Генкал и др., 2017).

Летом 2017 г. на трех малых мелководных термокарстовых озерах (У17-01, Лебединое и Н-3) водосбора р. Пур с помощью пробоотборника UWITEC были отобраны колонки донных осадков толщиной до 50 см. Донные осадки были представлены песчаным материалом с растительным детритом.

Техническая обработка образцов донных отложений на диатомовый анализ проводилась с использованием метода водяной бани. Для изготовления постоянных препаратов использовалась высокопреломляющая смола Naphrax. При определении видового состава использовались отечественные и зарубежные определители. Подсчет створок проводился по параллельным трансектам до 300 в образце с использованием светового микроскопа AxioPlan Zeiss и иммерсионной среды. Общее число створок бралось за 100%. Эколого-географическая характеристика диатомовых давалась по отношению к местообитанию, солености, рН воды, по географическому распространению, температурной приуроченности и реофильности (Давыдова, 1995; Баринаова и др., 2006). Степень сходства видового состава рассчитывалась по индексу Серенсена.

Всего в донных осадках трех термокарстовых озер было определено 114 таксонов диатомовых водорослей, принадлежащих 33 родам, число видов по озерам менялось от 56 (озеро У17-01) до 75 (озеро Н-3). Диатомовые донных осадков были представлены, в основном, космополитными бентосными видами, по отношению к солености воды преобладали индифференты, по отношению к рН – была больше доля видов, предпочитающих щелочные условия, в отношении фактора течения воды большей была

доля индифферентных видов, в отношении температурного фактора – больше всего было видов умеренных температурных условий.

Индекс видового сходства между озерами менялся от 49 до 71 (между Лебединым и Y17-01). В видовом составе преобладали пенатные водоросли, центрические были представлены незначительно. Во всех тех озерах встречались *Achnantheidium minutissimum* (Kützing) Czarnecki., *Aulacoseira islandica* (O. Müll.) Simons., *A. subarctica* (O. Müll.) Haworth, *Cymbella silesiaca* Bleisch in Rabenh., *Ellerbeckia arenaria* (Ralfs ex Moore) Crawf., *Eunotia bilunaris* (Ehrb.) Grun., *E. faba* var. *faba* (Ehrb.) Grun., *E. pectinalis* (Dillw.) Rabenh., *E. subarcuatoidea* Alles, Norpel et Lange-Bert., *Fragilaria capucina* Desm., *F. construens* (Ehrb.) Hust. var. *construens*, *Staurosirella pinnata* (Ehrenberg) D.M. Williams & Round., *Frustulia rhomboides* (Ehrb.) De Toni, *Gomphonema truncatum* Ehrb. sensu Patrick et Reim. var. *truncatum*, *Navicula cryptocephala* Kütz.

Вид *Tetracyclus glans* (Ehrb.) Mills, свойственный водоемам Ямало-Ненецкого округа, встречался в донных осадках только двух озер – 17 Y-01 и Лебединое.

Преыдушие исследования диатомовых водоемов и водотоков на севере Западно-Сибирской Арктики показали, что таксономическое богатство (до 95%) формируют представители класса Пенатные. Ведущими родами по количеству таксонов были – *Navicula*, *Nitzschia*, *Pinnularia*, *Eunotia*, *Gomphonema*, *Fragilaria*, *Achnanthes*, *Neidium*, *Gyrosigma*. (Генкал и др., 2018). Преобладание в видовом составе бентосных космополитных диатомей Pennatorphuseae характерно для современных донных отложений арктических мелководных водоемов. Разнообразие видов из родов *Eunotia* связано с низкими значениями минерализации для водоемов изучаемой территории (Палагушкина и др., 2012). Центрические диатомеи были представлены беднее; встречались виды родов *Aulacoseira*, *Cyclotella*, *Thalassiosira*. В летнем фитопланктоне водоемов бассейна р. Надым наиболее типичны *A. subarctica* (O. Müll.) Haworth, *A. italica* var. *tenuissima* (Grunow) (O. Müll.) и *A. granulata* (Ehrenberg) Simonsen (Киселев и др., 2015, Семенова, 2019, Палагушкина и др., 2020, 2022). Полученные нами результаты подтверждают выявленные ранее тенденции.

Работа поддержана субсидией, выделенной Казанскому федеральному университету по государственному заданию FZSM-2023-0023 в сфере научной деятельности, а также Программой стратегического академического лидерства Казанского федерального университета.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Барина С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. Биоразнообразие водорослей-индикаторы окружающей среды. – PiliesStudio, Тель Авив, 2006. – 498 стр.
2. Генкал С.И., Ярушина М.И. Интересные находки диатомовых водорослей и новый вид *Fragilaria strelnikovae* из водоемов и водотоков полуострова Ямал // Новости сист. низш. раст. 2017. V.51. P. 12–22. <https://doi.org/10.31111/nsnr/2017.51.12>
3. Генкал С.И., Ярушина М.И. Диатомовые водоросли малоизученных водных экосистем крайнего севера западной Сибири – М.: Научный мир, 2017. – 212 с.
4. Давыдова Н.Н. Диатомовые водоросли – индикаторы при- родных условий водоемов в голоцене. – Л.: Наука, 1985. – 244 с.
5. Карманова К.И. Расчет русловых деформаций рек в зоне лесотундры на берегу р. Пур // Материалы Восьмой Всероссийской научно-технической конференции (посвященной 100-летию со дня рождения Виктора Ивановича Муравленко). Т.2. – Тюмень, Издательство Тюменского индустриального университета, 2012. – С. 151–155.
6. Киселев Г.А., Балашова Н.Б. Диатомеи полуострова Явай (Ямало-Ненецкий автономный округ) // Вопросы современной альгологии. 2015. №3 (10), <http://algology.ru/786>.

7. Семенова Л.А. Диатомовые водоросли реки Надым (Западная Сибирь) // Вопросы современной альгологии. 2019. №2 (20). С. 135–137. URL: <http://algology.ru/1512>. DOI – [https://doi.org/10.33624/2311-0147-2019-2\(20\)-135-137](https://doi.org/10.33624/2311-0147-2019-2(20)-135-137)
8. Уварова В.И. Оценка химического состава воды и донных отложений р. Надым // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. 2010. Вып.11. С. 143–153.
9. Уварова В.И. Оценка качества воды реки Пур // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. 2012. № 12. С. 143–149.
10. Douglas M.S.V., Smol J.P., Blake W. Marked post-18th century environmental change in high Arctic ecosystems // Science. 1994. 266. P. 416–419. <https://doi.org/10.1126/science.266.5184.416>
11. Frolova L.A. Cladocera from bottom deposits as an indicator of changes in climate and ecological conditions // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. 107(1). 012084. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/107/1/012084>
12. Nazarova L., Lüpfert H., Subetto D., Pestryakova L., Diekmann B. Holocene climate conditions in Central Yakutia (North-Eastern Siberia) inferred from sediment composition and fossil chironomids of Lake Temje // Quaternary International. 2013. 290–291. P. 264–274. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.11.006>
13. Nigamatzyanova G.R., Frolova L.A., Abramova E.N. Zooplankton spatial distribution in thermokarst lake of The Lena River Delta (Republic of Sakha (Yakutia)) // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2016. 7(5). P. 1288–1297.
14. Palagushkina O.V., Frolova L.A. Diatoms from modern lake sediments of the Lake Lebedinoe (Yamalo-Nenets Autonomous District, West Siberian Arctic, Russia) PROCEEDINGS of 4 th Kazan Golovkinsky Stratigraphic Meeting 2020 Sedimentary Earth Systems: Stratigraphy, Geochronology, Petroleum Resources (Kazan, Russian Federation, 26–30 October 2020). – P. 185–189.
15. Palagushkina O.V., Frolova L.A. Diatoms from Modern Lake Sediments of Lake Lebedinoe (Yamalo-Nenets Autonomous District, West Siberian Arctic, Russia). PANGAEA, 2022. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.942411>
16. Palagushkina O.V., Nazarova L.B., Wetterich S., Shirrmaister L. Diatoms of modern bottom sediments in Siberian Arctic // Contemporary Problems of Ecology. 2012. 5(4). P. 413–422. <https://doi.org/10.1134/S1995425512040105>
17. Palagushkina O., Nazarova L., Frolova L. Trends in development of diatom flora from sub-recent lake sediments of the Lake Bolshoy Kharbey (Bolshezemelskaya tundra, Russia) // Biological Communications. 2019. 64(4). С. 244–251. <https://doi.org/10.21638/spbu03.2019.403>
18. Smol J.P., Wolfe A.P., Birks H.J.B., Douglas M.S.V., Jones V.J., Korhola A., Pienitz R., Rühland K., Sorvari S., Antoniades D., Brooks S.J., Fallu M.-A., Hughes M., Keatley B.E., Laing T.E., Michelutti N., Nazarova L., Nyman M., Paterson A.M., Perren B., Quinlan R., Rautio M., Saulnier-Talbot É., Siitonen S., Solovieva N., Weckström J. Climate-driven regime shifts in the biological communities of arctic lakes // Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS). 2005. 102(12). P. 4397–4402.

Кремнистые микроводоросли в поверхностных осадках Шантарского района Охотского моря

Siliceous microalgae in the surface sediments of the Shantar region of Sea of Okhotsk

Прушковская И.А., Цой И.Б.

Irina A. Prushkovskaya, Ira B. Tsoy

Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичева – ТОИ ДВО РАН
(Владивосток, Россия)

prushkovskaya@poi.dvo.ru

В поверхностных осадках Шантарского района Охотского моря обнаружена богатая диатомовая флора (187 видов и внутривидовых таксонов), представленная преимущественно морскими и солоноватоводными видами. В осадках доминирует бенто-планктонный вид *Paralia sulcata* (до 88,6%), характерный для песчаных осадков, активного гидродинамического режима, распресненных прибрежных вод изученного региона. Максимальная концентрация диатомей (5,8 млн створок/г) отмечена в илах Ульбанского залива, что связано с высоким содержанием биогенных веществ в поверхностных и придонных водах этого района. Силикофлагеллаты представлены единичными *Octactis speculum* и *Stephanocha speculum* var. *minuta*.

Ключевые слова: диатомеи; силикофлагеллаты; поверхностные осадки; Шантарский район; Охотское море

In the surface sediments of the Shantar Region of the Okhotsk Sea revealed a rich diatom flora (187 species and intraspecific taxa), represented mostly by marine and brackish water species. The sediments are dominated by the benthic-planktonic species *Paralia sulcata* (up to 88,6%), characteristic of sandy sediments, active hydrodynamic regime, desalinated coastal waters of the studied region. The maximum concentration of diatoms (5,8 mln valves/g) was noted in the silts of the Ulban Bay, which is due to the high content of nutrients in the surface and bottom waters of this area. Silicoflagellates are represented by single *Octactis speculum* and *Stephanocha speculum* var. *minuta*.

Keywords: diatoms; silicoflagellates; surface sediments; Shantar Region; Sea of Okhotsk

В северо-западной части Охотского моря расположена акватория Шантарского архипелага, включающая три крупных залива, одним из которых является залив Академии. Он включает внутренние мелководные заливы – Николая, Константина и Ульбанский. Климат Шантарского района муссонно-континентальный, с суровой зимой и относительно теплым летом (Петров и др., 2000). Современные осадки зал. Академии и Ульбанского залива – терригенные, представлены преимущественно алевролитами и мелкозернистыми песками с включениями гальки разного размера; в зал. Константина преобладают крупная и средняя галька (Астахов, 1986). В Ульбанский залив впадает несколько рек, самые крупные из которых р. Сыран и р. Ульбан. В этом заливе относительно низкий объем водного и твердого стоков сочетается с достаточно высоким

потоком фосфора в минеральной и органической формах (Семкин и др., 2022). Акватория Шантарского архипелага относится к области высокой динамической активности и известна важной ролью по миграции гренландских китов, особенно залива Академии в качестве места их нагула в летнее-осенний сезон (Тищенко и др., 2022).

Данные по изучению диатомовых водорослей в зал. Академии практически отсутствуют. Ранее изучение диатомей проводились из верхнеплейстоцен-голоценовых отложений зал. Николая и прибрежной равнины Усалгинской депрессии (Пушкарь, 1979); в торфяниках о-ва Большой Шантар (Разжигаева и др., 2021; Razjigaeva et al., 2022). Известны также немногочисленные данные по диатомеям фитопланктона и поверхностных осадков расположенного рядом Сахалинского залива (Киселев, 1931; Смирнова, 1959; Жузе, 1962; Орлова и др., 2004; Обрезкова, 2009). Цель работы – изучение диатомовых водорослей в поверхностных осадках зал. Академии для оценки их роли в продуктивности вод этого региона. Для этого был изучен видовой состав и концентрация их в осадках, которая косвенно отражает продуктивность вод.

В работе были исследованы 44 образца поверхностных осадков залива Академии, полученные в 71-ом рейсе НИС «Профессор Гагаринский» (2016 г.) и в 59-ом рейсе НИС «Академик Опарин» (2020 г.) (Тищенко и др., 2018, 2022). Образцы отбирались дночерпателем Ван Вина. Осадки представлены преимущественно илами, илистыми песками, часто с галькой, иногда с гравием и ракушей. Глубины отбора образцов от 2,1 м в устье реки Сыран до 42,5 м в центральной части залива Академии. Также отбор образцов проводился в прибрежной отмели приливной зоны, осушающейся во время отливов (ватты). Для выделения диатомей из осадков использовали стандартную методику (Жузе и др., 1974).

Диатомовая флора поверхностных осадков зал. Академия представлена 187 видами и внутривидовыми таксонами, принадлежащими к 83 родам (Цой, Прушковская, 2023). Диатомовые комплексы были довольно однородны и характеризовались доминированием морского и солоноватоводного бенто-планктонного вида *Paralia sulcata* (70,1%), а также видами *Actinoptychus senarius* (6,2%), *Thalassiosira simonsenii* (7,0%), *Thalassionema nitzschioides* (2,6%) и *Navicula peregrina* (2,1%). В диатомовой флоре по количеству видов преобладали морские (74 вида), а по численности – солоноватоводные (82,3%). Несмотря на заметное видовое разнообразие пресноводных диатомей (37 видов), их содержание в диатомовой флоре было незначительным (0,2%) из-за спорадической встречаемости. Среди морских, солоноватоводных и эвригалинных диатомей резко преобладали бенто-планктонные виды (78,1%). Количество планктонных диатомей составляло 15,5%, бентосных – 6,1%. Доминирующий вид в поверхностных осадках залива Академии *Paralia sulcata* (34–88.6%) обладает широкой фенотипической изменчивостью, что связано с ее способностью обитать в широком диапазоне солености, температуры, освещенности, концентрации питательных веществ, а также на его продуктивность влияет и гидродинамика (Пушкарь, Черепанова, 2008). *Paralia sulcata* характеризуется как бентосный вид, является обитателем песчаного дна, но часто встречается в морском прибрежном планктоне шельфовых зон, что связано со слабой связью диатомей с субстратом, в результате чего она легко может быть оторвана от дна при незначительной гидродинамической активности. Отметим, что *Paralia sulcata* обладает грубым, сильноокремненным панцирем, хорошо сохраняющимся в осадках.

Максимальная концентрация диатомей (5,8 млн створок/г) отмечена в илах Ульбанского залива. Значительные концентрации диатомей в этом заливе связаны с высоким содержанием биогенных веществ (нитраты, фосфор, аммоний и кремний) в поверхностных и придонных водах этих районов, стимулирующих биопродуктивность вод (Тищенко и др., 2022). Предполагается, что источником этих веществ служат фекалии млекопитающих – косаток, белух и лахтаков, которые питаются пришедшими на нерест лососями. При этом величина первичной продукции (ПП) в этом заливе

соответствует уровню ПП таких шельфовых областей, как восточный шельф о-ва Сахалина (Тищенко и др., 2023). Однако, относительно низкое содержание диатомей в осадках зал. Академии (в среднем, 2,9 млн створок/г), по сравнению в высокопродуктивным северным шельфом Охотского моря, где в осадках наблюдается до 15,3 млн створок/г (Цой и др., 2009), вероятно, связано с активным гидродинамическим режимом и литологическим составом осадков.

Кроме диатомовых водорослей, в поверхностных осадках зал. Академии были обнаружены единичные скелеты силикофлагеллат – *Octactis speculum* и *Stephanocha speculum* var. *minuta*. Оба вида характерны для холодных водных масс (Takahashi, Blackwelder, 1992; Barron et al., 2016) и богатых нутриентами вод в регионах с прибрежным апвеллингом (Barron et al., 2016). Находки *O. speculum* в осадках кутовой части Ульбанского залива подтверждают, что он может обитать в опресненных морских водах (Глезер, 1966).

В результате исследований обнаружена богатая диатомовая флора (187 видов и внутривидовых таксонов), представлена преимущественно морскими и солоноватоводными видами. Доминирование в осадках эврибионтного вида *Paralia sulcata* указывает на комфортные условия обитания – песчанистые осадки, активный гидродинамический режим, низкий речной сток и распресненность прибрежных вод и хорошую сохранность.

Работа выполнена в рамках госзадания ТОИ ДВО РАН (№121021700342-9).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Астахов А.С. Позднечетвертичное осадконакопление на шельфе Охотского моря. – Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1986. – 140 с.
2. Глезер З.И. Кремневые жгутиковые водоросли (силикофлагеллаты) // Флора споровых растений СССР. – М.-Л.: Наука, 1966. – Т. 7. – 332 с.
3. Жузе А.П. Стратиграфические и палеогеографические исследования в северо-западной части Тихого океана. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 260 с.
4. Жузе А.П., Прошкина-Лавренко А.И., Шешукова-Порецкая В.С. Методика исследования // Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). – Л.: Наука, 1974. – Т. 1. – С. 50–79.
5. Киселев И.А. Состав и распределение фитопланктона в Амурском лимане // Исследование морей СССР, 1931. Вып. 14. С. 31–116.
6. Обрезкова М.С. Диатомей поверхностных осадков Амурского лимана и прилегающих акваторий (Японское и Охотское моря) // Биология моря. 2009. Т.35, №2. С. 138–150. <https://doi.org/10.1134/S1063074009020059>
7. Орлова Т.Ю., Селина М.С., Стоник И.В. Видовой состав микроводорослей планктона Охотоморского побережья острова Сахалин // Биология моря. 2004. Т.30, №2. С. 96–104.
8. Петров Е.С., Новоноцкий П.В., Ленишин В.Т. Климат Хабаровского края и Еврейской автономной области. – Владивосток-Хабаровск: Дальнаука, 2000. – 174 с.
9. Пушкарь В.С. Биостратиграфия осадков позднего антропогена юга Дальнего Востока (по данным диатомового анализа). – М.: Наука, 1979. – 140 с.
10. Пушкарь В.С., Черепанова М.В. Диатомовые комплексы и корреляциф четвертичных отложений северо-западной части Тихого океана. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 174 с.
11. Разжигаева Н.Г., Гребенникова Т.А., Ганзей Л.А., Чаков В.В., Климин М.А., Мохова Л.М., Захарченко Е.Н. Стратиграфия водораздельного торфяника и развитие природной среды острова Большой Шантар в позднеледниковье–голоцене // Тихоокеанская геология. 2021. Т.40, №3. С. 85–102.
12. Семкин П.Ю., Тищенко П.Я., Павлова Г.Ю., Тищенко П.П., Сагалаев С.Г., Шкирникова Е.М., Швецова М.Г. Карбонатная система эстуариев рек Сыран и Ульбан (Ульбанский залив Охотского моря) в период летнего паводка // Водные ресурсы. 2022. Т.49, №5. С. 869–979. <https://doi.org/10.1134/S0097807822050141>

13. *Смирнова Л.И.* Фитопланктон Охотского моря и прикурильского района // Труды Института океанологии. Биологические исследования моря (планктон). – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – Т.30. – С. 3–51.
14. *Тищенко П.П., Тищенко П.Я., Семкин П.Ю., Швецова М.Г.* Первичная продукция фитопланктона в акватории Шантарского архипелага // Биология моря. 2023. Т.49, №1. С. 56–65. DOI: 10.31857/S0134347523010096
15. *Тищенко П.Я., Лобанов В.Б., Шулькин В.М., Мельников В.В., Цой И.Б., Семкин П.Ю., Тищенко П.П., Баннов В.А., Белоус О.В., Васильева Л.Е., Еловская О.А., Сагалаев С.Г., Федорец Ю.В.* Комплексные исследования прибрежных акваторий Японского и Охотского морей, находящихся под влиянием речного стока (71-й рейс научно-исследовательского судна “Профессор Гагаринский”) // Океанология. 2018. Т.58, №2. С. 340–342. <https://doi.org/10.7868/S00301574180>
16. *Тищенко П.Я., Лобанов В.Б., Тищенко П.П., Семкин П.Ю., Сергеев А.Ф., Анисимова Е.В., Барабаничиков Ю.А., Мельников В.В., Рюмина А.А., Сагалаев С.Г., Уланова О.А., Швецова М.Г., Шкирникова Е.М.* Гидрохимические исследования залива Академии (Охотское море) // Океанология. 2022. Т.62, №1. С. 80–92. <https://doi.org/10.1134/S0001437022010155>
17. *Цой И.Б., Обрезкова М.С., Артемова А.В.* Диатомеи поверхностных осадков Охотского моря и северо-западной части Тихого океана // Океанология. 2009. Т.49, №1. С. 141–150.
18. *Цой И.Б., Прушковская И.А.* Диатомовые водоросли поверхностных осадков залива Академии Охотского моря // Биология моря. 2023. Т.49, №2. С. 82–93. DOI: 10.31857/S0134347523020092
19. *Barron J.A., Bukry D., Ager T.A.* Holocene evolution of diatom and silicoflagellate paleoceanography in Slocum Arm, a fjord in southeastern Alaska // Marine Micropaleontology. 2016. V.126, №5. P. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2016.05.002>
20. *Razjigaeva N., Ganzey L., Grebennikova T., Mokhova L., Ponomarev V., Chakov V., Klimin M.* Bioaerosols as evidence of atmospheric circulation anomalies over the Okhotsk Sea and Shantar Islands in the late Glacial–Holocene // Climate. 2022. V.10, №2. P. 1–23. <https://doi.org/10.3390/cli10020024>
21. *Takahashi K., Blackwelder P.L.* The spatial distribution of silicoflagellates in the region of the Gulf Stream warm-core ring 82B: application to water mass tracer studies // Deep Sea Research. Part A. 1992. V.39, Suppl.1. P. S327–S346.

Оценка долговременных трансформаций экологической обстановки на акватории Иваньковского водохранилища

Assessment of the ecological situation long-term transformations in the Ivankovo reservoir

Разумовский В.Л., Кушнарева Т.Н.

Vikentii L. Razumovskij, Tatiana N. Kushnareva

Институт водных проблем РАН (Москва, Россия)

nethaon@mail.ru

Работа посвящена оценке результатов изучения донных отложений Иваньковского водохранилища. Помимо анализа диатомовых комплексов из колонок донных отложений в работе приводятся результаты мониторинга по фитопланктонным комплексам. Привлечены результаты химического анализа проб воды и донных отложений. В работе доказательно демонстрируется, что во всех проанализированных колонках отсутствуют процессы переотложения при формировании осадков. Рассмотрены результаты оценки качества вод по двум индексам: индексу сапробности S и интегральному индексу качества QI. Проведены сопоставление и пространственно-временной анализ полученных результатов. Дана оценка долговременных трансформаций, происходящих в водохранилище.

Ключевые слова: водохранилище; комплексный мониторинг; качество воды; фитопланктон; диатомовые водоросли; донные отложения; индекс загрязнения вод; индекс сапробности

The work is devoted to the evaluation of the new concept of integrated monitoring practical application results. The theoretical novelty of the concept consists in the joint analysis of diatom complexes from columns of bottom sediments and modern phytoplankton complexes. The work confirms that there are no processes of redeposition during precipitation formation in all analyzed columns. The results of the water quality assessment by two indexes are considered: the saprobity index (S) and the integral quality index (QI). Comparison and spatial-temporal analysis of the obtained results were carried out. Within the framework of the new concept, the results of chemical analysis of water and sediment samples were used for reference. The main objective of the work was to demonstrate the effectiveness of the new concept of integrated monitoring in assessing long-term transformations occurring in reservoir.

Keywords: integrated monitoring; phytoplankton; diatoms; bottom sediments; water pollution index; saprobity index

На сегодняшний день объективная оценка возобновляемых ресурсов пресных вод и достоверный анализ их качества являются приоритетными направлениями как гидрологической науки, так и практики управления водными ресурсами. Нелинейность и стохастичность антропогенного воздействия на экосистемы водохранилищ приводят к устойчивому формированию группы неоправданных рисков при их эксплуатации.

Ранее при мониторинге водных толщ водохранилищ было в значительной степени упущено из виду, что первые водохранилища существуют и эксплуатируются уже несколько десятилетий. На сегодняшний день возраст Иваньковского водохранилища составляет 85 лет. За время существования на дне подобных водохранилищ накопились значительные по мощности отложения.

В 2017 г. сотрудниками ИВП РАН была предложена новая концепция комплексного мониторинга (НККМ) (Разумовский, 2021). Новизна исследований состояла в совмещении двух традиционных методов: анализа диатомовых комплексов из колонок ДО, который применяется в палеоолиминологии, и анализа фитопланктонных комплексов, который применяется при биомониторинге. В качестве первого объекта исследований было выбрано Иваньковское. Это определялось длительностью его существования, мощностью накопившихся отложений и степенью изученности.

Целью проведенных исследований является апробация информативности НККМ для оценки долговременных трансформаций экосистем водохранилищ.

Структуру и объем первичного материала составили 225 фитопланктонных проб, отобранных в Иваньковском и Рыбинском водохранилищах, и 42 образца из 2 колонок ДО, отобранных в этих водохранилищах. Отбор проб проводился в 2017-2019 гг.

Колонки ДО из Иваньковского водохранилища были отобраны в районе Перетрусовского залива (56,810355, 36,924684), между малыми островами и западной оконечностью о. Грабиловка (далее – Острова) (56,784824, 36,931571).

Гидрохимический и гидробиологический мониторинг проводился по створам и пунктам в соответствии с ранее разработанными схемами. Обработка и просмотр фитопланктонных проб осуществлялся по стандартным методикам (Руководство..., 1992). Химические анализы проб воды проводили в лабораториях Института водных проблем РАН по стандартным методикам (Руководство..., 1977).

Обработка проб из ДО, изготовление постоянных препаратов, подсчет и идентификация створок диатомей осуществлялись по стандартным методикам (Давыдова, 1985; Renberg, 1990).

Всего из колонок ДО было изучено более 40 образцов на диатомовый анализ. В тех же образцах был проанализирован химический состав ДО в Аналитическом сертификационном испытательном центре Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН (АСИЦ ИПТМ РАН). Подробное описание методики изложено в работе (Karandashev et al., 2016).

Для сравнительного анализа гидрохимических и гидробиологических проб были рассчитаны два индекса: индекс сапробности S и индекс загрязненности вод ИЗВ (water pollution index, WPI). Индекс сапробности S по Сладечеку (Sládeček, 1973) был рассчитан по фитопланктонным комплексам (Руководство по гидробиологическому мониторингу..., 1992). Исходной информационной базой данных для расчета его численных значений послужила работа (Барина и др., 2006).

Гидрохимический ИЗВ установлен Госкомгидрометом СССР (Временные методические..., 1986) и относится к категории показателей, наиболее часто используемых для оценки качества водных объектов. Этот индекс является типичным аддитивным коэффициентом и представляет собой среднюю долю превышения ПДК по строго лимитированному числу индивидуальных ингредиентов (загрязняющих веществ).

Помимо стандартных (типовых) индексов к проведенным расчетам был привлечен интегральный индекс качества QI. Методика расчета QI основана на совмещении гидрохимических и гидробиологических данных (Зеленевская, 1998; 2011).

В отличие от методики ИЗВ, по которой предусмотрено применение средних значений химических ингредиентов, для расчета интегрального индекса использовались концентрации химических веществ на каждой станции, в каждый данный момент времени. Это способствовало проявлению экстремальных значений по некоторым показателям и регистрации комплексного загрязнения, приближенного к реальному для данного времени исследования.

По формуле для вычисления средней взвешенной величины, учитывающей значение WPI на каждой станции отбора и соответствующие характеристики

численности (например: 1 – случайные находки, 3 – частая встречаемость, 5 – массовое развитие) выбранных видов-индикаторов, рассчитана экологическая валентность каждого из них.

Далее рассчитываются интегральные индексы качества вод (QI) для каждой станции на основании формулы, применяемой для расчета индекса сапробности по Пантле и Букку в модификации Сладечека (Slàdeček, 1973), где вместо индексов сапробности видов-индикаторов использовались экологические валентности e_k .

За основу классификации уровней загрязнения при анализе качества воды по предложенной методике принята «Классификация качества вод по ИЗВ» (Временные методические ..., 1981; Емельянова и др., 1982).

Преимущество QI перед индексом сапробности (S) заключается в том, что при определении значений экологических валентностей учитывается не только загрязнение легкоокисляемой органикой, но и токсическое загрязнение воды, характерное для исследуемых водоемов. Интегральный индекс QI более объективно отражает качество вод и экологическую обстановку конкретного водохранилища.

В результате анализа таксономического состава фитопланктонных комплексов 2017–2019 гг. было установлено, что наибольшая доля идентифицированных индикаторных видов сапробности (S) в Ивановском водохранилище относится к отделу диатомовых. Было обнаружено 156 видов, индикаторов органического загрязнения. Большинство из них относятся к мезосапробам.

Констатируется ожидаемая сезонная повторяемость численных значений S. Их незначительная ежегодная вариативность определяется природно-климатическими, погодными условиями. Подавляющее большинство численных значений S не выходит за рамки β -мезосапробной зоны.

Полученные результаты подтверждают, что принятый при биомониторинге расчет индекса сапробности (S) обладает исходным методологическим недостатком, что приводит к нивелированию реальной сапробиологической обстановки на водохранилище (Шитиков и др., 2003).

Расчет численных значений интегрального индекса качества QI производился на основе результатов химических и биологических анализов, проведенных с мая по сентябрь в 2017-2019 гг. с прибрежных участков створов. В результате расчетов были получены экологические валентности e_k для 59 видов-индикаторов Ивановского водохранилища, отражающие отношение каждого из них к комплексному воздействию химических веществ.

Установлена выраженная сезонная повторяемость численных значений QI, их незначительная вариативность. Это определяется ежегодной повторяемостью превышений ПДК по аналогичному спектру загрязняющих веществ, поступающих в водохранилище.

В результате проведенных расчетов были получены численные значения S вдоль всего разреза колонки ДО отобранной в Перетрусовском заливе (Иваньковское водохранилище). Исходя из численных значений и построенной линии тренда, в заливе констатируется выраженные процессы сапробизации, что, вероятно связано с зарастанием и накоплением органики в прибрежной зоне. За проанализированный промежуток времени индекс сапробности повысился от 1,575 до 1,725.

В образцах из колонки ДО, отобранной в р-не Островов, были также рассчитаны численные значения S. Были констатированы малозначительные изменения, носящие циклический характер (рис. 8).

Расчет изменения численных значений QI по разрезу двух колонок ДО из Ивановского водохранилища проводился по 16 видам-индикаторам в р-не Островов и по 19 видам-индикаторам в р-не Перетрусовского залива, которые были идентифицированы в диатомовых комплексах. В отличие от результатов, полученных

при долговременном изменении численных значений S, при расчете численных значений QI констатируется направленное ухудшение качества вод как на открытых участках водохранилища (Острова), так и в прибрежной зоне (Перетрусовский залив).

Процессы изменения трофического статуса водоема могут иметь двойственную природу и зависеть от природных факторов и антропогенных воздействий. Именно поэтому долговременные изменения численных значений S существенно различаются в прибрежной зоне с низкой проточностью (Перетрусовский залив) и в открытых участках (Острова).

Долговременное изменение численных значений QI однозначно свидетельствует о повышении антропогенной нагрузки, что оказывает негативное воздействие на все участки Ивановского водохранилища.

Наглядной демонстрацией применения новой концепции комплексного мониторинга, было проведение исследований по оценке информативности рассчитываемого индекса сапробности S и интегрального индекса качества QI.

Ранее полученные результаты подтвердили, что принятый при биомониторинге расчет индекса сапробности S обладает исходным методологическим недостатком и происходит «выравнивание» или нивелирование реальной сапробиологической обстановки в водохранилище (Шитиков и др., 2005). Численные значения интегрального индекса качества QI более информативны, но их расчет более сложен.

Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2022-0002 Государственного задания ИВП РАН.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. *Баринова С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В.* Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. – Тель-Авив, 2006. – 500 с.
2. Временные методические рекомендации по оперативному прогнозированию загрязненности рек. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 102 с.
3. Временные методические указания по комплексной оценке качества поверхностных и морских вод. Утв. Госкомгидрометом СССР 22.09.1986 г. № 250-1163. – М., 1986. – 5 с.
4. *Давыдова Н.Н.* Диатомовые водоросли – индикаторы природных условий водоемов в голоцене. – Л.: Наука, 1985. – 244 с.
5. *Емельянова В.П., Данилова Г.Н., Колесникова Т.Х.* Обзор методов оценки качества поверхностных вод по гидрохимическим показателям // Гидрохимические материалы. 1982. Т.81. С. 121–131.
6. *Зеленевская Н.А.* Мониторинг фитопланктона и оценка экологического состояния Саратовского водохранилища. Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. биол. наук. – Тольятти, 1998. – 25 с.
7. *Зеленевская Н.А.* Фитопланктон Саратовского водохранилища в 2006–2010 годах // Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева. 2011. №12. С. 130–137.
8. *Разумовский Л.В.* Оценка информативности новой концепции комплексного мониторинга на примере трех водохранилищ // Сб. трудов XVII международной научной конференции диатомологов. Диатомовые водоросли: морфология, биология, систематика, флористика, экология, палеогеография, биостратиграфия (Минск 23–28 августа 2021 г.). – Минск: Колоград, 2021. – С. 106–112.
9. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 320 с.
10. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 541 с.
11. *Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д.* Количественная гидроэкология: методы, критерии, решения. – Кн. 1. – М.: Наука, 2005. – 280 с.
12. *Karandashev V.K., Leikin A.Yu., Khvostikov V.A., Kutseva N.K., Pirogova S.V.* Water Analysis by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry // Inorganic Materials. 2016. V.52, №14. P. 1391–1404.
13. *Renberg I.* A procedure for preparing large sets of diatom slides from sediment cores // Journal of Paleolimnology. 1990. V.4. P. 87–90.
14. *Sládeček V.* System of water quality from biological point of view // Arch. Hydrobiol. Ergeb. Limnol. 1973. № 7. 218 p.

Палеоэкологические реконструкции в позднем голоцене по диатомовым комплексам (проблематика, возможности, решения)

Late holocene diatom complexes paleoecological reconstructions (problems, possibilities, solutions)

Разумовский Л.В.

Lev V. Razumovskij

Институт водных проблем РАН (Москва, Россия)

lazy-lion@mail.ru

В работе рассматриваются отличительные особенности новейших отложений и проблематика их анализа. Перечислены основные трудности при палеоэкологических и палеоклиматических реконструкциях. Приводится краткое изложение разработанных за последние десятилетия методологических приемов на основе диатомового анализа. Изложены новые методы реконструкции долговременных изменений в экосистемах водохранилищ, на основе методологических приемов, применяемых в палеолимиинологии.

Ключевые слова: диатомовые водоросли; донные отложения; палеореконструкции

The paper discusses the latest deposits distinctive features and the problems of their analysis. The main difficulties in paleoecological and paleoclimatic reconstructions are listed. A summary of the methodological techniques developed over the past decades based on diatom analysis is given. New methods of reservoir ecosystems long-term changes reconstruction using paleolimnology methodological techniques are described.

Keywords: diatoms; bottom sediments; paleoreconstructions

Существует ряд объективных проблем при палеоэкологических и палеоклиматических реконструкциях, которые проводятся по такому объекту, как новейшие отложения. Следует сразу определить понятийную категорию или терминологическое понятие, которое в данном случае употребляется применительно к континентальным отложениям. Под термином «новейшие отложения» следует, по мнению автора, понимать осадочные образования, сформировавшиеся за несколько последних столетий. Следовательно, формирование новейших отложений соответствует времени антропогенного воздействия, как отдельного, выраженного фактора, который идентифицируется и отличается от всех видов и форм естественных воздействий на природные биогеоценозы.

В последние десятилетия изучение новейших изменений климата, протекавших в эпоху позднего голоцена, вышло на новый качественный уровень достоверности. Это было определено разработкой и внедрением новых и совершенствованием известных методов изотопного датирования озерных отложений, а также последовавшими за этим успехами в моделировании климата (Моисеенко и др., 2012; Соломина и др., 2013, 2014).

Отличительной особенностью микрофоссилий в новейших отложениях является их хорошая сохранность, что в полной мере относится к диатомовым водорослям. Этот, исходно благоприятный факт, привел к разобщенности методик реконструкции по различным параметрам гидросреды, в которой происходило формирование осадков. В дальнейшем была предложена унификация этих методик (Разумовский, 2008; Разумовский, Гололобова, 2008; Моисеенко, Разумовский, 2009).

Другой проблемой применительно к новейшим отложениям стало выявление процессов переноса и переотложения при формировании осадков. Идентификация последних была всегда крайне сложна именно при изучении новейших отложений. Вследствие хорошей сохранности створок диатомей и наличия однотипного видового состава распознать переотложенные комплексы было практически невозможно. Кроме того, сам факт присутствия в этих осадках более древних, переотложенных створок, может однозначно свидетельствовать только о значительном плоскостном смыве из районов более ранних по возрасту отложений.

Решающую роль сыграл разработанный метод графического анализа таксономических пропорций в диатомовых комплексах (Разумовский, Моисеенко, 2009). Сортировка створок в переотложенном комплексе происходит по их размерам и массивности. Поскольку каждый вид имеет устойчивые среднестатистические параметры по этим признакам, то очертания графиков таксономических пропорций выравниваются, приобретая линейный характер. В прижизненном распределении такие «простые» правила отсутствуют, поэтому пространственно-временные закономерности для любых биологических объектов будут априорно иметь нелинейный характер.

Таким образом, график соотношения процентных пропорций и числа таксонов в переотложенных комплексах представлен простой линейной функцией. Это связано с посмертным процессом, когда диатомовые комплексы «высвобождения» из-под многофакторного прижизненного воздействия окружающей среды.

Возможность распознавания этого типа распределения в диатомовых комплексах позволило значительно детализировать и переосмыслить историю развития и формирования озер Имандра и Галичского (Величко и др., 2001; Разумовский, 2021).

Переотложенные комплексы были достоверно идентифицированы автором при анализе уже опубликованного первичного материала (Кордэ, 1960).

Позднее, переотложенные комплексы были достоверно идентифицированы в озере Каракель и Донгузорун, что было подтверждено данными геохимического анализа по тем же образцам из этих отложений (Разумовский, Разумовский, 2013; Разумовский, 2014).

Еще одной отличительной особенностью новейших отложений озерного генезиса является их литостратиграфическая однородность (Моисеенко, Разумовский, 2019). Поэтому расчленение изучаемых разрезов возможно только по экозонам, которые выделяются по диатомовым комплексам. Кроме того, изменение экосистем водоемов не совпадает с темпами изменения экосистем обрамляющих ландшафтов, выделяемых спорово-пыльцевым методом.

В настоящий момент формируется новое направление исследований, в котором предлагается применение палеоолиминологических методов при оценке долговременных изменений в водохранилищах. В этом случае предлагается проводить совместный анализ диатомовых комплексов из колонок донных отложений и диатомовых водорослей из фитопланктона, при реконструкции по рассчитанным биоиндикационным индексам (Разумовский и др., 2022).

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Величко А.А., Кременецкий К.В., Негеданк Й., Минграм Й., Борисова О.К., Грибченко Ю.Н., Зеликсон Э.М., Климанов В.А., Новенко Е.Ю., Пирумова Л.Г., Писарева В.В., Разумовский Л.В., Тимирева С.Н. Позднечетвертичная палеогеография северо-востока Европы (по данным комплексного изучения осадков Галичского озера) // Известия АН. Серия Географическая. 2001. №3. С. 42–54.
2. Кордэ Н.В. Биостратиграфия и типизация русских сапропелей. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 220 с.
3. Моисеенко Т.И., Разумовский Л.В. Новая методика реконструкции катионно-анионного баланса в озерах (диатомовый анализ) // Доклады академии наук. Общая биология. 2009. Т. 427, № 1. С. 132–135.
4. Моисеенко Т.И., Разумовский Л.В. Реконструкции геоэкологических изменений в Западной Сибири по диатомовым комплексам из озёрных отложений // Доклады Академии наук. 2019. Т.487, №2. С. 192–197.
5. Моисеенко Т.И., Разумовский Л.В., Гашкина Н.А., Шевченко А.В., Разумовский В.Л., Мацуков А.С., Хорошавин В.Ю. Палеоэкологические исследования горных озёр // Водные ресурсы, 2012. Т.39, №5. С. 543–557.
6. Разумовский В.Л. Оценка экологического состояния высокогорных озёр Приэльбрусья по результатам диатомового анализа // Водные ресурсы. 2014. Т.41, №2. С. 200–205.
7. Разумовский Л.В. Реконструкция температурных циклов и сукцессионных изменений по диатомовым комплексам из донных осадков на примере Галичского озера // Водные ресурсы. 2008. Т.35, №6. С. 595–608.
8. Разумовский Л.В., Гололобова М.А. Реконструкция температурного режима и сопряженных гидрологических параметров по диатомовым комплексам из озера Глубокого // Водные ресурсы. 2008. Т.35, №4. С. 490–504.
9. Разумовский Л.В. Новая форма анализа диатомовых комплексов озера Имандра // Известия русского географического общества. 2021. Т.153, №6. С. 65–72.
10. Разумовский Л.В., Моисеенко Т.И. Оценка пространственно-временных трансформаций озерных экосистем методом диатомового анализа // Доклады академии наук. Общая биология. 2009. Т.429, №3. С. 274–277.
11. Разумовский Л.В., Разумовский В.Л. Регистрация новейших экосистемных событий в озере Каракель по переотложенным диатомовым комплексам // Вестник Тюменского Государственного Университета. Экология. 2013. №12. С. 121–127.
12. Разумовский Л.В., Черемных Л.П., Разумовский В.Л. Оценка информативности новой концепции комплексного мониторинга на примере Иваньковского водохранилища // Труды Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН. 2022. № 99 (102). С. 53–58.
13. Соломина О.Н., Калугин И.А., Александрин М.Ю., Бушуева И.С., Дарин А.В., Долгова Е.А., Жомелли В., Иванов М.Н., Мацковский В.В., Овчинников Д.В., Павлова И.О., Разумовский Л.В., Чепурная А.А. Бурение осадков оз. Каракель (долина р. Теберда) и перспективы реконструкции истории оледенения и климата голоцена на Кавказе // Лёд и Снег. 2013. № 2 (122). С. 102–111.
14. Соломина О.Н., Калугин И.А., Дарин А.В., Чепурная А.А., Александрин М.Ю., Кудерина Т.М. Использование геохимического и пылецевого анализов отложений оз. Каракель для реконструкции климатических изменений в долине р. Теберда (Северный Кавказ) в позднем голоцене (возможности и ограничения) // Вопросы географии. 2014. Т.137. Горные исследования. Горные регионы Северной Евразии. Развитие в условиях глобальных изменений. С. 2014–266.

**Реконструкция условий осадконакопления в палеоводоемах
северной части Самбийского полуострова по данным
комплексного изучения разреза Куликово**

**Reconstruction of sedimentation conditions in paleo-reservoirs of
the northern part of the Sambian Peninsula based on the
comprehensive study of the Kulikovo section**

**Рудинская А.И.¹, Дружинина О.А.², Филиппова К.Г.¹, Лазукова Л.И.¹,
Жаров А.А.³, Лаврова Н.Б.⁴**

**Anna I. Rudinskaya, Olga A. Druzhinina, Ksenia G. Filippova,
Liudmila I. Lazukova, Anton A. Zharov, Nadezda B. Lavrova**

¹*Институт географии РАН (Москва, Россия)*

²*Российский государственный педагогический университет имени А.И. Герцена
(Санкт-Петербург, Россия)*

³*Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова РАН (Москва, Россия)*

⁴*Институт геологии КарНЦ РАН (Петрозаводск, Россия)*

anna.rudinskaya@igras.ru

Выполнен комплексный анализ отложений палеоводоема, вскрытых в разрезе Куликово в северной части Самбийского полуострова. Судя по результатам радиоуглеродного датирования, отложения, вскрытые в разрезе, формировались примерно с 14100 по 12900 л.н. В настоящее время наиболее детально изучена нижняя часть разреза (глубина 192–142 см), относящаяся к среднему дриасу и началу аллереда. Результаты комплексного литологического, диатомового, споровопыльцевого анализа и анализа микроостатков позволили выделить 8 этапов смены условий осадконакопления в изучаемом палеоводоеме.

Ключевые слова: диатомовый анализ; палеолимнология; палеогеографические реконструкции; позднеледниковье; Самбийский полуостров

A comprehensive analysis of the deposits of the paleo-reservoir represented in the Kulikovo section (the northern part of the Sambian Peninsula) has been carried out. According to results of radiocarbon dating, the deposits formed approximately from 14100 to 12900 cal yr BP. The most detailed data were obtained for the lower part of the section (depth 192–141 cm), comprising the Older Dryas and the first half of the Allerød. Results of a comprehensive lithological, diatom, spore-and-pollen analysis and algo-zoological microfossil analysis allowed us to identify 8 stages of the sedimentation conditions of the paleo-reservoir.

Keywords: diatom analysis; paleolimnology; paleogeographic reconstructions; Late Glacial; Sambian Peninsula

Юго-восточная часть Прибалтики относится к районам, покрытым ледниками в период максимума валдайского оледенения. С началом дегляциации в позднем плейстоцене природная среда этого региона претерпела значительные изменения (Heikkilä, Seppä, 2010;

Druzhinina et al, 2020). Талые воды собирались по краю ледника, образуя подпруженные льдом озера. В результате объединения озер Борнхольмской и Гданьской котловины около 14 500–14 000 л.н. образовалось Балтийское ледниковое озеро (БЛО) (Úscinowicz, 2011). В разрезе Куликово вскрываются отложения одного из более мелких обособленных водоемов, существующих на суше вдоль побережья БЛО и собирающих воду из тающего мертвого льда.

Для реконструкции условий осадконакопления этого палеоводоема был выполнен комплексный литологический анализ, диатомовый анализ, анализ микроостатков и спорово-пыльцевой анализ. В настоящий момент наиболее детально изучена нижняя часть разреза – интервал глубин 192–142 см.

Гранулометрический анализ был выполнен на лазерном дифрактометре Malvern Mastersizer 3000. Определение гранулометрического состава проведено при использовании дифракционной модели Ми (Ozer et al., 2010). Содержание органического вещества и карбонатов было рассчитано путем прокаливания материала в муфельной печи и последующего взвешивания (Heiri et al., 2001). Магнитная восприимчивость измерялась на приборе ZH instruments SM 150 L на низкой (500 Hz) и высокой (4000 Hz) частотах при напряженности магнитного поля 320 А/м. Препараты для диатомового анализа были приготовлены по стандартной методике (Batarbee et al., 2001), для расчета концентрации створок в каждый образец была добавлена таблетка ликоподиума. Для идентификации таксонов использовались таксономическая литература (Kramer, Lange-Bertalot, 2001, Т.1-4, Куликовский и др., 2016). Среди идентифицированных видов диатомей были выделены экологические группы по системе галобов Кольбе и в зависимости от предпочтительного для вида трофического статуса водоема (Барина и др., 2001). Образцы для спорово-пыльцевого анализа готовили по стандартной методике (Гричук, 1940). При реконструкции экологических условий в изучаемом палеоводоеме в первую очередь учитывались данные по пыльце и спорам водной растительности, мхов, лишайников и зеленых водорослей. При анализе микроостатков фрагменты водорослей и водных беспозвоночных учитывали, используя каждый субфоссильный остаток как условную единицу соответствующей группы организмов по методике Н.Н. Смирнова (Смирнов, 2010). Возраст отложений был определен при помощи радиоуглеродного датирования. Установлено, что глубинный интервал разреза 192-142 см охватывает период около 14100–13400 л.н.

Комплексное изучение отложений разреза Куликово позволило выделить следующие стадии развития палеоводоема (возрастные рубежи указаны по возрастной модели):

1) 14100–13900 л.н. (192–182 см). Преобладает фракция алеврита (от 60 до 80%), содержание песка составляет от 7 до 14%, глины – от 11 до 14%. Содержание органического вещества резко увеличивается вверх по слою – от 11 до 54%, содержание карбонатов колеблется в пределах 7–13%. Магнитная восприимчивость уменьшается вверх по слою от 0,013 до $0,02 \times 10^{-6}$ м³/кг. Обнаружено незначительное число створок диатомей. Отсутствуют остатки водных беспозвоночных, наблюдаются многочисленные раковины пресноводных моллюсков (*Pisidium* sp., Planorbidae, Bithyniidae). По-видимому, на этом этапе существовал влажный биотоп, подверженный процессам заболачивания.

2) 13900–13870 л.н. (182–180 см). Доля песка около 10%, алеврита – около 70%, глины – 20%. Содержание органического вещества уменьшается до 13%, содержание карбонатов возрастает до 62%. Значения магнитной восприимчивости составляют $0,03 \times 10^{-6}$ м³/кг. Водорослевая флора представлена десмидиями (*Cosmarium* sp., *Euastrum* sp) и диатомовыми водорослями. Среди диатомей доминируют виды-обрастатели, большая часть которых представлена двумя эвтрофными видами: галофильным видом *Pseudostaurosira brevistriata* (64%) и видом-индифферентом *Epithemia adnata* (13,5%). Их

весовая концентрация составляет более 1 млн створок на 1 грамм сухого осадка. В зоогенных остатках преобладают панцири пресноводных остракод, экзоскелетов Cladocera и панцири Testacea, раковины моллюсков, присутствует *Alonella nana*. По-видимому, на этом этапе существовал неглубокий пресноводный водоем с высокой минерализацией и высокой биопродуктивностью.

3) 13870–13830 л.н. (180–176 см). Фракция песка составляет до 8–10%, алеврита 70–78%, глины – от 13 до 20%. Доля органического вещества увеличивается от 17 до 23%, содержание карбонатов уменьшается от 55 до 37%. Значения магнитной восприимчивости составляют $0,03–0,04 \times 10^{-6}$ м³/кг. Обнаружено незначительное число створок диатомей. Увеличивается содержание пыльцы осоки. Вероятна интенсификация процессов заболачивания в конце этапа.

4) 13830–13750 л.н. (176–169 см). Доля песка составляет 12–15%, доля алеврита – от 72 до 50%, глины – увеличивается от 14 до 31%. Доля органического вещества составляет 20–23%, доля карбонатов увеличивается от 40 до 50%. Магнитная восприимчивость увеличивается до $0,05–0,06 \times 10^{-6}$ м³/кг. Весовая концентрация створок диатомей вверх по зоне увеличивается от 50 до 110 тыс. створок/г. Доминируют бентосные виды: вид-индифферент *Amphora affinis*, обитающий в водоемах разного трофического статуса (от 23 до 9%), галофобный мезотрофный вид *Symbopleura inaequalis* (10–13%), и эвтрофный вид-индифферент *Navicula oblonga* (5–9%). Среди обрастателей преобладает *Epithemia adnata* (от 11 до 18% всех створок). Наблюдаются остатки десмидиевых водорослей *Cosmarium* sp., встречаются единичные клетки *Pediastrum* sp. Присутствуют панцири остракод и Cladocera. Появляются спиккулы губок. Диатомовые ассоциации свидетельствуют об условиях мезотрофно-эвтрофного водоема небольшой глубины с низкой минерализацией и средней биопродуктивностью. Наличие спиккул губок может свидетельствовать об увеличении проточности водоема.

5) 13750–13700 (169–165 см). Отмечается увеличение содержания песка до 15–18%, доля алеврита составляет от 57 до 68%, глины - снижается до 12–15%. Доля органического вещества увеличивается до 36–42%, карбонатов – снижается от 14 до 5%. Значения магнитной восприимчивости составляют $0,03–0,04 \times 10^{-6}$ м³/кг. Весовая концентрация створок диатомей уменьшается от 100 до 50 тыс. створок/г. Доминируют виды-обрастатели, представленные главным образом створками эвтрофных видов-индифферентов – *Gyrosigma attenuatum* (50–66%) и *Gyrosigma acummatum* (до 7%). Среди донных видов доминирует *Symbopleura inaequalis* (9–13%). Снижается число *Cosmarium* sp. В больших количествах присутствуют раковины *Pisidium* sp. В пыльцевых спектрах – заметные пики *Thalictrum* (2%), *Typha* (0,5%) и *Equisetum* (4%). На этом этапе отмечается увеличение эвтрофикация водоема и снижение его биопродуктивности, сопровождающееся началом процесса заболачивания.

6) 13700–13640 л.н. (165–158 см). Преобладает фракция алеврита (72–75%), доля песка составляет 12–15%, доля глины 18–22%. Доля органического вещества составляет 30–32%, карбонатных соединений – снижается от 23 до 11%. Значения магнитной восприимчивости составляют $0,03–0,04 \times 10^{-6}$ м³/кг. Во флоре водорослей преобладают диатомей (96% всех субфоссильных остатков). Весовая концентрация створок диатомей вверх по зоне увеличивается от 12 до 42 тыс. створок/г. Более половины створок представлены видами-обрастателями: мезотрофным галофобным *Staurosirella ovata* (от 15 до 32%) и эвтрофным галофильным *Melosira varians* (31% в нижней части слоя, затем его содержание резко уменьшается до 1%); велика доля створок видов *Gyrosigma attenuatum* (от 16 до 29%) и *Gyrosigma acummatum* (15–17%). Доля мезотрофных видов повышается вверх по слою, эвтрофных, наоборот, снижается. Уменьшается количество *Cosmarium* sp. Резко уменьшается доля остракод, значительно увеличивается число спиккул губок *Spongilla* sp. Среди моллюсков преобладают *Pisidium* sp. и Bithyniidae. В пыльцевых спектрах отмечается пик *Sphagnum* (2%). На этом этапе сохраняются условия

мелководного водоема, снижается его трофность и биопродуктивность, по-видимому, происходило увеличение и последующее снижение минерализации воды.

7) 13640–13530 (158–148 см). Содержание песка 5–10%, алевроита – 65–70%, глины – 27–32%. Доля органического вещества составляет 15–16%, карбонатов – меняется в пределах от 14 до 26%. Значения магнитной восприимчивости увеличиваются до $0,012–0,014 \times 10^{-6}$ м³/кг. Более 90% остатков водорослей представлены диатомеями. Их весовая концентрация возрастает от 1,3 до 6,4 млн створок на грамм осадка. Преобладают виды-образатели: *Staurosirella ovata* (от 13 до 44%) и *Pseudostaurosira brevistriata* (от 3 до 17%). Среди донных диатомей преобладают створки вида *Navicula oblonga* (от 4 до 13%). *Cosmarium* sp. и *Pediastrum* sp. встречаются в виде одиночных водорослей. Остракоды представлены немногочисленными мелкими обломками, спикулы губки *Spongilla* sp составляют 56–68% зоогенных микроостатков. На глубине 154 см исчезают раковины моллюсков. Наблюдается пик содержания Polypodiaceae (3,5%), постоянно присутствуют споры *Sphagnum*. По-видимому, на этом этапе водоем характеризовался мезотрофно-эвтрофными условиями и высокой продуктивностью, возможно небольшое увеличение его глубины и снижение минерализации воды.

8) 13530–13460 л.н. (148–141 см). Доля песка составляет 7–8%, алевроита – 63–65%, глины – 30–31%. Содержание органического вещества 18–21%, содержание карбонатов увеличивается вверх по слою от 9 до 21%. Значения магнитной восприимчивости составляют до $0,07–0,08 \times 10^{-6}$ м³/кг. Диатомовые водоросли составляют более 90% остатков водорослей. Их весовая концентрация меняется в пределах от 2 до 3,7 млн створок на грамм осадка. Преобладают виды-образатели, главным образом *Pseudostaurosira brevistriata* (13–24%) и *Staurosirella ovata* (содержание снижается от 26 до 11%). Содержание остракод и спикул губок остается неизменным. Присутствуют раковины моллюсков. Увеличивается содержание пыльцы и спор водных растений, *Sphagnum*, Polypodiaceae и *Equisetum*. По-видимому, на этом этапе происходит увеличение трофности водоема, его минерализация остается низкой.

В результате комплексного изучения разреза Куликово выявлено восемь этапов развития палеоводоема, сопровождавшихся трансформацией гидрологического режима и сменой водных сообществ в результате их реакции на кратковременные (длительностью в несколько десятилетий) потепления и похолодания, происходившие в среднем дриасе и первой половине аллереда.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-17-00113 «Критические рубежи и палеоклиматические события позднего плейстоцена и голоцена и их роль в формировании природно-культурных ландшафтов юго-восточной Прибалтики».

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Баринаева С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. – Тель-Авив, 2006. – 498 с.
2. Гричук В.П. Методика пробоподготовки бедных органикой отложений для палинологического анализа// Проблемы физической географии. – М.: Изд-во академии наук, 1940. – С.10–20.
3. Куликовский М.С., Глуценко А.М., Генкал С.И., Кузнецова И.В. Определитель диатомовых водорослей России. – Ярославль: Филигрань, 2016. – 804 с.
4. Смирнов Н.Н. Историческая экология пресноводных зооценозов. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2010. – 225 с.
5. Battarbee R.W., Jones V.J., Flower R.J. Diatoms. // Smol J.P., Birks H.J.-B., Last W.M. (eds.). Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Terrestrial, Algal and Siliceous Indicators – Berlin: Springer, 2001. – P.155–202. DOI: https://doi.org/10.1007/0-306-47668-1_8.

6. Druzhinina O., Kublitskiy Y., Stančikaitė M., Nazarova L., Syrykh L., Gedminienė L., Uogintas D., Skipityte R., Arslanov Kh., Vaikutienė G., Kulkova M., Subetto D. The Late Pleistocene – Early Holocene Palaeoenvironmental Evolution in the SE Baltic Region, Kaliningrad District, Russia: a new approach based on chironomid, geochemical and isotopic data from Kamyshovoe Lake // *Boreas*. 2020. №3. P. 544–561. DOI: <https://doi.org/10.1111/bor.12438>.

7. Heikkilä M., Seppä H. Holocene climate dynamics in Latvia, eastern Baltic region: A pollen-based summer temperature reconstruction and regional comparison // *Boreas*. 2010. №39. P. 705–719. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2010.00164.x>.

8. Heiri O., Lotter A.F., Lemcke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: Reproducibility and comparability of results // *Journal of Paleolimnology*. 2001. №25. P. 101–110. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1008119611481>.

9. Kramer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. 1. Teil: Naviculaceae // Ettl H., Gerloff J., Heynig H., Mollenhauer D. (ed). – Süßwasserflora von Mitteleuropa. – Berlin/Heidelberg: Springer, 2001. – 876 p.

10. Kramer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. 2. Teil: Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae // Ettl H., Gerloff J., Heynig H., Mollenhauer D. (eds). – Süßwasserflora von Mitteleuropa. – Berlin/Heidelberg: Springer, 2001. – 596 p.

11. Kramer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. 3. Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunoticeae. // Ettl H., Gerloff J., Heynig H., Mollenhauer D. (eds). – Süßwasserflora von Mitteleuropa. – Berlin/Heidelberg: Springer, 2001. – 640 p.

12. Kramer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. 4. Teil: Achnantaceae. // Ettl H., Gerloff J., Heynig H., Mollenhauer D. (eds). – Süßwasserflora von Mitteleuropa. – Berlin/Heidelberg: Springer, 2001. – 468 p.

13. Özer M., Orhan M., Isik N.S. Effect of Particle Optical Properties on Size Distribution of Soils Obtained by Laser Diffraction // *Environmental and Engineering Geoscience*. 2010. V.16, №2. P. 163–173. DOI: <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.16.2.163>.

14. Úscinowicz S. An Outline of the History of the Baltic Sea // Úscinowicz S. (ed.); *Geochemistry of Baltic Sea Surface Sediments*, 2nd ed. – Warsaw: Polish Geological Institute-National Research Institute, 2011. – P. 70–73.

Предварительные результаты диатомового анализа донных отложений озера Имандра (Кольский регион)

Preliminary results of a diatom analysis of the Imandra lake bottom sediments (Kola region)

Толстоброва А.Н.

Alena N. Tolstobrova

Геологический институт – обособленное подразделение ФИЦ «Кольский научный центр
РАН» (Апатиты, Россия)

a.tolstobrova@ksc.ru

Приводятся предварительные данные микропалеонтологического (диатомового анализа) изучения донных отложений озера Имандра. Всего выявлено 485 видов и внутривидовых таксонов. По изменениям в составе диатомовых сообществ выделены диатомовые зоны, отражающие развитие озера от приледникового водоема в позднеледниковое время до современного его состояния.

Ключевые слова: диатомовые водоросли; донные отложения; Имандра; Кольский регион

Preliminary data of micropaleontological (diatom analysis) study of bottom sediments of Lake Imandra are presented. A total of 485 taxa have been identified. According to changes in the composition of diatom communities, diatom zones were identified, reflecting the development of the lake from a periglacial lake in the Late Glacial period to its present state.

Keywords: diatoms; bottom sediments; Imandra Lake; Kola region

Кольский регион является одним из ключевых районов Европейской Арктики для изучения окружающей среды с момента отступления последнего ледникового покрова, а донные отложения озер и непосредственное исследование диатомовых водорослей в них позволяют получить данные об изменениях окружающей среды в прошлом и прогнозировать их в будущем.

Колонки донных отложений в пределах плеса Большая Имандра были отобраны летом 2017 г. в рамках совместного российско-германского исследовательского проекта в сотрудничестве с лабораторией геологии и минерагении новейших отложений Геологического института Кольского Научного Центра РАН. Результаты литологического, геохимического, гранулометрического, частично микропалеонтологического анализов, а также возрастная модель опубликованы в работе Lenz et al. (2021). Целью данного исследования было изучение таксономического состава и экологических характеристик диатомовых водорослей в донных отложениях озера Имандра, и выявление этапов развития водоема по диатомовым данным.

Всего методом диатомового анализа было изучено 84 образца. Определен видовой состав диатомовых водорослей, выявлены доминирующие комплексы, выполнен расчет концентрации диатомей в осадке и распределение диатомовых в донных отложениях. Установлено 485 таксонов диатомовых водорослей рангом ниже

рода. Изменения в видовом составе диатомовых комплексов, в концентрации створок отражают изменения уровня водоема, общей минерализации вод озера, колебания рН и т.д. в керне донных отложений на протяжении позднеледникового и голоцена. В докладе будут представлены первые данные по диатомовым водорослям из колонки донных отложений, накопление которых проходило непрерывно в озере Имандра, что позволит выявить полную картину палеогеографических условий в центральной части Кольского региона в поздне- и послеледниковое время.

Автор выражает искреннюю благодарность коллегам из СПбГУ, Института Геологии и Минералогии Университета Кельна и Геологического института КНЦ РАН. Работа выполнена в рамках темы НИР АААА-А19-119100290145-3 при частичной поддержке Минпросвещения России (проект № VRFY-2023-0010).

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Lenz M., Savelieva L., Frolova L., Cherezova A., Moros M., Baumer M. M., Gromig R., Kostromina N., Nigmatullin N., Kolka V., Wagner B., Fedorov G., Melles M. Lateglacial and Holocene environmental history of the central Kola region, northwestern Russia revealed by a sediment succession from Lake Imandra // *Boreas*. 2021. V.50. P. 76–100. <https://doi.org/10.1111/bor.12465>. ISSN 0300-9483

Диатомовая летопись эволюции оз. Грязевое (Магаданская область) в голоцене

Holocene diatom record of Gryazevoe Lake evolution (Magadan region)

Черепанова М.В.¹, Романова А.В.², Минюк П.С.³

Marina V. Cherepanova, Alexandra V. Romanova, Pavel S. Minyuk

¹ФНЦ биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН (Владивосток, Россия)

²Дальневосточный геологический институт ДВО РАН (Владивосток, Россия)

³Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН
имени Н.А. Шило (Магадан, Россия)

cherepanova@biosoil.ru

Изучены диатомовые водоросли из колонки Гз-1 (оз. Грязевое, Магаданская область), которые представлены 189 видами и внутривидовыми таксонами. На основе изменения таксономического состава и экологической структуры ископаемых сообществ диатомей было выделено три локальные зоны (ДзГз), соответствующие разным этапам эволюции озёрной экосистемы в течение позднего плейстоцена-голоцена. Установлена чуткая реакция диатомей на изменения гидрологического и гидрохимического режимов озера, связанные с палеоклиматическими колебаниями.

Ключевые слова: диатомовые водоросли; палеолимнология; голоцен; северо-восток России

Diatoms from core Gz-1 (Lake Gryazevoe, Magadan region) belonging to 189 species and intraspecific taxa were studied. Three local zones (LzGz) were identified based on changes in the taxonomic composition and ecological structure of fossil diatom assemblages. They correspond to different stages of the lake ecosystem evolution during the Late Pleistocene-Holocene. A sensitive reaction of diatoms to hydrological and hydrochemical changes of the lake regimes associated with paleoclimatic fluctuations has been established.

Keywords: diatom algae; paleolimnology; Holocene; Northeast Russia

Магаданская область отличается большим количеством озёр разного генезиса и размера, только водоёмов площадью > 1 га насчитывается около 10 150, при этом суммарный объем озерных вод составляет 2,86 км³ (Измайлова, 2018).

Изучению таксономического разнообразия современных альгофлор водоемов региона посвящено довольно много работ, но в основном они касаются р. Колымы и водотоков в районе Колымской ГЭС. Исследований диатомовых водорослей озёр относительно немного (Харитонов, 1981, 2006, 2010; Кузьмин и др., 1990; Черепанова, 2004 и др.). Ископаемые же диатомей анализировались лишь в плейстоцен-голоценовых колонках из оз. Гранд (Черепанова и др., 2013).

Целью исследования являлось: на основе изменений в ископаемых сообществах диатомей из колонки Гз-1, восстановить голоценовую историю экосистемы озера Грязевое.

Озеро Грязевое расположено в небольшой седловине вблизи пос. Талая (61°08'21.18" с.ш., 152°19'57.22" в.д.) в Магаданской области. Длина его составляет 270 м, ширина – 180 м, площадь поверхности воды – 0,03 км², максимальная глубина – 2,7 м, абсолютные отметка уровня воды – 713 м. Озеро слабопроточное. Вода в оз. Грязевое относится к ультрапресной. Общая минерализация составляет 49,80 мг/л, рН – 6,8 (Минюк и др., 2022).

Материалом для исследования послужила колонка ГЗ-1 длиной 579 см, поднятая в центральной части озера.

Методом диатомового анализа было исследовано 46 проб. Техническую обработку образцов проводили по стандартной методике (Прошкина-Лавренко, 1974). Изучение водорослей, осуществляли с помощью светового микроскопа Аxioplan 40 при увеличении x1000. Графическое оформление распределения таксонов и экологических групп по разрезу, выделение диатомовых зон было сделано с помощью программ TILIA и TILIA Graph (<http://www.tilias.com>) и кластерного анализа (CONISS) (Grimm, 1987). С целью обобщения изменений в диатомовых палеосообществах, подтверждения выделения зональных комплексов и палеосообществ использовался метод главных компонент (РСА).

Возрастная модель колонки ГЗ-1 была построена по данным радиоуглеродного датирования в лаборатории Ангстрема Уппсальского университета (Швеция) (Минюк и др., 2022).

Изученная диатомовая флора оз. Грязевое представлена 189 видами и внутривидовыми таксонами. Анализ изменений концентрации створок в осадках, процентного содержания таксонов и представителей экологических групп позволил выделить три локальные диатомовые зоны (ДзГз), соответствующие этапам эволюции экосистемы оз. Грязевое.

Зона ДзГз 1 (575–280 см, 24,844–19,564 тыс. л.н.) выделена несколько условно, она объединяет несколько прослоев, в которых было насчитано чуть более 100 створок. В группу доминантов входят индикаторы олиготрофных вод с низким содержанием питательных веществ: планктонная *Lindavia michiganiana* и бентосная *Ellerbeckia arenaria* f. *teres*, а также донная *Iconella hibernica*. Особенность комплекса зоны – низкое видовое богатство диатомей. Данный комплекс формировался в позднем плейстоцене во время холодной морской изотопной стадии (МИС) 2. Низкие концентрации створок или их полное отсутствие свидетельствует о постоянном ледовом покрове озера, препятствующем развитию фотосинтезирующих водорослей. Вместе с тем, прослой с диатомеями – возможная реакция диатомей на кратковременные потепления, например, ~23,4 тыс. л.н. во время интерстадиала GI 2.2. В это время зона оттаивания на мелководье расширялась, и здесь развивались бентосные виды, или такой обитатель неглубоких озер тундровой зоны, как *L. michiganiana*. Именно в МИС 2 начала формироваться котловина озера.

В осадках зоны ДзГз 2 (280–230 см, 12,689–11,116 тыс. л.н.) концентрация створок увеличивается. Доминирующую группу на разных уровнях интервала формировали: тихопланктонные *Staurosira venter*, *Pseudostaurosira brevistriata*, *I. hibernica*, *Skabitschewskia oestrupii* и планктонные *Aulacoseira humilis*, *A. valida*. Непостоянство состава доминантов свидетельствует о формировании комплекса в переходный период, на границе плейстоцена и голоцена. Тихопланктонные таксоны, доминирующие на начальной стадии, скорее всего, развивались в самом верхнем прогреваемом слое воды, но ещё при низких температурах воздуха. Небольшой выбор местообитаний, низкие температуры не способствовали высокому разнообразию таксонов. Появление *Iconella* можно считать индикатором начала устойчивого потепления климата и связанного с ним последующего развития более сложной и разнообразной диатомовой флоры озера. Подобные тенденции в развитии диатомовых

флор отмечаются для последнего тысячелетия в озерах арктической Канады (Besonen et al., 2008). Примерно 11,3 тыс. л.т.н. продуктивность и разнообразие диатомей возрастают и появляются представители рода *Aulacoseira*, которые обитают в водах с повышенной турбулентностью, что может свидетельствовать о конвективном перемешивании вод озера. Тенденция потепления климата, увеличение контрастности сезонных температур спровоцировали рост разнообразия диатомей из разных экологических групп.

Интервал зоны ДзГз 3 (230–11 см, 11,116–н.в.) характеризуется осадками с самыми высокими концентрациями створок, но они не остаются постоянными по разрезу. Особенностью комплекса является высокое видовое разнообразие диатомей и постоянное присутствие в доминирующей группе таксонов со створками ≤ 20 мкм: *S. venter*, *Staurosirella pinnata*, *Staurosira construens* и др. группы *Fragilaria sensu lato* (Smol et al., 2005), а также разнообразие и относительное обилие представителей семейства *Symbellaceae*, всего 15 таксонов. Устойчивый рост обилия мелких представителей *Fragilaria sensu lato*, скорее всего, связан с повышением температур поверхностных вод. Аналогичная ситуация, зафиксированная в голоценовых осадках маленького субарктического озера Канады, была охарактеризована как общая реакция сообществ диатомовых водорослей на потепление (Podritske, Gajewski, 2007). Вместе с тем, условия среды в период формирования комплекса зоны остаются непостоянными, что обусловило выделение четырёх подзон. Начавшееся ~10,7 тыс. л.т.н. повышение температур сменилось некоторым похолоданием (около 10,0 тыс. л.т.н.), которое, вероятно, увеличило продолжительность ледостава на озере, сократив вегетационный период планктонных и тихопланктонных диатомей. При этом происходило заболачивание окружающей озера территории: с водами небольших водотоков в озеро поступали болотные формы диатомей. Присутствие *S. pinnata* в доминирующей группе 7,103–5,329 тыс. л.н. может свидетельствовать о невысоких температурах. Обратная зависимость обилия *S. venter* и *S. pinnata*, которая связывается с изменениями климата, зафиксированными в голоценовых осадках арктических озер (Podritske, Gajewski, 2007), говорит в пользу более низких температур обитания *S. pinnata*. Примерно 4,4 тыс. л.н. отмечается резкое увеличение концентрации створок в осадках. Именно с этого времени в состав доминирующей группы на постоянной основе начинают входить бентосные таксоны с крупными створками. Их появление может рассматриваться, как реакция на потепление. Считается, что с повышением температуры очевиден переход от мелких таксонов к более крупным эпифитным, бентосным видам. Последующие частые, но кратковременные изменения в доминирующих группах могут свидетельствовать о нестабильных экологических условиях на фоне тенденции потепления. И, если температура следовала тренду на повышение, то рН воды, ее трофность менялись весьма хаотично. С 2,36 тыс. л.н. наблюдается становление современной диатомовой флоры. Значительные концентрации створок свидетельствуют о высокой продуктивности диатомей. Высокие оценки обилия таксонов, обитающих в гидрокарбонатных горных озерах, – *C. inaequalis*, *Symbopleura incerta* var. *spitsbergensis*, *N. vulpina*, *Eucocconeis flexella* (Barinova, Niyatbekov, 2019), свидетельствуют об установлении современного уровня минерализации вод. Появившаяся водная макрорастительность предоставила диатомеям новые местообитания, а повышенная трофность вод – возможность активного развития мезотрофных таксонов диатомей.

Таким образом, установленная реакция диатомей, прежде всего, на колебания климата в голоцене позволила выделить основные этапы трансформации экосистемы от неглубокого олиготрофного водоёма с постоянным ледоставом до относительно глубокого мезотрофного озера с разнообразной высокопродуктивной диатомовой флорой.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ ФНЦ Биоразнообразия (тема №121031500274-4) и ДВГИ ДВО РАН, а также за счёт средств Российского научного фонда (проект № 22-27-00444).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Измайлова А.В. Озерные водные ресурсы азиатской части Российской Федерации // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. № 5. С. 453–462.
2. Кузьмин Г.В., Агапова Г.А., Сусекова Н.Г. Фитопланктон и химический состав воды озера Джека Лондона (Магаданская область) // Гидробиологический журнал. 1990. № 6. С. 21–27.
3. Минюк П.С., Пожидаева Д.К., Бурнатный С.С., Черепанова М.В., Курьина И.В., Назарова Л.Б. Комплексные исследования плейстоцен-голоценовых осадков озера Грязевое, Магаданская область // Проблемы Геокосмоса: материалы XIV школы-конференции (Санкт-Петербург. 3–7 октября 2022 г.). – СПб.: Скифия-принт, 2022. – С. 40–47.
4. Прошкина-Лавренко А.И. (ред.). Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Т. 1. – Л.: Наука, 1974. – 403 с.
5. Харитонов В.Г. Об особенностях распределения диатомовых водорослей на севере Магаданской области // Ботанический журнал. 1981. Т.66, №5. С. 731–734.
6. Харитонов В.Г. Диатомовые водоросли оз. Джека Лондона и водоёмов его бассейна (Верхняя Колыма) // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2006. № 3. С. 40–54.
7. Харитонов В.Г. Конспект флоры диатомовых водорослей (Bacillariophyceae) Северного Охотоморья. – Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2010. – 189 с.
8. Черепанова М.В. Пресноводные диатомовые сообщества озёр Северо-Востока Сибири // Пространственная и временная изменчивость природной среды Северо-Востока Азии в четвертичный период. – Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2004. С. 77–89.
9. Черепанова М.В., Авраменко А.С., Андерсон П.М., Ложкин А.В., Минюк П.С., Пушкарь В.С. Диатомовые водоросли оз. Эликчан (Северное Приохотье) и их значение для реконструкции развития экосистемы озера за последние 70 тыс. лет // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2013. № 1. С. 3–15.
10. Barinova S., Niyatbekov T. Comparative Analysis of Diatom Algae Diversity in the Pamir Protected Lakes, Tajikistan // International Journal of Advanced Research in Botany. 2019. V.5, №2. P. 1–17. DOI: <http://dx.doi.org/10.20431/2455-4316.0502001>
11. Besonen M.R., Patridge W., Bradley R.S., Francus P., Stoner J.S., Abbott M.B. A record of climate over the last millennium based on varved lake sediments from the Canadian High Arctic // The Holocene. 2018. V. 18. P. 169–180. DOI: <https://doi.org/10.1177/095968360708>
12. Grimm E.C. CONISS: a FORTRAN 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares // Computers & Geosciences. 1987. V. 13, № 1. P. 13–35.
13. Podrifske B., Gajewski K. Diatom community response to multiple scales of Holocene climate variability in a small lake on Victoria Island, NWT, Canada // Quaternary Science Reviews. 2007. V. 26, №25-28. P. 3179–3196.
14. Smol J.P., Wolfe A.P., Birks H.H., Douglas M.S.V., Jones V.J., Korhola A., Pienitz R., Rühland K., Sorvari S., Antoniades D., Brooks S.J., Fallu M.-A., Hughes M., Keatley B.E., Laing T.E., Michelutti N., Nazarova L., Nyman M., Paterson A.M., Perren B., Quinlan R., Rautio M., Saulnier-Talbot E., Siitonen S., Solovieva N., Weckström J. Climate-driven regime shifts in the biological communities of Arctic lakes // Proceedings of the National Academy of Sciences USA. 2005. V.102, №12. P. 4397–4402. DOI: 10.1073/pnas.0500245102

Секция 4.

Экология, использование диатомовых водорослей как биоиндикаторов

Оценка современного состояния экосистемы озера Имандра (Россия, Мурманская область) с помощью статистических и биоиндикационных методов

Assessment of the current state of the Lake Imandra ecosystem (Russia, Murmansk region) using statistical and bioindication methods

Вокуева С.И.¹, Денисов Д.Б.¹, Барина С.С.²

Sofia I. Vokueva, Dmitrii B. Denisov, Sophia S. Barinova

¹Институт проблем промышленной экологии Севера – обособленное подразделение ФИЦ
«Кольский научный центр РАН» (Апатиты, Россия)

²Институт эволюции Хайфского университета (Хайфа, Израиль)

s.vokueva@ksc.ru

Исследованы диатомовые комплексы поверхностных донных отложений озера Имандра — крупнейшего водоема Мурманской области. Выявлены значительные различия в их составе в участках акватории, отличающихся типом и интенсивностью антропогенной нагрузки. С помощью биоиндикационных и статистических методов выявлены основные факторы, влияющие на развитие тех или иных диатомовых комплексов.

Ключевые слова: диатомовые водоросли; биоиндикация; мониторинг; антропогенное загрязнение

The diatom assemblages of surface sediments of the Lake Imandra were studied. Lake Imandra is the largest freshwater reservoir in the Murmansk region. Significant differences in the composition of diatom assemblages were revealed in various parts of the water area, differing in the type and intensity of anthropogenic load. With the help of bioindication and statistical methods, the main factors influencing the development of certain diatom assemblages were identified.

Keywords: diatoms; bioindication; monitoring; anthropogenic pollution

Озеро Имандра – одно из крупнейших пресноводных водоемов, расположенное на северо-западе России, и крупнейшее в Мурманской области. Озеро является важным источником водоснабжения, имеет рыбохозяйственное и рекреационное значение. В то же время на экосистему водоема оказывает влияние множество факторов, включающих естественные (геохимические, климатические) и антропогенные (воздействие гидро- и атомной электростанций, а также предприятий апатит-нефелиновой и медно-никелевой промышленности) (Разумовский, 1997; Моисеенко и др., 2002; Кашулин и др., 2012; Даувальтер и др., 2023). Наши предыдущие исследования (Vokueva, Denisov, 2021; Вокуева, Денисов, 2022) показали, что для оценки состояния экосистем крупных водоемов со сложной береговой линией оптимальным представляется анализ диатомовых комплексов поверхностных донных отложений (ДО) в сочетании с данными

химического анализа воды и ДО. Цель работы заключалась в оценке состояния экосистемы озера Имандра в его различных участках с помощью индикаторных свойств диатомовых водорослей, а также выявлении основных факторов, влияющих на современное состояние.

Материалом для исследования являлись верхние слои ДО озера Имандра (0-1 см), отобранные на 26 станциях в 2013-2020 гг. Отбор проб и их анализ выполнялись стандартными методами (Давыдова, 1985), с изменениями, описанными в (Денисов, Косова, 2019). После лабораторной обработки проб производилась таксономическая идентификация диатомовых водорослей с помощью микроскопов «Leitz BIOMED» и «Motic BA 300». Все обнаруженные в препаратах створки водорослей определялись до внутривидовых таксономических категорий. Также проводился подсчет численности идентифицированных видов и выявление видов-доминантов, а затем — оценка экологического состояния озера по индикаторным показателям диатомовых водорослей (Барина и др., 2006). Полученные данные по диатомовому составу и количественным характеристикам заносились в запатентованную базу данных «Водоросли Евро-Арктического региона» (Денисов, Косова, 2017). Таксономическая информация сверялась с актуальной, регулярно обновляемой мировой базой водорослей (Guiry, Guiry, 2023). Все постоянные препараты и очищенный материал створок диатомовых водорослей хранятся в гербарии Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН (Боровичёв и др., 2018). На основании полученных данных были определены индекс сапробности S, индексы видового разнообразия Симпсона, Шеннона–Уивера и значение рН. Статистическая обработка результатов включала построение статистических карт (Varinova, 2017) и выполнение корреляционного анализа.

Общий современный видовой состав озера Имандра составил 383 вида диатомовых водорослей, принадлежащих к 86 родам, что расширило данные предыдущих исследований (Vokueva, Denisov, 2021).

Анализ выявленных биоиндикаторов совместно с химическим анализом ДО позволил выявить характеристики среды, в которой развиваются диатомовые комплексы. В целом воды озера характеризуются как пресные и слабощелочные, близкие к нейтральным, с малым содержанием биогенных элементов. Однако, наблюдается развитие в отдельных участках озера диатомей-индикаторов органического загрязнения вод совместно с ростом концентраций биогенных и токсических элементов в воде и ДО, что указывает на наличие кардинально различающихся условий окружающей среды для водоема.

Анализ статистических карт и результатов корреляционного анализа позволил выявить основные факторы, влияющие на разнообразие диатомовых комплексов. Так как озеро Имандра состоит из трех обособленных частей-плёсов (Большая, Йокостровская и Бабинская Имандра), одним из факторов был выявлен морфометрический. Помимо отличающихся комплексов диатомей в плёсах, этот фактор влияет на формирование уникальных сообществ в обособленных заливах-губах. Вторым фактором был выделен гидрологический, влияющий на вынос сообществ из одних участков озера в другие вместе с водными массами. Образование течений в водоеме связано с деятельностью гидро- и атомной электростанций, пересыпкой проливов между плёсами при строительстве автомагистралей, а также впадающими водотоками. Третий фактор — непосредственно антропогенная деятельность (а именно деятельность предприятий апатит-нефелиновой и медно-никелевой промышленности). В следствие работы предприятий происходит внос биогенных и токсических элементов, что кардинально изменило состав диатомовых комплексов в районах непосредственного влияния.

Таким образом, современное состояние экосистемы озера Имандра характеризуется значительной вариабельностью, связанной с влиянием перечисленных

факторов. В районах воздействия апатит-нефелиновой и медно-никелевой промышленности (плёс Большая Имандра) проявляются процессы эвтрофирования (высокие индексы сапробности и значения рН, низкое таксономическое разнообразие), а во втором из них также отмечена токсическая нагрузка. В районе стока из Большой Имандры в Йокостровскую сообщества диатомей схожи, что подтверждает влияние гидрологического фактора, а в западной части Йокостровской Имандры и в Бабинской условия близки к естественным, и антропогенный фактор уже не оказывает влияние на формирование диатомовых комплексов, в результате чего район характеризуется высоким таксономическим разнообразием, меньшими индексами сапробности и уровнем рН, близким к нейтральному.

Работа выполнена в рамках тем НИР №1021111018324-1 и №1021051803677-1.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. *Барина С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В.* Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. – Тель-Авив: PiliesStudio, 2006. – 498 с.
2. *Боровичёв Е.А., Денисов Д.Б., Корнейкова М.В., Исаева Л.Г., Разумовская А.В., Химич Ю.Р., Мелехин А.В., Косова А.Л.* Гербарий ИППЭС КНЦ РАН // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. №9 (9-6). С. 179–186. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.9.179-186
3. *Вокужева С.И., Денисов Д.Б.* Пространственно-временная динамика диатомовых комплексов озера Имандра (Россия, Мурманская область) // Вопросы современной альгологии. 2022. № 2 (29). С. 75–82. DOI: 10.33624/2311-0147-2022-2(29)-75-82
4. *Давыдова Н.Н.* Диатомовые водоросли – индикаторы экологических условий водоёмов в голоцене. – Л.: Наука, 1985. – 244 с.
5. *Даувальтер В.А., Сандимиров С.С., Денисов Д.Б., Демин В.И., Кашулин Н.А., Терентьев П.М., Валькова С.А., Вандыш О.И., Королева И.М., Кудрявцева Л.П., Зубова Е.М., Петрова О.В., Черепанов А.А.* Экологическое состояние озера Имандра. Том 1. Гидролого-геохимические условия. – Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2023. – 221 с.
6. *Денисов Д.Б., Косова А.Л.* Разработка базы данных по водорослям Евро-Арктического региона // Труды Кольского научного центра РАН. 2017. № 6–5 (8). С. 45–52.
7. *Денисов Д.Б., Косова А.Л.* Методика пробоподготовки донных отложений к диатомовому анализу // Шарам С.А. (ред.). Методы экологических исследований водоёмов Арктики. – Мурманск: Изд-во МГТУ, 2019. – С. 79–83.
8. *Кашулин Н.А., Денисов Д.Б., Валькова С.А., Вандыш О.И., Терентьев П.М.* Современные тенденции изменений пресноводных экосистем Евро-Арктического региона // Труды Кольского научного центра РАН. 2012. Т. 1, № 2. С. 7–54.
9. *Моисеенко Т.И., Даувальтер В.А., Лукин А.А., Кудрявцева Л.П., Ильящук Б.П., Ильящук Л.И., Сандимиров С.С., Казан Л.Я., Вандыш О.М., Шарова Ю.Н., Королева И.Н., Шаров А.Н.* Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра. – М: Наука, 2002. – 476 с.
10. *Разумовский Л.В.* Биоиндикация уровня антропогенной нагрузки на тундровые и лесотундровые ландшафты по диатомовым комплексам озёр Кольского полуострова. — М.: Изд. ИРЦ Газпром, 1997. – 92 с.
11. *Barinova S.S.* Ecological mapping in application to aquatic ecosystems bioindication: problems and methods // International Journal of Environmental Sciences and Natural Resources. 2017. V. 3, № 2. P. 1–7. DOI: 10.19080/IJESNR.2017.03.5556078
12. *Guiry M.D., Guiry G.M.* AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. 2023. <http://www.algaebase.org> (дата обращения: 10.06.2023).
13. *Vokueva S., Denisov D.* Diatom assemblages in surface sediments of Lake Imandra (Russia, Murmansk region) // Polish Polar Research. 2021. V.42, №4. P. 249–268. DOI: 10.24425/ppr.2021.137147

Новые данные об очаге биоразнообразия диатомовых водорослей в окрестностях заповедника «Усть-Ленский» в Арктике

New data on a hotspot of diatom diversity in the vicinity of the Lena Delta Nature Reserve in the Arctic

Габышев В.А.^{1,2}, Баринаова С.С.³, Генкал С.И.⁴

Viktor A. Gabyshev^{1,2}, Sophia S. Barinova³, Sergey I. Genkal⁴

¹Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН (Якутск, Россия)

²Государственный природный заповедник «Усть-Ленский» (Тикси, Россия)

³Институт эволюции, Хайфский университет (Хайфа, Израиль)

⁴Институт биологии внутренних вод имени И.Д. Папанова РАН (Борок, Россия)

v.a.gabyshev@yandex.ru

Для 14 малых тундровых водоемов в окрестностях заповедника «Усть-Ленский» выявлено 385 таксонов диатомовых водорослей. В результате видовой состав диатомей заповедника и прилегающих территорий пополнился на 278 видов, и общий список составил 666 таксонов, включая определения до уровня рода. Число редких или исчезающих видов составило 42. Статистическое картирование позволило выявить реакцию сообществ на локальное антропогенное загрязнение и на воздействие летних северо-восточных ветров. Мы полагаем, что высокий уровень видового разнообразия, отмеченный нами для диатомей исследованных водоемов, расположенных на арктическом побережье, связан с экотонным эффектом. Сравнительная флористика диатомовых от Шпицбергена до Чукотки установила высокую индивидуальность видового состава в озерах Арктики. Поскольку исследованные водоемы выделяются максимальным видовым богатством диатомей среди всей территории заповедника и сопредельных районов, эти водоемы можно считать не только экотонном, но и очагом биоразнообразия. Результаты исследования важны для разработки основ мониторинга биоразнообразия в условиях антропогенных и климатических изменений в Арктике.

Ключевые слова: диатомей; биоразнообразие; экология; флористика; климат; Красная книга; охраняемые виды; биоиндикаторы; статистическое картографирование

In 14 small tundra reservoirs in epy vicinity of Lena Delta Wildlife Reserve, we identified 385 taxa, which in the compilatory list made up a significant diversity (666 taxa including definitions to the genus level) of diatoms. Thus, the species composition of diatoms in the reserve and adjacent territories was replenished by 278 species. The number of rare or endangered species is 42 for the entire study area. Statistical mapping of indicators of community and habitat diversity revealed a strong reaction to point one-time pollution and made it possible to assume the influence of summer northeast winds on the species composition. We suggest that the high diversity inherent in the diatom lakes of coastal zone, can be considered as a property of coastal biota inherent in ecotones. Comparative floristics of diatoms from Svalbard to Chukotka established a high individuality of the species composition in the lakes of the Arctic. Since it is in the coastal region that a surge in the number of species is observed, this region can be considered not only an ecotone, but also a hotspot of diatom diversity. The results of the study are important for developing the basis for monitoring biodiversity under the conditions of anthropogenic and climatic changes in the Arctic.

Keywords: diatoms; diversity; ecology; floristic; climate; Red List; threatened species; bioindicators; statistical mapping

Изучение экологии и видового разнообразия диатомей Арктики приобретает особое значение в связи с ростом антропогенной нагрузки и явлениями глобального изменения климата. Водные объекты государственного природного заповедника «Усть-Ленский» и прилегающих территорий расположены за Полярным кругом в зоне сплошного залегания многолетнемерзлых грунтов. Альгологические исследования этого района, включающего низовья реки Лены, ее дельту, обширную акваторию моря Лаптевых, тундровые водоемы отрогов Хараулахского хребта и Новосибирские острова, были начаты почти 100 лет назад. Последняя сводка, включающая всю имеющуюся на данный момент информацию по альгофлоре этого региона, опубликована в виде базы данных на портале GBIF.org (Gabyshev et al., 2021). В соответствии с ней диатомовая флора заповедника и сопредельных территорий включает информацию о 413 таксонах рангом ниже рода.

Ранее нами было показано, что на видовой состав и разнообразие диатомей арктических водоемов влияет ряд региональных особенностей: площадь водоема, направление господствующих ветров, температура воды, соленость, pH (Varinova, Stenina, 2013; Varinova et al., 2023; Bessudova et al., 2021). Однако определение охраняемого статуса диатомовых водорослей данного района до настоящего времени сделано не было (Комулайн, 2009; Красная книга..., 2017). Предметом нашего исследования стала флора диатомовых водорослей, обнаруженных в 14 водоемах в окрестностях поселка Тикси, расположенных в 70 км к югу от границы заповедника «Усть-Ленский» (далее участок «Тикси») (Varinova et al., 2023) и на территории самого заповедника (далее участок «Дельта») (Gabyshev et al., 2021). Целью настоящего исследования было выявление экологических факторов, влияющих на разнообразие диатомей изучаемых водоемов, определение видов, потенциально требующих охраны, для включения в Красную книгу Арктического региона.

Общий видовой список был составлен на основе наших исследований участка «Дельта», включающего 413 таксонов (Gabyshev et al., 2021) и участка «Тикси» – 385 таксонов (Varinova et al., 2023), и составил 666 таксонов диатомовых водорослей (включая определения до родового уровня), 278 из них пополнили региональную флору. Мы рассчитали индекс отношения числа видов диатомей к площади исследованной территории, который составил для участка «Дельта» 0,05, а для участка «Тикси» 2,14. Это показывает различия между биоразнообразием обоих исследованных районов и подтверждает, что участки арктического побережья могут быть очагом биоразнообразия диатомей, как это было выявлено нами ранее для чешуйчатых хризофитовых этой же территории (Bessudova et al., 2022). По нашим данным, значимым для формирования сообществ диатомовых водорослей арктических флор оказался географический фактор, а помимо этого связь с отдельными бассейнами речного стока на побережье, возвышенными местообитаниями, а также влияние таких климатических факторов как летние северо-восточные ветра на видовой состав (Varinova et al., 2023). Сравнительная флористика диатомовых в арктических озерах от Шпицбергена до Чукотки статистически достоверно установила высокую индивидуальность видового состава в озерах Арктики. Примененный нами метод биоиндикации позволил также определить последствия однократного антропогенного загрязнения вод биогенными веществами и подчеркнул высокую чувствительность экосистем в прибрежных озерах.

Впервые для арктических районов России проведено сопоставление видового состава диатомей исследованной территории со списком Красной книги Международного союза охраны природы и природных ресурсов, в результате чего из нашего списка выделено 42 вида, относящихся к различным категориям охраны. Среди этих редких или находящихся под угрозой исчезновения видов преобладают предпочитающие умеренные температуры, слабокислую или нейтральную среду, свободную от органических загрязнений. Таким образом, сообщества диатомей чистых, пресных озер с нейтральной реакцией среды,

расположенных на побережье Северного Ледовитого океана и отличающиеся наибольшим уровнем биоразнообразия, являются наиболее уязвимыми.

Несмотря на то, что диатомовая флора озер участка «Дельта» изучалась многократно в течение целого ряда лет, а 14 озер участка «Тикси» обследовались нами только однократно, видовое богатство последних было выше. Это позволяет предположить, что высокое разнообразие, присущее диатомовым водорослям озер участка «Тикси», можно рассматривать как свойство биоты водоемов побережий, присущее экотонам. Поскольку именно в озерах «участка» Тикси отмечено максимальное число видов, этот район можно считать не только экотонном, но и очагом диатомового разнообразия. Экотоны представляют собой пограничные участки разных ландшафтов, где наблюдается заметное увеличение разнообразия организмов (Odum, 1971). До сих пор ландшафты побережья Северного Ледовитого океана не рассматривались как экотоны для диатомовых сообществ. Но для биоразнообразия водорослей этот термин использовался, например, для сообществ речных местообитаний (Sharipova, 2007).

Нами сформирована гипотеза об интродукции видов из умеренных широт в арктические воды в условиях глобального изменения климата (Bessudova et al., 2021). Рекордный уровень видового разнообразия этих гидробионтов может отражать начало проявлений потепления климата. Таким образом, нами выявлена важная роль климатических, морфометрических и других экологических переменных, связанных с географическим положением водоема, в формировании состава диатомовых сообществ высокоширотных озер. Результаты исследования важны для разработки основ мониторинга биоразнообразия неимпактных, экологически уязвимых территорий в условиях глобальных изменений климата.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ по проектам № FWRS-2021-0023, ЕГИСУ НИОКТР № АААА-А21-121012190038-0 и № 121051100099-5, а также Министерства природных ресурсов и экологии РФ по проекту № 1-22-81-4.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Комулайнен С.Ф. Пресноводные водоросли в Красных книгах: состояние и проблемы // Труды Карельского научного центра РАН. 2009. № 1. С. 57–61.
2. Красная книга Республики Саха (Якутия). Т. 1: Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений и грибов / Отв. ред. Н.С. Данилова. – М.: Издательство «Реарт», 2017. – 412 с.
3. Barinova S., Gabyshev V., Genkal S., Gabysheva O. Diatoms of Small Water Bodies as Bioindicators in the Assessment of Climatic and Anthropogenic Impacts on the Coast of Tiksi Bay, Russian Arctic // Water. 2023, V. 15, P. 1533. DOI: 10.3390/w15081533.
4. Barinova S., Stenina A. Diatom diversity and ecological variables in the Arctic lakes of the Kostyanoi Nos Cape (Nenetsky Natural Reserve, Russian North) // Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology. 2013. V. 147, №2. P. 397-410. DOI: 10.1080/11263504.2012.749956
5. Bessudova A., Gabyshev V., Bukin Y., Gabysheva O., Likhoshway Y.V. Species richness of scaled Chrysophytes in arctic waters in the Tiksi Region (Yakutia, Russia) // Acta Biologica Sibirica. 2022. V. 8. P. 431–459. DOI: 10.5281/zenodo.7710355.
6. Bessudova A., Gabyshev V., Firsova A., Gabysheva O., Bukin Y., Likhoshway Y. Diversity variation of silica-scaled chrysophytes related to differences in physicochemical variables in estuaries of rivers in an Arctic watershed // Sustainability. 2021. V. 13. P. 13768. DOI: 10.3390/su132413768
7. Gabyshev V., Ivanova A., Gabysheva O. Long-term survey of algae of the Lena Delta Wildlife Reserve including data on chemistry of waters. Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS. Sampling event dataset 2021, Version 1.2. DOI: 10.21072/mbj.2021.06.3.02.
8. Odum E.P. Fundamentals of Ecology. – Philadelphia: W.B. Saunders Co., 1971. 574 p.
9. Sharipova M.Yu. Algae of terraqueous ecotones of the Basu River Valley (South Ural, Russia) // International Journal on Algae. 2007. V. 9, №2. P.162–173. DOI: 10.1615/InterJAlgae.v9.i2.60.

Оценка качества воды некоторых водоемов Ростовской области (Россия)

Bioindication of the water quality of some reservoirs of the Rostov region (Russia)

Глущенко Г.Ю.^{1,2}

Galina Y. Glushchenko

¹Южный научный центр РАН (Ростов-на-Дону, Россия)

²Южный федеральный университет,

Академия биологии и биотехнологии имени Д.И. Ивановского (Ростов-на-Дону, Россия)

glushchenko_gala@mail.ru

В работе приведены результаты предварительной биоиндикационной оценки некоторых водоемов Ростовской области (рр. Северский Донец, Кундрючья, Темерник, Мокрый Чалтырь, Миус, Ольховчик), которые свидетельствуют о том, что в исследованных реках достаточно большое видовое разнообразие водорослей. Значения индексов разнообразия Шеннона (1,74–2,91) и выравненности (0,30–0,76) указывают на сложность структуры и высокое биоразнообразие фитопланктонного сообщества. Одним из основных компонентов фитопланктона, позволившим провести биоиндикационную оценку, были диатомовые водоросли, виды-индикаторы которых составляли до 20% от общего количества индикаторных видов. Согласно индексу Пантале и Букк (1,93–2,47) исследованные участки рек соответствовали III классу качества вод и в основном β -мезосапробной зоне самоочищения, т.е. были умеренно загрязненными легкоусвояемыми органическими веществами, но обладали достаточной степенью экологической устойчивости и самоочистительным потенциалом речной экосистемы.

Ключевые слова: биоиндикация; фитопланктон; диатомовые водоросли; индекс сапробности; Ростовская область

The paper presents the results of a preliminary bioindication of some reservoirs of the Rostov region (rivers Seversky Donets, Kundryuchya, Temernik, Mokryj Chaltyr, Mius, Olkhovchik). The analysis showed that there is a large species diversity of algae in the reservoirs. The values of the Shannon diversity index (1,74–2,91) and the evenness index (0,30–0,76) indicate the complexity of the structure and high biodiversity of the phytoplankton community. Diatoms were the main component of phytoplankton that allowed bioindication. They accounted for up to 20% of the total number of indicator species. The saprobic index (1,93–2,47) correspond to the III class of water quality and is mainly a β -mesosaprobic zone. They are waters slightly polluted with organic substances, but they have a sufficient degree of environmental sustainability and self-cleaning potential of the river ecosystem.

Keywords: bioindication; phytoplankton; diatoms; saprobity index; Rostov region

Одним из важнейших компонентов водных систем считается фитопланктон, который активно участвует в формировании качества воды и является чутким показателем состояния водных экосистем в целом. По результатам многолетних наблюдений составлены списки характерных видов водорослей для той или иной экологической группировки (Барина и др., 2000; Стрельникова, Гладенков, 2019), из

которых около 75% составляют диатомовые, т.к. именно их биоиндикационные свойства изучены более полно, чем у других групп водорослей. Диатомовые водоросли являются одной из доминирующих по численности, продуктивности и таксономическому разнообразию групп планктона и встречаются в водных экосистемах в любое время года. Их высокая чувствительность к изменениям окружающей среды позволяет с высокой точностью определить экологическую обстановку водоема, степень антропогенной нагрузки, регистрировать ответные реакции водных экосистем на климатические трансформации. На этой основе также созданы экологические классификации диатомей по их отношению к разнообразным факторам внешней среды, среди которых выделяют систему галобности, кислотности, сапробности, что делает данную группу водорослей достаточно универсальным объектом биоиндикации как для воссоздания палеообстановок прошлых геологических эпох по ископаемым диатомовым, так и для определения современного состояния среды по ныне живущим представителям (Прошкина-Лавренко, 1953; Dam et al., 1994; Баринаова, Медведева, 1996; Баринаова и др., 2000; Денисов, Косова, 2018; Стрельникова, Гладенков, 2019).

Положение области в степной зоне юга европейской части России определяет слабое развитие гидрографической сети. Природно-климатические условия предопределили формирование определенного химического состава речных вод бассейна Нижнего Дона – однородного для левобережных районов, в то время как в правобережных районах он более разнообразен, в частности, по содержанию катионов. По классификации О.А. Алекина последние, в основном, относятся к водам сульфатного класса, натрий-кальцевой группы, II типа. Важно подчеркнуть, что речные системы правобережных районов в отличие от левобережных находятся еще и под мощным техногенным воздействием объектов угледобывающей отрасли (Восточный Донбасс) (Закруткин и др., 2018). В связи с этим *целью работы* было провести оценку качества вод некоторых правобережных притоков р. Дон и Таганрогского залива Азовского моря в пределах Ростовской области (далее – РО) по показателям фитопланктонного сообщества: р. Северский Донец и его приток р. Кундрючья; реки Темерник, Мокрый Чалтырь, Миус и его приток р. Ольховчик. Исследование проводили преимущественно в их устьевых районах в марте – мае и октябре 2018–2020 и 2022 гг.

Для оценки качества вод водоемов степной зоны РО был использован индекс сапробности Р. Пантле и Г. Букк в модификации В. Сладечека (Sládeček, 1973; Абакумов, 1983; Баринаова, Медведева, 1996; Шитиков и др., 2003), выбранный как универсальный и наиболее удобный применительно к организмам планктона и к любым водоемам. Для оценки биоразнообразия фитопланктона был проведен анализ таксономического состава водорослей, рассчитан их вклад в суммарные численность и биомассу, а также оценены разнообразие видов и их выравненность в сообществе с помощью индексов Шеннона и выравненности (по основанию 2) (Песенко, 1982; Шитиков и др., 2003).

Результаты проведенной оценки показали, что для р. Кундрючья в месте ее впадения в р. Северский Донец в октябре 2020 г. значение индекса сапробности соответствовало 2,17, видов-индикаторов было отмечено 51% от общего числа видов. Данное значение характеризует этот участок акватории как β-мезосапробную зону и позволяет его отнести к III классу чистоты вод (Абакумов, 1983). Видовое разнообразие было достаточно высоким – отмечено 55 видов из 6 отделов, о чем также свидетельствует индекс разнообразия (2,48 бит/экз.), однако их выравненность не была полной (0,43 бит/экз.). Доминирование по биомассе принадлежало отделам Cryptophyta (39% от суммарного показателя за счет развития вида *Cryptomonas cf. rostrata* Troitzkaja), Dinophyta (27% за счет видов *Unruhadinium penardii* (Lemmermann) Gottschling, *Chimonodinium cf. lomnickii* (Wołoszyńska) Craveiro, Calado, Daugbjerg, Hansen & Moestrup) и Chlorophyta (19% за счет *Coelastrum microporum* Nägeli). Субдоминирующее

положение принадлежало диатоме *Ulnaria ulna* (Nitzsch) Compère. Вклад представителей диатомовых водорослей в суммарные количественные показатели и видовое разнообразие на данной акватории был небольшим: 12, 3 и 27% от общей биомассы, численности и общего количества видов соответственно.

Анализ оценки состояния устья р. Северский Донец, наиболее крупного притока р. Дон, с помощью индекса сапробности в мае 2018 г. показал, что 49% определенных видов водорослей (55) являются индикаторами сапробности, среди которых 24% от общего числа видов принадлежало представителям зеленых водорослей и 16% – диатомеям. Значение индекса сапробности (2,47) характеризовало данную акваторию как β - α -мезосапробную зону органического загрязнения. Структуру фитопланктона определяли зеленые (42% от общей биомассы и 90% от общей численности), динофитовые (37% и 0,4% соответственно), диатомовые (10% и 3%) и криптофитовые водоросли (9% и 6%). Доминирующий комплекс формировали мелкоклеточные зеленые водоросли (cf. *Chlorella*) и виды динофитовых *Peridiniopsis* sp. и *Gymnodinium* sp. Из представителей диатомовых в основном развивался вид *Stephanodiscus* cf. *hantzschii* Grunow, но их вклад в суммарные показатели фитопланктона был также невелик. Индексы разнообразия видов и выравненности составляли 1,74 и 0,30 бит/экз. соответственно.

Результаты исследования другого притока – р. Темерник, расположенного ниже г. Ростова-на-Дону, в дельте р. Дон, в марте 2022 г. показали, что 48% видов водорослей – индикаторы сапробности. Индекс Пантле–Букк составил 2,37, что характерно для β - α -мезосапробной зоны и III класса качества вод. Основу фитоценотической структуры создавали эвгленовые, диатомовые, зеленые и криптофитовые водоросли. Наибольший вклад в общую биомассу принадлежал отделам Euglenophyta (58%) и Bacillariophyta (32%), а в численность – Chlorophyta (72%), Bacillariophyta (15%) и Euglenophyta (10%). Руководящий комплекс фитопланктона составляли виды эвгленовых водорослей *Euglena intermedia* var. *klebsii* Lemmermann, *Euglena* cf. *viridis* (Müller) Ehrenberg и диатомея *S. hantzschii*. Субдоминирующими видами были диатомеи *Navigeia decussis* (Østrup) Bukhtiyarova, *Surirella brebissonii* Krammer & Lange-Bertalot и *Tryblionella* cf. *hungarica* (Grunow) Frenguelli. Из обнаруженных 49 видов наибольшее количество принадлежало диатомовым (41% от общего видового разнообразия), эвгленовым (29%) и зеленым водорослям (22%). Индекс разнообразия фитопланктона данной акватории составил 2,40 бит/экз., а выравненности – 0,43 бит/экз., что выше, чем в рр. Кундрючья и Северский Донец.

В устье р. Мокрый Чалтырь (приток Мертвого Донца – один из рукавов дельты Дона, представляющий собой балку с постоянно текущей родниковой водой) в марте 2019 г. индекс сапробности составил 2,07, что соответствует III классу качества вод. Оценка состояния акватории по индикаторным видам (62% от общего количества видов) указывает на то, что она относится к β -мезосапробному водоему. Индексы разнообразия и выравненности были высокими и составили 2,87 и 0,76 бит/экз. соответственно. В составе фитопланктона было выявлено 45 видов водорослей из семи отделов. Среди них высоким видовым разнообразием отличались зеленые (38% от общего видового состава) и диатомовые водоросли (36%). Доминирование принадлежало отделам Bacillariophyta (63 и 43% от суммарной биомассы и численности за счет интенсивного развития вида *Stephanocyclus meneghinianus* (Kützing) Kulikovskiy, Genkal & Kociolek) и Chlorophyta (14 и 43% соответственно за счет развития *Scenedesmus quadricauda* (Turpin) Brébisson).

Река Ольховчик является правым притоком р. Миус и частью водной системы Миус – Азовское море. В месте ее впадения в р. Миус в апреле 2019 г. значение индекса сапробности составило 2,02, что соответствует β -мезосапробной зоне. Среди обнаруженных видов 62% были водоросли с известным отношением к степени

органического загрязнения, из которых 46% видов-индикаторов были представители зеленых водорослей и 21% – диатомовых. Основу структуры фитопланктона определяли диатомовые (58 и 63% от суммарной биомассы и численности), криптофитовые (21 и 7% соответственно), динофитовые (9 и 1%), зеленые (4 и 21%), золотистые водоросли (2 и 6%) и цианобактерии (5 и 2%). Доминирующими были отмечены диатомовые виды *Fragilaria cf. crotonensis* Kitton, *Nitzschia acicularis* (Kützing) Smith, субдоминантом была криптофитовая водоросль *Cryptomonas cf. pyrenoidifera* Geitler. Индекс Шеннона здесь составил 2,91 бит/экз., индекс выравненности – 0,55 бит/экз.

В нижнем течении р. Миус в апреле 2019 г. основу структуры альгоценоза составляли цианобактерии (37 и 53% от суммарной биомассы и численности), эвгленовые (34 и 6% соответственно), диатомовые (15 и 19%), динофитовые (9 и 6%), криптофитовые (4 и 7%) и зеленые водоросли (1 и 14%). Доминирующими видами были цианобактерия *Anagnostidinema cf. amphibium* (Agardh ex Gomont) Strunecký, Bohunická, Johansen & Komárek и диатомея *Diatoma tenuis* Agardh. Наибольшим видовым разнообразием отличались отделы Bacillariophyta, Chlorophyta (по 11 видов) и Cyanobacteria (7 видов). Значение индекса Шеннона было равным 2,71 бит/экз., а выравненность сообщества составила 0,52 бит/экз. Из общего количества отмеченных видов 59% являлись видами-индикаторами сапробности, среди которых 19 и 16% принадлежало зеленым и диатомовым водорослям соответственно. Расчет индекса Пантле–Букк показал, что данный участок р. Миус также соответствовал β-мезосапробной зоне – значение индекса было 1,93.

Таким образом, предварительная оценка исследованных участков рек свидетельствует о том, что в этих водоемах достаточно большое видовое разнообразие водорослей, а по значениям индекса сапробности они могут быть отнесены к водам удовлетворительной чистоты. Значения индексов разнообразия (1,74–2,91) и выравненности (0,30–0,76) указывают на сложность структуры и высокое биоразнообразие фитопланктонного сообщества. Согласно индексу Пантле–Букк (1,93–2,47) данные водоемы соответствуют III классу качества вод и в основном β-мезосапробной зоне самоочищения, т.е. являются умеренно (слабо) загрязненными органическими веществами, но находятся в стадии еще обратимых изменений – обладают достаточной степенью экологической устойчивости и самоочистительным потенциалом речной экосистемы. Одним из основных компонентом фитопланктона, позволившим провести биоиндикационную оценку, были диатомовые водоросли, виды-индикаторы которых составляли до 20% от общего количества индикаторных видов. Однако следует отметить, что в зависимости от сезона года сапробность водоема может различаться, поэтому для достоверной оценки качества вод следует учитывать данные сезонных наблюдений.

Работа выполнена в рамках ГЗ НИР ЮНЦ РАН № 122011900153-9.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Абакумов В.А. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 240 с.
2. Барина С.С., Медведева Л.А. Атлас водорослей-индикаторов сапробности (российский Дальний Восток). – Владивосток: Дальнаука, 1996. – 364 с.
3. Барина С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. Водоросли-индикаторы в оценке качества окружающей среды. – М.: ВНИИприроды, 2000. – 150 с.

4. Денисов Д.Б., Косова А.Л. Диатомовые водоросли в оценке качества вод озерно-речной системы Паз // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2018. № 15. С. 449–452. DOI: <https://doi.org/10.31241/FNS.2018.15.114>.
5. Закруткин В.Е., Решетняк О.С., Гибков Е.В. Эколого-гидрохимические особенности речных вод степной зоны юга России (в пределах Ростовской области) // Степи Северной Евразии: материалы VIII междунар. симпозиума (Оренбург, 9–13 сентября 2018 г.). – Оренбург, 2018. – С. 379–383.
6. Песенко Ю.А. Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях. – М.: Наука, 1982. – 288 с.
7. Прошкина-Лавренко А.И. Диатомовые водоросли – показатели солености воды // Прошкина-Лавренко А.И., Шешукова В.С. (отв. ред.). Диатомовый сборник. – Л.: Изд-во Ленинградского Государственного ордена Ленина университета им. А.А. Жданова, 1953. – С. 186–205.
8. Стрельникова Н.И., Гладенков А.Ю. Диатомовые водоросли и их использование в стратиграфических и палеогеографических исследованиях // Вопросы современной альгологии. 2019. Т. 20, № 2. С. 1–38. DOI: [https://doi.org/10.33624/2311-0147-2019-2\(20\)-1-38](https://doi.org/10.33624/2311-0147-2019-2(20)-1-38).
9. Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. – Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. – 463 с.
10. Dam H., Mertens A., Sinkeldam J. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from the Netherlands // Netherlands Journal of Aquatic Ecology. 1994. V. 28, № 1. P. 117–133. DOI:10.1007/bf02334251.
11. Sládeček V. System of Water Quality from the Biological Point of View // Archiv für Hydrobiologie. Beiheft 7. Ergebnisse der Limnologie. Helft 7. 1973. 218 S.

Почвенные диатомовые водоросли районов нефтепромыслов

Soil diatoms of oilfield areas

Дорохова М.Ф.

Marina F. Dorokhova

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
географический факультет (Москва, Россия)

dorochova@mail.ru

Представлены результаты изучения диатомовых водорослей в почвах нефтедобывающих районов России. Показан вклад кировской школы альгологов в развитие представлений о разнообразии почвенных диатомовых водорослей в нефтедобывающих районах и возможности их использования для биоиндикации состояния техногенно трансформированных почв.

Ключевые слова: диатомовые водоросли; почвы; нефтепромыслы; нефть, сточные воды

The results of the study of soil diatoms in oil production areas of Russia are presented. The contribution of the Kirov school of algologists to the development of ideas about the diversity of soil diatoms in oil-producing areas and the possibility of their use for bioindication of the state of technogenically transformed soils is shown.

Keywords: diatoms; soils; oil fields; oil; oil wastewater

Введение. Как известно, диатомовые водоросли успешно используются в палеогеографических исследованиях и при изучении качества воды. Между тем их потенциал в биоиндикационных исследованиях состояния почв, в том числе испытывающих антропогенное воздействие, в настоящее время реализован не в полной мере. Примером успешного применения диатомовых водорослей для выявления основных направлений трансформации почв являются районы нефтепромыслов.

Основные результаты исследований. Почвенные диатомовые водоросли в районах добычи и транспортировки нефти изучались как компонент альгоцианобактериальных сообществ с середины 1970-х годов. Большой вклад в становление метода альгоиндикации нарушенных почв и эффективности приемов их рекультивации внес коллектив альгологов под руководством профессора Эмилии Адриановны Штиной – Клара Анатольевна Некрасова, Евгения Аркадьевна Бусыгина, Лия Борисовна Неганова, Татьяна Анатольевна Ельшина, одним из первых включившийся в «нефтяную тематику» в соответствии с Программой экологических исследований АН СССР. Уникальность этих исследований состояла в их комплексности: в них приняли участие альгологи, ботаники, почвоведы-геохимики, микробиологи, зоологи, нефтяники – представители Московского, Казанского, Пермского государственных университетов, нескольких учебных и научно-исследовательских институтов, в том числе институтов Министерства нефтяной промышленности СССР.

В задачи альгологических исследований входило изучение видового разнообразия почвенных водорослей и цианобактерий и поиск видов, индицирующих

разные направления техногенного изменения почв в районах нефтепромыслов (Штина, Некрасова, 1988).

В ходе альгологических исследований для выявления диатомовых водорослей применялся метод стекол обрастания с последующим изготовлением постоянных препаратов (Голлербах, Штина, 1969). Видовая идентификация проводилась по Определителю пресноводных водорослей СССР (Забелина и др., 1951). Другие определители нашим исследователям были недоступны.

Пионерной работой, выполненной под руководством Э.А. Штиной по Программе экологических исследований, стало изучение альго-цианобактериальных сообществ почв долины р. Обь в двух нефтедобывающих районах Тюменской области (Неганова и др., 1978). Впервые было установлено, что важным фактором разнообразия микрофототрофов (в том числе диатомовых водорослей) в загрязненных нефтью почвах (помимо уровней загрязнения) является наличие-отсутствие напочвенного покрова и верхних почвенных горизонтов. На чистых песчаных отложениях, образующихся при уничтожении основных горизонтов изученных почв, было выявлено 6 видов почвенных диатомовых водорослей (в то время как в ненарушенных подзолах под сосновыми лесами они обнаружены не были). Сильное загрязнение нефтью и выжигание нефти на таких же субстратах сокращает разнообразие диатомовых соответственно до 2 и 1 вида. Таким образом, эти исследования показали, с одной стороны, высокую чувствительность диатомовых водорослей к нефти, а с другой стороны – недопустимость применения выжигания нефти на поверхности почв как приема рекультивации.

В тесном сотрудничестве с почвоведом-геохимиком МГУ альгологическими исследованиями в период конца 1970-х – начала 1980-х годов были охвачены почвы разнообразных техногенных местообитаний на территории нефтедобывающих районов Пермского Прикамья: датированные участки разливов буровых и нефтяных сточных вод, аварийных разливов нефти, рекультивированные участки нефтезагрязненных почв. В ходе этих работ Т.А. Ельшиной под руководством Э.А. Штиной была выполнена и впоследствии блестяще защищена кандидатская диссертация (Ельшина, 1986).

Впервые было показано, что характер трансформации альго-цианобактериальных сообществ в районах нефтепромыслов определяется интенсивностью и направлением изменения свойств почвы. Т.А. Ельшиной было обнаружено в общей сложности 17 видов диатомовых водорослей: 7 видов – в почвах, загрязненных сырой нефтью (спустя 1 год и 20 лет после загрязнения), 16 видов – в почвах, загрязненных нефтяными минерализованными сточными водами (спустя 1, 3 года и 18 лет после загрязнения почвы).

Полученные материалы позволили показать особенности альго-цианобактериальных группировок почв, испытавших разные формы техногенного воздействия и находящихся на разных стадиях посттехногенной эволюции и дали ключ к выявлению индикаторных групп водорослей и цианобактерий техногенно трансформированных дерново-подзолистых почв в изученном нефтедобывающем районе (Ельшина, 1986; Штина, Некрасова, 1988). В трансформированных дерново-подзолистых почвах, испытавших загрязнение минерализованными нефтяными сточными водами, диатомовые водоросли являются индикатором стадии техногенного осолодения. В этих почвах комплекс диатомовых наиболее разнообразен и представлен 16 видами. Характерными его компонентами являются алкалофильные галофильные виды – как гидрофильные, так и эдафофильные. Состав диатомовых водорослей и в целом альго-цианобактериальных сообществ, развивающихся в этих почвах, отражает основные направления изменения их свойств – повышенный уровень увлажнения, щелочную реакцию среды и наличие растворимых солей в почвенном растворе.

Талантливым развитием «нефтяной» тематики стали работы Натальи Михайловны Зимониной, представительницы Кировской школы почвенной альгологии,

на территории Возейского месторождения нефти. Альго-цианобактериальные сообщества изучены ею в почвах, подвергшихся разнообразным формам воздействия нефтепромысла: загрязнению нефтью и буровыми сточными водами с сохранением целостности почвенного профиля, механическому уничтожению верхних почвенных горизонтов, выжиганию нефти, замещению верхних горизонтов техногенными субстратами на буровых и кустовых площадках, в днищах котлованов-отстойников и на участках «пескования» нефтяных разливов. В монографии, обобщившей основные результаты исследований, представлен обширный список водорослей и цианобактерий, насчитывающий 204 вида, из них 10 видов диатомовых водорослей, обнаруженных в техногенно трансформированных почвах и на насыпных субстратах (Зимонина, 1998). Род *Pinnularia* (4 вида) является в нефтезагрязненных почвах района исследования с насыпными субстратами одним из ведущих при слабом загрязнении. На насыпных грунтах при их среднем и сильном загрязнении нефтью диатомовые водоросли не развиваются.

В этой же монографии приведен список водорослей и цианобактерий нефтезагрязненных почв (в него не включены виды, отмеченные Т.А. Ельшиной для почв, испытавших загрязнение минерализованными нефтяными сточными водами), составленный Н.М. Зимониной по имевшимся на момент написания монографии литературным материалам, относившимся к почвам юной тайги и лесостепи. В нем из 133 видов микрофототрофов диатомовых водорослей насчитывается всего 8 видов.

В целом к 2000 году о диатомовых водорослях почв районов нефтепромыслов было известно, что: 1) они чувствительны к углеводородному загрязнению почв и грунтов и не развиваются при сильном загрязнении; 2) их видовой состав может быть весьма разнообразным в случаях активного самоочищения загрязненных почв от углеводородов (например, при дополнительном поступлении влаги и длительном периоде посттехногенной трансформации загрязненных почв, как это наблюдается, например, в подзоне южной тайги спустя 18-20 лет после загрязнения); 3) диатомовые водоросли обладают высоким биоиндикационным потенциалом и могут использоваться при мониторинге состояния и оценке состояния рекультивированных почв в районах нефтепромыслов. К 2000 году в почвах районов нефтепромыслов был обнаружен 21 вид диатомовых водорослей.

Исследования, проведенные на территории нефтяных месторождений Калининградской области начиная с 2001 года, включавшие и полевые эксперименты по загрязнению почв разными дозами нефти (сырой и товарной), дополнили сведения о диатомовых водорослях районов нефтепромыслов. Установлено, что (Dorokhova, 2007):

1) однократное сильное загрязнение почв сырой нефтью (доза нефти 100 л/м²) сильно подавляет развитие диатомовых – их численность падает ниже предела чувствительности метода количественного учета через 7 дней после внесения поллютанта;

2) в условиях таежной зоны при высоких скоростях самоочищения верхних горизонтов от нефти восстановление группировок водорослей, включающих диатомовые, начинается через 1 год после загрязнения почвы;

3) влияние нефти на водоросли определяется остаточной величиной содержания углеводородов в корнеобитаемом слое почвы (зависящей от скорости самоочищения почвы);

4) хроническое слабое загрязнение почв поверхностными и внутрипочвенными водами от кустовых и буровых площадок, в краевых зонах аварийных разливов сырой нефти и нефтяных сточных вод вызывает коренную перестройку альго-цианобактериальных сообществ и комплекса диатомовых в том числе: возрастание доли гидрофильных и амфибиальных видов, преобладание галофильных и алкалифильных видов;

5) изменения в составе комплекса диатомовых водорослей отражают основные направления трансформации свойств почв – углеводородное загрязнение, усиление в них восстановительных процессов, засоление, подщелачивание.

Заключение. В настоящее время в почвах районов нефтепромыслов России обнаружено 42 вида диатомовых водорослей, что, безусловно, далеко от реального их разнообразия. Дальнейшее пополнение сведений о биоразнообразии диатомовых водорослей может быть обеспечено более детальным изучением техногенно трансформированных местообитаний в районах нефтепромыслов, с одной стороны, и более точной их идентификацией – с другой. Исследования в этом направлении важны для углубления знаний об экологии и биогеографии видов и разработки методов альгоиндикации состояния нарушенных и рекультивированных почв.

Выражаю безграничную благодарность моему учителю – Эмили Адриановне Штиной – и замечательному исследователю, геохимику-почвоведу Нине Петровне Солнцевой за всестороннюю поддержку и помощь.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Голлербах М.М., Штина Э.А. Почвенные водоросли. – Л.: Наука, 1969. – 228 с.
2. Ельшина Т.А. Почвенные водоросли как индикаторы некоторых видов техногенного загрязнения почвы (на примере загрязнений, связанных с нефтедобычей). – Автореф. дис...канд. биол. наук. – Л.: ЛГУ, 1986. – 16 с.
3. Забелина М.М., Киселев И.А., Прошкина-Лавренко А.И., Шешукова В.С. Определитель пресноводных водорослей СССР. Диатомовые водоросли. – М.: Сов. наука, 1951. Вып. 4. – 619 с.
4. Зимонина Н.М. Почвенные водоросли нефтезагрязненных земель. – Киров: Вятский государственный педагогический университет, 1998. – 170 с.
5. Неганова Л.Б., Шилова И.И., Штина Э.А. Альгофлора техногенных песков нефтегазодобывающих районов Среднего Приобья и влияние на нее нефтяного загрязнения // Экология. 1978. №3. С. 29–35
6. Штина Э.А., Некрасова К.А. Водоросли загрязненных нефтью почв // Восстановление нефтезагрязненных почвенных экосистем. Глазовская М.А. (ред.). – М.: Наука, 1988. – 254 с.
7. Dorokhova M.F. Diatoms as indicators of soil condition in oil production regions // Oceanological and Hydrobiological Studies. 2007. V. XXXVI, Suppl.1. P. 129–135.

Структура и продуктивность фитопланктонного сообщества на юго-западе Карского моря в начале летнего периода

Structure and productivity of the phytoplankton community in the southwestern Kara Sea in early summer

Дружкова Е.И.¹, Венгер М.П.¹, Сажин А.Ф.²

Elena I. Druzhkova, Marina P. Venger, Andrey F. Sazhin

¹Мурманский морской биологический институт РАН (Мурманск, Россия)

²Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН (Москва, Россия)

druzhkova.elena@yandex.ru

В результате исследований, проведенных в июле 2018 г. в юго-западной части Карского моря, выявлено, что в период начала подвижки сезонных льдов пелагический фитоценоз находился на стадии ледового/прикромочного цветения, которые реализовывались в рамках единого пространственно-временного поля. Отличительными чертами организации сообщества пелагических микроводорослей были характерный набор доминант и мозаичная структура пелагиали. Мозаичность морского фитопланктона определяется взаимодействием между физическими факторами среды и биологической активностью популяций микроводорослей. В данном случае пелагический фитоценоз представлял собой сеть ограниченных локальными фронтальными разделами короткоживущих бассейнов с преимущественным развитием отдельных видов/видовых комплексов на фоне функционирования базового кластера ранневесенних криофильных диатомей.

Ключевые слова: Карское море; прикромочное цветение; фитопланктон; диатомовый комплекс

As a result of research conducted in July 2018 in the southwestern part of the Kara Sea, it was revealed that during the period of the beginning of the seasonal ice shift, the pelagic phytoceen was at the stage of ice/marginal bloom, which was realized within a single spatiotemporal field. Distinctive features of the organization of the community of pelagic microalgae were a characteristic set of dominants and a mosaic structure of the pelagial. The mosaic pattern of marine phytoplankton is determined by the interaction between physical environmental factors and the biological activity of microalgae populations. In this case, the pelagic phytocene was a network of short-lived basins limited by local frontal sections with the predominant development of individual species/species complexes against the background of the functioning of the basic cluster of early spring cryophilic diatoms.

Keywords: Kara Sea; marginal bloom; phytoplankton; diatom complex

Анализ функционирования планктонных сообществ – ключевой момент изучения функционирования пелагических экосистем арктических морей как в условиях естественных климатических изменений, так и под влиянием постоянно возрастающей антропогенной нагрузки. В этом контексте экосистема Карского моря – довольно мелководного участка Арктического шельфа, на долю которого приходится более 40% всего пресного стока (Маккавеев et. al., 2015) – рассматривается как важнейшее звено в глобальном цикле углерода. Наибольший интерес представляют районы повышенной продуктивности, такие как зоны фронтальных разделов различного генезиса (в частности, зона раздела «река–море» и зона дрейфующих льдов).

Несмотря на достаточно большое количество работ, посвященных исследованию количественных и продукционных характеристик фитопланктона карскоморского шельфа в различные сезоны (ранневесенний, позднелетний, осенний) (Sazhin et.al., 2017, Vedernikov et. al., 1994, Nöthig et. al., 2003), короткий раннелетний период остается до настоящего времени практически не изученным. Особенностью фенологического периода между весной и летом является одновременное функционирование планктонных сообществ в условиях таяния льда в западной части акватории и под максимальным воздействием стока рек Оби и Енисея в восточной. Гипотеза, которая лежит в основе данного исследования, заключается в том, что видовое разнообразие и обилие фитопланктона достигают максимума именно в начале лета.

Таким образом, *цель* настоящего исследования – оценить численность и активность карскоморского фитопланктона в зоне и вне зоны влияния пресного стока в раннелетний период – период таяния сезонных льдов.

Пробы фитопланктона были отобраны с борта судна «Норильский никель» по курсу следования с поверхностного горизонта на 25 станциях в два этапа:

этап I) 29 июня – 1 июля от Баренцева моря через Карские Ворота вдоль побережья полуострова Таймыр до эстуария реки Енисей (ст. 1–14) и

этап II) 12–15 июля на обратном пути от Енисейского залива до Карских Ворот (ст. 15–25).

По данным солености на исследованном участке акватории были выделены 3 зоны: морская к западу от п-ова Ямал (соленость 26,9–33,4 psu), эстуарная в Енисейском заливе (0–2,2 psu) и промежуточная фронтальная (11,0–15,5 psu).

Всего за период исследований на акватории юго-западной части Карского моря зафиксировано 89 видов и надвидовых таксонов пелагических водорослей, большая часть из которых (65%) принадлежит к отделу Bacillariophyta.

Этап I: 29.06–1.07. Общая численность фитопланктона колебалась от 153 до 1528×10^3 кл./л при биомассе 2,78–230,72 мгС/м³. Структурная основа пелагического фитоценоза была представлена следующим видовым кластером: комплекс центрических диатомовых р. *Thalassiosira* (*T. hyalina*, *T. decipiens*, *T. gravida*, *Thalassiosira spp.* (мелк.)), колониальные (*Pauliella taeniata*, *Navicula vanhoeffenii*, *Pseudo-nitzschia seriata f. seriata*) и одиночные (*Nitzschia longissima*) формы пеннатных диатомовых, автотрофные (*Peridiniella catenata*) и гетеротрофные (*Protoperidinium bipes*) динофитовые, эвгленовые (*Eutreptiella braarudii*, *Eutreptiella sp.*) водоросли и автотрофная инфузория *Myrionecta rubra*. Доля мелких флагеллят была значительной (22–99%) только в зоне таяния льда, на остальных участках акватории не превышая 1,8%.

В морской зоне, на станциях, находившихся под сплошным ледовым покровом, наряду с базовым комплексом *Pauliella taeniata* и *Thalassiosira spp.*, зафиксировано цветение криофлоры. В пелагиали активно развивались симпагические виды *Nitzschia frigida* и *Melosira arctica var. bornholmiensis* с относительной численностью 26–27% и биомассой 5–6%. Далее по разрезу по мере удаления от ледовой кромки оба вида полностью исчезают из пелагиали, лидирующее положение в сообществе занимает комплекс *Chaetoceros* (80% от совокупной численности и 29% от совокупной биомассы микрофитопланктона), что характерно для ранневесеннего (прикромочного) цветения (Макаревич, Олейник 2017). При этом базовый комплекс видов продолжает активно вегетировать, общая численность сообщества возрастает в 9 раз (до 130×10^3 кл./л), биомасса – в 1,5 раза. Далее доля *Chaetoceros* постепенно снижается на фоне развития базового комплекса и дальнейшего роста количественных показателей: численность планктонных водорослей увеличивается в 2,2 раза, биомасса – в 2,6 раз. В западной части морской зоны сообщество микрофитопланктона подвергается значительной структурной реорганизации. Рост численности р. *Thalassiosira* продолжается, при этом часть видов переходит в стадию спорообразования, относительная доля комплекса видов

Chaetoceros уменьшается до 17%, *Pauliella taeniata* – до 8% от совокупной численности микроводорослей. В то же время в пелагиали активно развивается комплекс ранневесенних колониальных пеннатных диатомей (*Fragilariopsis oceanica*, *Navicula vanhoeffenii*, *Navicula septentrionalis*), что характерно для периода цветения криофлоры/прикромочного цветения арктических морей (Rat'kova, Wassmann, 2005). Изменение видового состава приводит к двукратному уменьшению общей численности при стабильной биомассе. Далее на восток ранневесенний пеннатный комплекс из пелагиали исчезает, общая численность микроводорослей падает до 128×10^3 кл./л.

Фронтальная зона характеризуется максимальным развитием базового комплекса: численность р. *Thalassiosira* превышает 130×10^3 кл./л, *Pauliella taeniata* – 1200×10^3 кл./л и *Navicula vanhoeffenii* – 437×10^3 кл./л (35%).

При переходе к эстуарной зоне зафиксирована кардинальная структурная перестройка пелагического фитоцена, показатели количественного развития базового комплекса резко падают: численность *Thalassiosira* в 9 раз, *Pauliella taeniata* – в 30 раз. И по численности (61%), и по биомассе (86%) в сообществе доминирует ледово-неритический вид *Fossula arctica*, субдоминирующее положение занимает комплекс мелкоклеточных видов р. *Chaetoceros*.

В Енисейском заливе – наиболее распресненной части исследованного участка акватории – пелагический фитоцен, соответственно, сформирован пресноводными видами: диатомовыми *Aulacoseira spp.* (в основном *A. granulata* и *A. italica*), 42% от совокупной численности и 75% от совокупной биомассы, *Asterionellopsis formosa* (27% от совокупной численности), и зелеными водорослями *Monoraphidium contortum*, *Pseudopediastrum boryanum*, *Scenedesmus quadricauda*.

Этап II: 13–15.07. В этот период колебания общей численности фитопланктона составили $16–1379 \times 10^3$ кл./л при биомассе 0,04–117,22 мкгС/м³. Основные изменения в структуре пелагического фитоцена были отмечены в морской зоне, где в состав доминирующего комплекса кроме описанного ранее базового комплекса *Pauliella taeniata* и *Thalassiosira gravida* вошли *Navicula septentrionalis*, *Peridiniella catenata* и *Eutreptiella sp.*, а также наблюдалось массовое развитие гетеротрофных динофлагеллят *Proto-peridinium breve*, *P. brevipes*, *P. granii* и *Gyrodinium lachryma*.

В эстуарной зоне количественные показатели и качественный состав пелагических микроводорослей в целом соответствует описанным для этапа I. Для фронтальной зоны, так же как и на этапе I, характерно активное развитие пелагиали базового комплекса (*Thalassiosira spp.* и *Pauliella taeniata*) и, кроме того, зафиксировано массовое цветение золотистой водоросли *Dinobryon balticum*. Общая численность фитопланктона (за исключением спор) достигает 361×10^3 кл./л, биомасса – 78,3 мкгС/м³. Далее на запад прослеживается четкая тенденция к снижению показателей количественного развития. На границе фронтальной и морской зоны численность микрофитов уменьшается в 5 раз, биомасса – в 4 раза, причем 22% приходится на долю колониальной динофлагелляты *Peridiniella catenata*, которая, являясь постоянным компонентом пелагического фитоцена на всей исследованной акватории, достигает заметного развития только на этом участке. Более того, при высоком коэффициенте флористического сходства (более 60%) общая численность микрофитопланктона в 50 раз, а биомасса – в 20 раз меньше значений, зафиксированных на этапе I. Далее по разрезу численность микроводорослей падает до 4–5 тыс. кл./л, биомасса (от 20 до 90% которой приходится на долю гетеротрофных динофлагеллят *Proto-peridinium breve*, *P. brevipes*, *P. pallidum*, *Gyrodinium lachryma*) не превышает нескольких десятков мкг/л.

Согласно последним представлениям в годовом сукцессионном цикле микрофитопланктона юго-западной части Карского моря выделяются 4 фазы: 1) цветение криофлоры (февраль), в сообществе доминируют *Amphiprora paludosa var. hyperborea*, *Nitzschia frigida*, *Thalassionema nitzschioides*; 2) прикромочное цветение (апрель),

доминанты *Thalassiosira Antarctica* var. *borealis*, *T. gravida*, *T. hyalina*, *Chaetoceros curvicutus*, *C. socialis*); 3) весенне-летнее цветение (июль), доминируют виры родов *Thalassiosira* и *Aulacoseira*, колониальные диатомовые (*Pauliella taeniata*, *Navicula septentrionalis*, *Pseudo-nitzschia seriata* f. *seriata*) и *Peridinella catenata*, а также гетеротрофные динофлагелляты и эуглениды; 4) фаза покоя (с конца сентября) (Макаревич, Олейник, 2009).

По результатам исследований, проведенных в июле 2018 г. в юго-западной части Карского моря показано, что высокий продукционный потенциал пелагического фитоценоза в начале летнего периода реализовался в виде мозаики короткоживущих бассейнов с различной структурной организацией сообщества микрофитопланктона в рамках единой стадии годового сукцессионного цикла – ледового/прикромочного цветения.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, проект № 22-17-00011.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Макаревич П.Р., Олейник А.А. Структура годового цикла развития фитопланктонного сообщества Обь-Енисейского мелководья Карского моря // Доклады академии наук. 2009. Т. 426. С. 397–399.
2. Макаревич П.Р., Олейник А.А. Микропланктон Баренцева моря: современный состав и структура в предзимний период // Вестник МГТУ. 2017. Т. 20. № 2. С. 316–325. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2017-20-2-316-325>
3. Makkaveev P.N., Melnikova Z.G., Polukhin A.A., Stepanova S.V., Khlebopashev P.V., Chultsova A.L. Hydrochemical characteristics of the waters in the western part of the Kara Sea // Oceanology. 2015. V. 55. P. 485–496. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0001437015040116>
4. Nöthig E.M., Okolodkov Y., Larionov V.V., Druzhkova E.I. Phytoplankton distribution in the inner Kara Sea: A comparison of three summer investigations // Proc. Mar. Sci. 2003. V. 6. P. 163–185. DOI: <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.804513>
5. Ratkova T.N., Wassmann P. Sea ice algae in the White and Barents seas: composition and origin. // Polar Res. 2005. V.24. P. 95–110. DOI: <https://doi.org/10.3402/polar.v24i1.6256>
6. Sazhin A.F., Mosharov S.A., Romanova N.D., Belyaev N.A., Khlebopashev P.V., Pavlova M.A., Druzhkova E.I., Flint M.V., Kopylov A.I., Zobotkina E.A. The plankton community of the Kara Sea in early spring // Oceanology. 2017. V. 57. P. 222–224. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse11040832>
7. Vedernikov V.I., Demidov A.B., Sudbin A.I. Primary production and chlorophyll in the Kara Sea in September 1993 // Oceanology. 1994. V. 34. P. 693–703.

Диатомовые водоросли крупных равнинных водохранилищ волжского бассейна: эколого-ценотические аспекты

Diatoms of large flat reservoirs of the Volga River basin: ecological and cenotic aspects

Корнева Л.Г.

Ludmila G. Korneva

Институт биологии внутренних вод имени И.Д. Папанина РАН (Борок, Россия)

korneva@ibiw.ru

На основании многолетних исследований фитопланктона водохранилищ волжского бассейна, начиная с 1950-х годов по настоящее время, представлены основные закономерности пространственно-временных изменений эколого-флористических и ценотических показателей диатомовых водорослей. Установлена связь видового богатства диатомей с морфометрией водоемов. Показано, что в условиях роста трофии вод и изменения климата на фоне увеличения разнообразия диатомей за счет чужеродных вселенцев, их биомасса начала снижаться. Весенний пик диатомей стал ниже летнего цианобактерий. Многолетнее варьирование биомассы диатомей было значительно сопряжено с изменением гидрометеорологических параметров. В структуре их доминирующих комплексов наблюдалось увеличение обилия лимнофильных видов, толерантных к высокому содержанию легкоусвояемого органического вещества и солей. Установлено влияние зональности на распределение эколого-флористических групп диатомей по продольному профилю водохранилищ.

Ключевые слова: фитопланктон; диатомовые водоросли; водохранилища волжского бассейна

Based on long-term studies of phytoplankton of the Volga River basin reservoirs, from the 1950s to the present, the main patterns of spatio-temporal changes in the ecological-floristic and coenotic parameters of diatoms are presented. A correlation was established between the species richness of diatoms and the morphometry of reservoirs. It is shown that under conditions of increasing trophy of reservoirs and climate change against the background of an increase in the diversity of diatoms due to alien invaders, their biomass began to decrease. The spring peak of diatoms became lower than the summer peak of cyanobacteria. The long-term variation of diatoms biomass was significantly associated with changes in hydrometeorological parameters. Between dominant species an increase of limnophilic species abundance tolerant to a high content of organic matter and salts was observed. The influence of zoning on the distribution of ecological and floristic groups of diatoms along the longitudinal profile of reservoirs has been established.

Keywords: phytoplankton; diatoms; reservoirs of the Volga River basin

Диатомовые водоросли – важнейший компонент планктонных сообществ континентальных водоемов. В водохранилищах волжского бассейна их видовое богатство составляет в среднем 28% от общего числа таксонов рангом ниже рода, обнаруженных в водоемах, уступая только зеленым водорослям (35%). Диатомовые доминируют в составе планктонных альгоценозов по биомассе круглогодично в ходе сезонного развития фитопланктона (Корнева, 2015).

Цель исследования – оценить динамику и распределение различных эколого-ценологических показателей диатомовых водорослей планктона водохранилищ волжского бассейна.

Крупнейшая река в Европе – Волга протяженностью 3530 км представляет цепочку водохранилищ, расположенных в различных географических зонах: лесной, степной, полупустыни, соединенных стоком и каналами с бассейнами Каспийского и Балтийского морей. На севере с ними соединяется Шекснинское водохранилище. Водоохранилища различаются по возрасту, морфометрии, гидрохимическим и гидрологическим параметрам, а также трофии вод. Минерализация воды (общая сумма ионов) увеличивается в сторону от Верхней (с севера) к Нижней Волге (на юг), что определяется географической зональностью.

Флористический анализ показал, что относительное число диатомовых водорослей увеличивалось в направлении от Верхней (26%), Средней (29%) к Нижней Волге (33%). Статистический анализ связи между богатством видов диатомей и различными морфометрическими, гидрологическими, гидрохимическими и биопродукционными характеристиками водохранилищ представил достоверную положительную связь богатства флор с морфометрическими показателями водоемов: площадью водоемов, площадью мелководий и морфометрическим коэффициентом (соотношение площади и средней глубины водоема). Наибольшее число диатомовых обнаружено в самых крупных водохранилищах: Куйбышевском, Шекснинском и Рыбинском. Во всех водохранилищах встречено 59 общих видов диатомей, что соответствовало 8% от их суммарного числа. Кластеризация водохранилищ по составу диатомовых показала, что наибольшим своеобразием водорослей отличались Куйбышевское, принимающее сток камских вод, и самое северное – Шекснинское водохранилище. Наибольшее сходство флор обнаружилось у рядом расположенных водохранилищ Нижней Волги (Саратовского и Волгоградского) и Верхней Волги (Иваньковского и Угличского). Водоохранилища Верхней и Средней Волги образовывали отдельный кластер от нижеволжских. Родовой коэффициент (число видов/число родов), независимый от площади исследования показатель систематического разнообразия, значительно варьировал в водохранилищах (3,6–7,8) и положительно коррелировал с числом видов ($r = 0,98$), увеличиваясь в направлении от Верхней к Нижней Волги о мере роста видового богатства диатомей. Соотношение центрических и пеннатных диатомовых снижалось от Верхней (0,18) → Средней (0,16) → к Нижней Волге (0,15), а таковое бесшовных пеннатных и центрических: 1,65 → 1,17 → 1,15, соответственно. Это обусловлено постепенным увеличением числа видов из порядка *Thalassiosirales* с севера на юг по мере роста минерализации воды ($r = 0,76$).

Географическая зональность в распределении диатомовых водорослей от Верхней к Нижней Волги проявлялась в постепенном увеличении относительного числа бентосных видов, мезогалобов, и снижении числа планктонных видов, галофобов и ацидофилов, что связано с увеличением в водохранилищах Нижней Волги, расположенной в аридной зоне, скорости течения, минерализации и снижением боковой приточности.

В направлении от Верхней к Нижней Волге численность лимнопланктонных видов *Stephanodiscus binderanus* (Kützing) Krieger и *S. hantzchii* Grunow снижалась в отличие от днепровских водохранилищ, где численность *S. binderanus* возрастала вверх по течению реки, что, по мнению А.Д. Приймаченко (Приймаченко, 1973), связано с последовательностью наполнения днепровских водохранилищ, которое осуществлялось снизу вверх. Число доминирующих по биомассе видов диатомовых в волжских водохранилищах снижалось также вниз по течению с 21 до 9.

Волго-Балтийский «коридор» создал условия беспрепятственного перемещения различных чужеродных видов – вселенцев диатомовых водорослей с юга на север и наоборот (Slynko et al., 2002). В расселении чужеродных диатомовых в Волге выделено два периода: начало 1960-х и середина 1980-х годов XX в. Первый период, совпадавший

с завершением основного гидростроительства на Волге, характеризовался появлением и натурализацией понто-каспийских видов: *Skeletonema subsalsum* (A. Cl.) Bethge и *Thalassiosira incerta* Makar.. Второй, совпадавший с очередной трансгрессией уровня Капийского моря, характеризовался появлением и натурализацией *Actinocyclus normanii* (Greg.) Hust. и увеличением числа новых видов из рода *Thalassiosira* (Корнева, 2014). Оба периода соответствовали многоводной фазе колебаний общей увлажненности бассейна Волги и снижению видового богатства фитопланктона и числа доминирующих таксонов, что способствовало освобождению новых экологических пространств.

В условиях роста трофии вод и изменения климата анализ многолетней сукцессии (1953–2014 гг.) фитопланктона Рыбинского водохранилища, второго по размеру в каскаде водохранилищ Волги показал, что на фоне цикличности суммарной биомассы фитопланктона, сходной с колебанием северо-атлантической осцилляции, средняя пропорция биомассы диатомовых водорослей в общей биомассе фитопланктона постепенно снижалась с 1954–1989 гг. (68%) по 1999–2014 гг. (24%) (Корнева, 2015; Корнева и др., 2018). Внутрисезонный максимум биомассы фитопланктона Рыбинского водохранилища, обусловленный летним развитием цианобактерий, стал превышать весенний пик диатомей. При увеличении отрицательных отклонений биомассы водорослей от ее среднемноголетней величины в последующие 2015–2017 гг. пропорция диатомей вновь увеличивалась до 79%. Многолетнее варьирование биомассы диатомей было значительно сопряжено с изменением гидрометеорологических параметров. В структуре их доминирующих комплексов наблюдалось увеличение обилия лимнофильных видов, толерантных к высокому содержанию легкоусвояемого органического вещества и солей. С концентрацией хлорофилла «а» в воде, основным показателем трофии вод, установлена положительная связь биомассы *Stephanodiscus hantzschii* ($r = 0,61$). Суммарная же биомасса диатомей была отрицательно скоррелирована с некоторыми гидрометеорологическими показателями: уровнем воды ($R^2 = -0,51$), коэффициентом водообмена ($R^2 = -0,42$) и скоростью ветра ($R^2 = -0,46$).

Работа выполнена в рамках государственного задания № 121051100099-5.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Корнева Л.Г. Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги. – Кострома: Костромской печатный дом, 2015. – 284 с. <https://ibiw.ru/index.php?p=publ&id=182>
2. Корнева Л.Г., Соловьева В.В., Митропольская И.В. Фитопланктон пелагиали // Структура и функционирование экосистемы Рыбинского водохранилища в начале XXI века. М.: Изд-во РАН, 2018. С. 110–123. <https://ibiw.ru/index.php?p=publ&id=307>
3. Приймаченко А.Д. Роль водохранилищ в географическом распространении планктонных водорослей // Гидробиологический журнал. 1973. Т. 9. № 5. С. 57–61.
4. Korneva L.G. Invasions of Alien Species of Planktonic Microalgae into the Fresh Waters of Holarctic (Review) // Russian Journal of Biological Invasions. 2014. V.5. №2. P. 65–81. DOI: 10.1134/S2075111714020052
5. Slynko Yu. V., Korneva L.G., Rivier I.K., Papchenkov V.G. Scherbina G.H. Orlova M.I., Therriault T.W. The Caspian – Volga – Baltic Invasion Corridor // Eds. Erkki Leppakoski, Stephan Gollasch, Sergej Olenin. Invasive aquatic species of Europe. Distributions, impacts and management. – Kluwer Acad. Pub.: Dordrecht, Boston, London, 2002. – P. 399–411. DOI: 10.1007/978-94-015-9956-6_40

Диатомовые водоросли Новосибирского водохранилища как показатели качества его вод

Diatoms of the Novosibirsk reservoir as indicators of the quality of its waters

Михайлов В.В.

Vyacheslav V. Mikhailov

Омский аграрный научный центр (Омск, Россия)

mikhaylov_vladimir_1962@mail.ru

По показателям сапробности диатомовых водорослей качество воды в 2016–2017 гг. в верхней зоне Новосибирского водохранилища соответствовало категории «удовлетворительной чистоты». В средней и нижней частях в 2017 г. – «удовлетворительной чистоты», кроме 2016 г., где она была «загрязненной». В Бердском заливе вода в 2016 г. относилась к категории «удовлетворительной чистоты», а в 2017 г. – «загрязненной».

Ключевые слова: диатомовые водоросли; качество воды; индикаторы сапробности; фитопланктон; Новосибирское водохранилище

According to the saprobity of diatoms, the water quality in 2016–2017 in the upper zone of the Novosibirsk reservoir met the category of «satisfactory cleanliness». In the middle and lower parts in 2017 – «satisfactory cleanliness», except for 2016, where it was «polluted». In Berdsky Bay, water in 2016 was classified as “satisfactory purity”, and in 2017 it was «polluted».

Keywords: diatoms; water quality; saprobity indicators; phytoplankton; Novosibirsk reservoir

Диатомовые водоросли – типичные обитатели реки Оби и Новосибирского водохранилища, часть которых входят в доминирующий комплекс фитопланктона (Науменко, 1996; Михайлов 2020).

Благодаря высокой чувствительности к содержанию органических веществ в воде и подробной изученности их экологических особенностей, они широко применяются как индикаторы загрязнения природных вод (Бухтиярова, 1999).

Начиная с 1980 г. Новосибирское водохранилище является основным источником питьевого водоснабжения, поэтому качеству его вод должно уделяться большое значение (Савкин и др., 2014).

В окружающей среде способность вида обитать в воде с различным содержанием органических веществ связана с различными условиями его приспособленности, формируя зону сапробности, где он может быть применен в качестве ее индикатора (Барина и др., 2000).

Цель работы – дать оценку качества воды частей Новосибирского водохранилища по показателям сапробности обнаруженных в фитопланктоне диатомовых водорослей на основе их встречаемости в определенной зоне водоема.

Сообщение написано по данным обработки снимков створок диатомовых водорослей, полученных на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Hitachi S 3400N в Институте водных и экологических проблем СО РАН (г. Барнаул) при обследовании 12 количественных проб фитопланктона.

Отбор проб был произведен в августе 2016 и 2017 гг. с 7 створов, охватывающих все части акватории Новосибирского водохранилища: верхнюю (Камень-на-Оби, Малетино), среднюю (Чингис), нижнюю (Быстровка, Верхний бьеф) и Бердский залив (Речкуновка и Агролес) (Савкин и др., 2014).

Перед сжиганием проб каждого из створов их интегрировали, объединив различные горизонты отбора: поверхность, дно и различные глубины фотического слоя: 0,5S, 1S, 2S (S – прозрачность воды по диску Секки) (Бульон, 1983). От хлоропластов и органического вещества диатомовые водоросли освобождали, используя метод холодного сжигания (Руководство..., 1983).

Идентификацию диатомей производили по определителям (Krammer, Lange-Bertalot, 1986, 1988; 1991a, b; Куликовский и др., 2016). Показатели сапробности видов-индикаторов брали из работ (Баринаева и др., 2000, 2006).

Используя показатели сапробности и встречаемость диатомовых (пеннатных и центрических) водорослей в различных частях (зонах) Новосибирского водохранилища, можно дать оценку качества его вод. При условии преобладания по количеству видов в части Новосибирского водохранилища обитателей чистых вод (χ , о, χ -о, о- χ), ее вода соответствует категории «чистая», широко толерантных (χ - β , о- β , β -о, о- α) или при их равенстве с обитателями чистых вод – «удовлетворительной чистоты», загрязненных и грязных вод (β , β - α , α - β), а также при их равенстве с видами с широкой толерантностью – «загрязненная».

В 2016 г. по количеству встреченных видов в верхней части Новосибирского водохранилища и Бердском заливе лидируют широко толерантные (χ - β , о- β , β -о, о- α) (ксено-бета-сапробы, олиго- бета мезосапробы, бета-олигосапробы, олиго-альфа- мезосапробы), в средней и нижней – число широко толерантных видов и обитателей загрязненных и грязных вод (β , β - α , α - β) (бета мезосапробы; бета-альфа- мезосапробы; альфа-бета- мезосапробы) совпадает (Михайлов, 2022; Mikhailov, 2022).

Поэтому в 2016 году качество вод в верхней его части и в Бердском заливе по показателям сапробности диатомовых водорослей относилось к категории «удовлетворительной чистоты», а в средней и нижней – «загрязненная».

По числу обнаруженных видов в 2017 году в верхней и нижней частях водохранилища преобладают широко толерантные, в Бердском заливе совпадает количество широко толерантных видов и обитателей загрязненных и грязных вод, а в средней – широко толерантных и обитателей чистых вод (χ , о, χ -о, о- χ) (ксеносапробы, ксено-олигосапробы; олиго-ксеносапробы, олигосапробы) (Михайлов, 2022; Mikhailov, 2022).

Тогда в 2017 г. качество вод в верхней, средней и нижней частях водоема по показателям сапробности диатомовых водорослей соответствует категории «удовлетворительной чистоты», а в Бердском заливе – «загрязненная».

Оценка качества воды, определенная в 2017 гг. по показателям сапробности диатомей соответствует качеству вод, определенных для этих частей водохранилища по биомассе фитопланктона (Михайлов, 2020) согласно комплексной экологической классификации вод (Оксиюк и др., 1993), кроме его средней части.

Таким образом, по показателям сапробности диатомовых водорослей качество воды в 2016–2017 гг. в верхней зоне Новосибирского водохранилища соответствовало категории «удовлетворительной чистоты». В средней и нижней частях в 2017 г. – «удовлетворительной чистоты», кроме 2016 г., где она была «загрязненной». В Бердском

заливе вода в 2016 г. относилась к категории «удовлетворительной чистоты», а в 2017 г. – «загрязненной».

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. *Барина С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В.* Водоросли-индикаторы в оценке качества окружающей среды. – М.: ВНИИприроды, 2000. – 150 с.
2. *Барина С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В.* Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. – Тель-Авив: Pilies Studio, 2006. – 498 с.
3. *Бульон В.В.* Первичная продукция планктона внутренних водоемов. – Л.: Наука, 1983. – 150 с.
4. *Бухтиярова Л.Н.* Bacillariophyta в биомониторинге речных экосистем. Современное состояние и перспективы использования // Альгология. 1999. №3. С. 89–103.
5. *Куликовский М.С., Глуценко А.М., Генкал С.И., Кузнецов И.В.* Определитель диатомовых водорослей России. – Ярославль: Филигрань, 2016. – 803 с.
6. *Михайлов В.В.* Оценка современного экологического состояния Новосибирского водохранилища по показателям развития фитопланктона: Автореф. дис. канд. биол. наук. – Тюмень, 2020. – 16 с.
7. *Михайлов В.В.* Биоиндикация воды Новосибирского водохранилища по пенистым диатомеям // Инновационные технологии в земледелии и растениеводстве: сборник науч. статей, посвящ. 70-летию доктора с.-х. наук Юшкевича Л.В. – Омск, 2022. – С. 61–66.
8. *Науменко Ю.В.* Фитопланктон реки Оби: Автореф. дис. докт. биол. наук. – Новосибирск, 1996. – 33 с.
9. *Савкин В. М., Двуреченская С.Я., Ермолаева Н.И., Киприянова Л.М., Кириллов В.В., Романов Р.Е., Попов П.А., Шлычков В.А., Яныгина Л.В., Атавин А.А., Булычева Т.М., Визер А.М., Горгуленко В.В., Гранкина Т.Б., Дьяченко А.В., Жердева Т.В., Зарубина Е.Ю., Ким Г.В., Ковалевская Н.М., Ковешников М.И., Кондакова О.В., Котовицков А.В., Крылова Е.Н., Ларинова Н.В., Овчинникова Т.Э., Рыбкина И.Д., Семчуков А.Н., Соколова М.И., Стояцева Н.В., Федорова Е.А., Хабидов А.Ш., Эйрих А.Н.* Многолетняя динамика водно-экологического режима Новосибирского водохранилища. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. – 393 с.
10. *Оксеюк О.П., Жукинский В.Н., Брагинский Л.П., Линник П.Н., Кузьменко М.И., Кленус В.Г.* Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // Гидробиологический журнал. 1993. № 4. С. 62–76.
11. *Руководство к методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений / Абакумов В.А. (ред.).* – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 239 с.
12. *Krammer K., Lange-Bertalot H.* Bacillariophyceae. 1 Teil: Naviculaceae. Süßwasserflora von Mitteleuropa. – Jena: Gustav Fischer Verlag, 1986. – 876 s.
13. *Krammer K., Lange-Bertalot H.* Bacillariophyceae. 2 Teil: Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae. Süßwasserflora von Mitteleuropa. – Jena: Gustav Fischer Verlag, 1988. – 596 s.
14. *Krammer K., Lange-Bertalot H.* Bacillariophyceae. 4 Teil: Achnantheaceae, Kritische Ergänzungen zu Navicula (Lineolatae) und Gomphonema. Gesamtliteraturverzeichnis. Süßwasserflora von Mitteleuropa. – Jena: Gustav Fischer Verlag, 1991a. – 434 s.
15. *Krammer K., Lange-Bertalot H.* Bacillariophyceae. 3 Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotracheae. Süßwasserflora von Mitteleuropa. – Jena: Gustav Fischer Verlag, 1991b. – 576 s.
16. *Mikhailov V.* Bioindication of waters of the Novosibirsk reservoir by centric diatoms // Journal of science. Lyon. 2022. V. 34. P. 3–5.

**Изменение соотношения запасов биогенных элементов при
продукции и минерализации диатомовых и других
систематических групп водорослей в Баренцевом море**

**Ratio changing of nutrients remaining reserve in the processes of
diatoms and other systematic groups of algae production
and mineralization in the Barents Sea**

Намятов А.А., Пастухов И.А.

Alexey A. Namyatov, Ivan A. Pastukhov

Мурманский морской биологический институт РАН (Мурманск, Россия)

alexey.nmyatov@yandex.ru

В работе рассмотрены некоторые особенности гидрохимического и гидробиологического режимов как единого блока, морской экосистемы Баренцева моря. Представлена методика использования стабильных изотопов для расчета потребления биогенных элементов в процессе фотосинтеза с последующим расчетом первичной продукции. В результате получены распределения этих величин в Баренцевом море. На севере моря выделяется район, который характеризуется максимальными величинами потребления кремния с остатком запаса в 8%. При этом остаток запаса фосфора и азота находятся на уровне 50%, хотя на других акваториях моря лимитирующим фактором фотосинтеза в большинстве случаев является азот. Расчетная максимальная величина первичной продукции в 7 раз меньше, чем в поступающих атлантических водах. Основными первичными продуцентами пелагиали этого района являются диатомовые водоросли, они и формируют основной продукционный потенциал, что и определяет особенности гидрохимического режима этой акватории.

Ключевые слова: Баренцево море; первичная продукция; стабильные изотопы; биогенные элементы; диатомовые водоросли

The article discusses some features of the hydrochemical and hydrobiological regimes of the marine ecosystem of the Barents Sea as a whole. A method that uses stable isotopes to calculate the consumption of the elements in the process of photosynthesis with subsequent calculation of the primary production is presented. As a result, distributions of these values in the Barents Sea were obtained. The area in the north of the sea characterized by the maximum values of silicon consumption with a remaining reserve of 8% is delimited. At the same time, the remaining reserves of phosphorus and nitrogen are 50%, although in most cases nitrogen is the limiting factor of photosynthesis in other areas of the sea. The estimated maximum volume of primary production is 7 times less than in incoming Atlantic waters. The main primary producers of pelagial in this area are diatoms, they form the main production potential, which determines the features of the hydrochemical regime of this water area.

Keywords: Barents Sea; nutrients; stable isotopes; primary production; diatoms

Целью настоящей работы является рассмотрение гидрохимического и гидробиологического режимов не как отдельных блоков водной экосистемы, а как единого блока, входящего в единую водную экосистему, в данном случае в экосистему

Баренцева моря. Под гидрохимическим режимом понимается режим изменения биогенных элементов (форм фосфора, азота и кремния), а под гидробиологическим режимом – продукция и минерализация диатомовых и других систематических групп водорослей. Связующим звеном между изменением гидрохимических параметров и гидробиологическим блоком является первичная продукция. Но различным систематическим группам водорослей соответствует различный состав биогенных элементов, поэтому при доминировании разных систематических группы фитопланктона величины уменьшения концентраций минеральных форм рассматриваемых биогенных элементов будет происходить в различных соотношениях. Так например величина соотношения C:Si в диатомовом фитопланктоне в 15 раз меньше, чем в перидиниевом (Химия океана, 1979). Следовательно, на единицу первичной продукции, в районах при 100% доминировании диатомовых, потребление кремния из воды будет в 15 раз больше, чем в районах при 100% доминировании перидиниевых. При определении величины потребления биогенного элемента возникают некоторые сложности, связанные с вертикальным обменом, а также с процессом реминерализации, идущего параллельно с процессом фотосинтеза.

Величины потребления биогенного элемента используются в дальнейшем для оценки первичной продукции. Существующие на сегодня методы определения биологической продуктивности, базирующиеся на изменении концентраций биогенных элементов, основаны на определении разницы между измеренным количеством биогенного элемента и его количеством, которое находилось в данном объеме воды до момента начала фотосинтеза. В ряде работ эти величины называют преформами (Аржанова и др., 1995; Кивва, 2014; Аржанова и др., 1997; Титов, 2003; Батрак, 2009). Для использования этой методики необходимо знать зимние концентрации биогенных элементов, предшествующие весеннему цветению фитопланктона. В работах по Берингову морю эти величины определялись концентрациями на нижней границе холодного промежуточного слоя, для вод, окружающих Антарктиду, эта концентрация определялась как средневзвешенная величина в слое осенне-зимнего конвективного перемешивания. В работе Титова О.В. (2003) по Баренцеву морю точка отсчета определялась как «предстартовое содержание минерального фосфора в водной толще в районах, освободившегося от ледового покрова...».

Представленный анализ показывает, что определение точки отсчета концентраций биогенных элементов, от которой рассчитывается биологическая продуктивность, в методиках, используемых в настоящее время, имеет некоторую неопределенность, на устранение которой направлена настоящая работа. Кроме того, при переходе к расчету первичной продукции она (методика оценки преформ) учитывает средние стехиометрические соотношения Редфилда-Ричардса, а как показано выше они (стехиометрические соотношения) могут значительно меняться. Новый подход основан на оценке точки отсчета по величинам солености и значениям трассера $\delta^{18}\text{O}$. Используя уравнение смешения, рассчитываются величины содержания базовых вод – атлантических, речных и ледовых (талых или изъятых при ледообразовании). Методики подобных расчетов описаны во многих зарубежных и Российских работах, с некоторыми корректировками при преобладании процессов ледообразования, впервые обоснованными Российскими учеными (Дубинина и др., 2019) и далее для морей Баренцева, Карского и Лаптевых обобщены в работе Намятова А.А. (2021). По величинам средних концентраций биогенных элементов в ядре базовых вод и величинам содержания самих базовых вод, рассчитывается «консервативная» концентрация отдельного элемента, которая обусловлена только смешением вод и не зависит от времени года. Эта величина и является точкой отсчета изменения концентраций биогенных элементов. «Неконсервативная» составляющая – разность измеренной и консервативной составляющей в свою очередь состоит из «продукционной» и «не

продукционной» составляющих. «Не продукционная» составляющая вызвана обменом с придонными слоями или адвекцией, которая также отдельно учитывается. В значение «продукционной» составляющей вносится индивидуальная для данного места поправка за счет регенерации биогенного элемента, протекающей параллельно с процессом фотосинтеза. Далее рассчитываются *реальное* стехиометрические соотношения азота, фосфора и кремния для различных районов Баренцева моря с различным видовым составом доминантных групп фитопланктона, на основе которых рассчитывается продукция.

При разработке данного метода было сделано 3 допущения: (1) вклад не продукционной составляющей изменяется от района к району, но в районе постоянен в течение всего года; (2) весь фитопланктон Баренцева моря состоит всего из двух систематических групп фитопланктона – диатомового и динофлагеллят (перидиниевого). Если оценить все Баренцево море, то средняя сумма биомасс этих двух систематических групп фитопланктона по данным Биологического атласа Баренцева моря, при анализе 1000 проб, составляет 94%; (3) коэффициент регенерации изменяется от района к району, но в районе постоянен в течение всего года. Абсолютное значений величины регенерации будет изменяться от месяца к месяцу.

Расчеты проведены для акватории Баренцева моря с использованием общедоступных баз данных – средних месячных значений солености и концентраций фосфора-фосфатного, азота-нитратного, кремния силикатов из NODC (Boyer et al. 2018); $\delta^{18}\text{O}$ из базы данных NASA (Schmidt et al., 1999). Вся акватория Баренцева моря была разбита на 35 районов 10° по долготе и 2° по широте (от 68° до 80° с.ш. и от 10° до 60° в.д.). Для каждого из районов были вычислены средние месячные значения всех вышеперечисленных параметров. Далее рассчитывалось изменение запаса (интеграл) каждого биогенного элемента от месяца к месяцу от поверхности до нижней границы эвфотического слоя, определяемого по горизонту залегания изооксина насыщенности воды растворенным кислородом в 100%. И в заключении рассчитывались индивидуальные значения стехиометрических отношений и величины первичной продукции.

По результатам расчетов всю акваторию Баренцева моря можно разделить на 6 районов с максимальными и минимальными значениями первичной продукции. Район с самой высокой продукцией расположен в центре западной части Баренцева моря и приурочен к Медвежинско-Шпицбергенскому мелководью. Средние значения общей первичной продукции на этой акватории в период максимального развития фотосинтеза (август-сентябрь), находятся на уровне $\sim 160 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}$ ($152 \pm 36 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}$), при максимумах до $\sim 190 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}$. Также к районам с относительно высокими значениями первичной продукции можно отнести акватории в юго-западной и юго-восточной частях моря, а также акватория, омывающая архипелаг Земля Франца-Иосифа с южной стороны. Средняя величина общей первичной продукции в этих районах на $50 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}$ меньше. К районам с минимальными значениями первичной продукции относятся районы на северной границе моря между архипелагами Шпицберген и Землей Франца Иосифа и район, примыкающий к побережью Кольского полуострова. В этих районах максимальные величины менее $100 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}$.

Район на севере Баренцева моря, характеризуется максимальными величинами потребления кремния (в остальных частях моря лимитирующим фактором является азот). При фактически полном потреблении кремния (остаток 8%) запасы фосфора и азота находятся на уровне 50 и 35% соответственно. Этот район большую часть года находится подо льдами или в зоне дрейфующего сезонного льда, что, несомненно, оказывает влияние на структуру пелагического альгоценоза и его продукционные характеристики. Среднее месячное значение первичной продукции в некоторых районах этой части моря, в период максимального развития процесса фотосинтеза, в 6,8 раз

меньше, чем в поступающих атлантических водах Южно-Шпицбергенского течения и составляет $19,3 \pm 1,4 \text{ gCm}^{-2}$. Расчетные величины показывают, что альгоценоз представлен фактически на 100% диатомовыми водорослями, при отмирании которых скелеты и панцири, содержащие много кремния, растворяются очень медленно. Этому способствует и низкие значения температуры воды, которые в эвфотическом слое в августе-сентябре в среднем составляют $0,11^\circ\text{C}$. При фактически 100% содержании диатомей в альгоценозе, запасы кремния расходуются быстрее, так как соотношение C:Si по массе у этих водорослей составляет 1,07 при 15,15 в перидиниевом планктоне. Если бы состав альгоценоза был бы другой, в частности с некоторым содержанием динофлагеллят, то в этом случае величина первичной продукции была бы выше. Полученные результаты подтверждаются и прямыми измерениями параметров фитопланктона. Основными первичными продуцентами пелагиали этого района Баренцева моря являются диатомовые водоросли, они и формируют основной продукционный потенциал (вносят основной вклад в интегральную биомассу) на протяжении всего вегетационного периода. Даже, если по видовому разнообразию в отдельные фазы сукцессии могут лидировать перидиниевые водоросли, то по численности и биомассе практически всегда доминируют диатомовыми водорослями. К доминантам этого района можно отнести *Chaetoceros concavicornis*, *Chaetoceros diadema*, *Gyrodinium lachryma/fusifforme*, *Protoperidinium depressum* (Олейник, Човган, 2021).

Получение выше представленных результатов является уникальным случаем, так как дает возможность в «чистом» виде получить стехиометрические соотношения для диатомового фитопланктона в реальных условиях. Это позволяет не только проверить методику расчетов, но и верифицировать данные содержания биогенных элементов в фитопланктоне со значениями, полученные еще Свердрупом Х. (H. Sverdrup) в 1942 г. Если опубликованное соотношение C:SI:N:P для диатомовых водорослей составляет 100:93:18.2:2.7, то по полученным материалам оно равно 100:109.7:18.9:2.7, это означает, что на единицу первичной продукции кремния расходуется на 18% больше.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Аржанова Н.В., Зубаревич В.Л., Сапожников В.В. Сезонные изменения запасов биогенных элементов в эвфотическом слое и оценка первичной продукции в Беринговом море // Комплексные исследования экосистемы Берингова моря. Сб. науч. трудов. – М.: Изд-во ВНИРО, 1995. – С. 162–179.
2. Аржанова Н.В., Зубаревич В.Л. Химическая основа биопродуктивности Охотского моря // Комплексные исследования экосистемы Охотского моря. – М.: Изд-во ВНИРО, 1997. – С. 86–92.
3. Бордовский О.К., Иваненков В.Н. (ред.) Океанология. Химия океана. – М.: Наука, 1979. – 418 с.
4. Дубинина Е.О., Мирошникова А.Ю., Коссова С.А., Щука С.А. Модификация опресненных вод на шельфе моря Лаптевых: связь изотопных параметров и солёности // Геохимия. 2019. Т.64, №1. С. 3–19. DOI: 10.31857/S0016-752564113-19.
5. Кивва К.К. Оценка первичной продукции Берингова моря с использованием нового подхода // Труды ВНИРО. 2014. Т.152. С. 73–84.
6. Олейник А.А., Човган О.В. Первые находки *Protoperidinium laticeps* и *P. thulesense* (DINOPHYTA: PERIDINIALES) в морях европейской Арктики // Ботанический журнал. 2021. Т. 106, № 4. С. 397–404. DOI: 10.31857/S0006813621040104.
7. Тумов О.В. Многолетние изменения гидрохимического режима и экосистемы Баренцева моря: дис. на соискание ученой степени доктора географических наук. – Мурманск, 2003. – 424 с.
8. Boyer T.P., Garcia H.E., Locarnini R.A., Zweng M.M., Mishonov A.V., Reagan J.R., Weathers K.A., Baranova O.K., Seidov D., Smolyar I.V. World Ocean Atlas 2018. [Salinity, nutrients]. World-wide electronic publication. NOAA National Centers for Environmental Information. Dataset. 2018. <https://www.ncei.noaa.gov/archive/accession/NCEI-WOA18> (дата обращения 10.02.2023).

9. *Namyatov A.A.* $\delta^{18}\text{O}$ as a tracer of the main regularities of water mass mixing and transformation in the Barents, Kara, and Laptev seas // *Journal of Hydrology*. 2021. Т.593. 125813. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125813>.

10. *Namyatov A.A., Makarevich P.R., Druzhkova E.I., Pastukhov I.A.* Parameter $\delta^{18}\text{O}$ in the Marine Environment Ecosystem Studies on the Example of the Barents Sea // *Water*. 2023. Т. 15(2). Р. 328. <https://doi.org/10.3390/w15020328>

11. *Schmidt G.A., Bigg G.R., Rohling E.J.* World-wide electronic publication by NASA. "Global Seawater Oxygen-18 Database - v1.22". 1999. <https://data.giss.nasa.gov/o18data>. (дата обращения 10.02.2023).

Роль диатомовых водорослей в фитопланктоне дистрофных озер

The role of diatoms algae in phytoplankton of dystrophic lakes

Петров В.Н.¹, Карпаева А.Ю.²

Vladimir N. Petrov, Anastasija J. Karpaeva

¹Институт экспериментальной ботаники НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

²Научно-практический центр НАН Беларуси по биоресурсам (Минск, Беларусь)

petrov.vl@tut.by, karpaevanastyal@gmail.com

В работе приводятся сезонные показатели численности и биомассы доминирующих групп водорослей в фитопланктоне озер Курганистое и Язгиня и доли диатомовых водорослей в их сложении. В обоих озерах наибольшие значения летней численности и биомассы сформированы криптофитовыми водорослями. Группа диатомовых водорослей сформировала пики только майских значений численности и биомассы фитопланктона в озере Язгиня.

Ключевые слова: Ельня; дистрофные озера; численность; биомасса

The paper presents seasonal indicators of the abundance and biomass of the dominant groups of algae in the phytoplankton of lakes Kurganistoye and Yazhginya. In both lakes the largest values of summer abundance and biomass are formed by cryptophyte algae. A group of diatoms formed the peaks of only the May values of the abundance and biomass of phytoplankton in Lake Yazhginya.

Keywords: Yelnya; sphagnum bog; population; biomass

Целью нашей работы являлось представить данные об участии диатомовых водорослей в формировании количественных и продукционных показателей фитопланктона двух дистрофных озер на территории заказника Ельня (Белорусское Поозерье).

Географически озера относятся к Миорскому р-ну Витебской области. В западной части заказника Ельня площадью 0,04 км² расположено оз. Курганистое (басс. р. Волта). В южной части заказника площадью 0,3 км² – оз. Язгиня (басс. р. Дисна) (Природа..., 2010; Редкие..., 2013). Глубины озер до 2,5 метров. Для озер Курганистое и Язгиня показатели рН находились в рамках значений 3,54–4,17, 3,22–4,65, электропроводности (μS/см) 27,6–32,3, 19,1–21,0, прозрачности 0,7–1,0 м, 1,3–1,8 м соответственно.

Отбор проб фитопланктона озер нами проводился с мая по сентябрь 2018 г. у поверхности воды на отдалении от берега в 1 метр и такой же минимальной глубине. Фиксация – раствором Утермеля с добавлением нескольких капель формалина. Для оценки показателей численности и биомассы свободно парящих в водной толще фотосинтезирующих микроорганизмов, включая цианобактерий, применяли классические методы гидробиологии: осадочный способ концентрирования проб и световую микроскопию. Количественные показатели фитопланктона определяли с использованием камеры Горяева. Таксоны приведены в соответствии с данными www.algaebase.org.

В результате обработки проб фитопланктона озера Курганистое выявлено 20 видов водорослей, из которых 3 вида (15% видового состава) относятся к диатомовым (Bacillariophyta), остальные распределены между отделами Cyanobacteria (4), Charophyta (3), Chlorophyta (3), Ochrophyta (3), Cryptista (2), Euglenozoa (1), Miozoa (1). Подсчет численных показателей фитопланктона в озере выявил два пика вегетации для биомассы – весенний (2,56 мг/л) и летний (1,92 мг/л), для численности – только летний (8,79 млн кл/л). Доля диатомовых в этих показателях 0,03%, 4,6 и 0,7%, соответственно. Майский максимум показателя биомассы обеспечили золотистые водоросли (1,92 мг/л – 74%).

В фитопланктоне озера Яжгиня из 21 вида 33% (8 видов) являются представителями Bacillariophyta, остальные принадлежат к отделам Cyanobacteria (4), Ochrophyta (3), Charophyta (2), Chlorophyta (2), Cryptista (1), Euglenozoa (1). Показатели численности и биомассы фитопланктона в озере характеризовались двумя пиками вегетации – весенним (10,25 млн. кл/л и 1,95 мг/л) и летним (7,6 млн. кл/л и 1,71 мг/л). В майском фитопланктоне представители отдела Bacillariophyta создавали 58 % численности (5,9 млн. кл./л) и 86% биомассы (1,67 мг/л). Участие диатомовых в летнем максимуме менее значительно – 9% численности (0,67 млн. кл/л) и 13% биомассы (0,23 мг/л). В сентябре на фоне снижения значений общей численности и биомассы фитопланктона (4,1 млн. кл./л, 0,98 мг/л), доля диатомовых в их сложении выросла до 18% и 19%, соответственно.

Таким образом, несмотря на сходство гидрохимических показателей в озерах, на протяжении наблюдаемого сезона участие диатомовых водорослей в формировании количественных и продукционных характеристик фитопланктона различались. В озере Яжгиня их доля в фитопланктоне на протяжении сезона значительно превышала таковую в озере Курганистое. В первом из них виды Bacillariophyta сформировали пики майских значений численности (58%) и биомассы (86%), уступая криптофитовым в летний период. Во втором – количественные и продукционные показатели этой группы оказались намного скромнее и не превысили 3 и 4%, соответственно. Преобладали золотистые весной и криптофитовые летом. В обоих озерах наибольшие значения летней численности и биомассы сформированы криптофитовыми водорослями (7,73 млн кл/л – 88%, 1,77 мг/л – 92% и 5,77 млн кл/л – 76%, 1,41 мг/л – 83%, соответственно).

Общие показатели биомассы в целом очень близки к указанным ранее в справочной литературе для двух самых крупных озер этого заказника (озера Ельня – 3,6 мг/л и Черное – 0,8 мг/л) (Якушко и др., 1988). В целом сезонная динамика численности и биомассы соответствовала PEG-модели сезонной динамики пресноводных водоемов (Sommer, 1986).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Природа Беларуси. Энциклопедия (в 3 т.) – Минск: Беларуская Энцыклапедыя імя Петруся Броўкі, 2010. – Т. 2. Климат и вода. – 504 с.
2. Редкие биотопы Беларуси. – Минск: Альтиора. Живые краски, 2013. – 236 с.
3. Якушко О.Ф., Мысливец И.А., Рачевский А.Н., Богдель И.И., Власов Б.П. Озера Белоруссии. – Минск: Ураджай, 1988. – 216 с.
4. Sommer U. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters // Hydrobiologie. 1986. №106 (4). P. 433–471.

Новый алгоритм поиска зон интегральной седиментации на примере Иваньковского и Рыбинского водохранилищ

A new algorithm for integral sedimentation zones identification on the example of the Ivankovo and Rybinsk reservoirs

Разумовский Л.В., Разумовский В.Л., Кушнарцева Т.Н., Бугаева Т.Н.,
Анисимова А.В.

Lev V. Razumovskij, Vikentii L. Razumovskij, Tatiana N. Kushnareva,
Tatiana N. Bugaeva, Alexandra V. Anisimova

Институт водных проблем РАН (Москва, Россия)

lazy-lion@mail.ru

Работа посвящена оценке результатов практического применения *новой* концепции комплексного мониторинга. Теоретическая новизна концепции состоит в совместном анализе диатомовых комплексов из колонок донных отложений и современных фитопланктонных комплексов. В качестве объектов исследований выбраны Иваньковское и Рыбинское водохранилища. Это определялось длительностью их существования, мощностью накопившихся отложений и степенью изученности. В результате проведенных исследований было установлено оптимальное месторасположение точек отбора колонок донных отложений в Рыбинском и Иваньковском водохранилище. При образовании водохранилищ произошло затопление озер, расположенных на их территории. Образовавшийся морфометрический рельеф дна определил зоны месторасположения этих озер как зоны устойчивой седиментации. По результатам проведенных комплексных исследований установлены долговременные негативные процессы в обоих водохранилищах обусловленные антропогенной нагрузкой.

Ключевые слова: водохранилище; комплексный мониторинг; диатомовые водоросли; фитопланктон; донные отложения; затопленные озера

The work is devoted to the new concept of integrated monitoring practical application and evaluation it's results. The theoretical novelty of the concept consists in the joint analysis of diatom complexes from bottom sediments columns and modern phytoplankton complexes. The Ivankovo and Rybinsk reservoirs were chosen as the objects of research. This decision was made due to their advanced age, the power of accumulated deposits and the degree of study. The bottom sediment columns sampling points optimal locations in the Rybinsk and Ivankovo reservoirs was established as a result of the conducted research. During the creation of reservoirs, the lakes on their territory were flooded. The resulting morphometric bottom relief determined those relict lakes locations as zones of stable sedimentation. According to the comprehensive studies results, long-term negative processes caused by anthropogenic load have been confirmed in the investigated reservoirs.

Keywords: reservoir; integrated monitoring; diatoms; phytoplankton; bottom sediments; flooded lakes

В начале 80-х годов прошлого столетия на всех значимых реках, расположенных на территории СССР, была сформирована единая система комплексного мониторинга (гидрохимического, гидрофизического и гидробиологического). На водохранилищах, в том числе и верхневолжских, методика наблюдений (мониторинга) была идентична той,

которая использовалась во всей системе комплексного мониторинга. В системе мониторинга преобладал анализ водных толщ, поэтому приоритетным группами наблюдений являлась структура планктонных ассоциаций (фито- и зоопланктон).

Однако наблюдение и анализ водной толщи водохранилищ и поверхностных слоев ДО не позволял сформировать единую, целостную картину происходящих в них долговременных изменений. Возникла насущная необходимость переосмысления и систематизация всех накопленных первичных баз данных и формирования новой системы комплексного мониторинга.

Ранее при мониторинге водных толщ водохранилищ было в значительной степени упущено из виду, что первые водохранилища существуют и эксплуатируются уже несколько десятилетий. На сегодняшний день возраст Иваньковского водохранилища составляет 85 лет, а Рыбинского – более 75 лет. За время существования на дне этих водохранилищ накопились значительные по мощности отложения.

В 2017 г. сотрудниками ИВП РАН была предложена новая концепция комплексного мониторинга (НККМ) (Разумовский, 2021). Новизна исследований состояла в совмещения двух традиционных методов: анализа диатомовых комплексов из колонок ДО, который применяется в палеолимнологии, и анализа фитопланктонных комплексов, который применяется при биомониторинге. В качестве объекта исследований были выбраны Иваньковское и Рыбинское водохранилища. Это определялось длительностью их существования, мощностью накопившихся отложений и степенью изученности.

При проведении исследовательских работ было констатировано, что две колонки ДО, отобранные в Иваньковском водохранилище, не характеризуют все этапы осадконакопления. Косвенным подтверждением этого вывода является длина колонок ДО, отобранных в Рыбинском водохранилище (52–54 см).

Длина двух колонок, отобранных в Иваньковском водохранилище, составляет 21 и 19 см. Разумеется, темпы седиментации в водохранилищах могут различаться, но не более чем в два раза, как в этом случае. Предположительно, эти зоны седиментации, сформировались за последние несколько десятилетий. Это связано с долговременным преобразованием береговых, прибрежных и островных зон, процессами абразии, эрозии и др.

Гидродинамический режим Рыбинского водохранилища в р-не Коприно позволил накапливаться ДО на протяжении всего времени существования водоема. При визуальном осмотре образцов из колонки ДО было установлено, что нижние горизонты (50–54 см) сформировались в речных условиях, т.е. до создания Рыбинского водохранилища. Полученные результаты подтверждаются гранулометрическим составом ДО и имеющимися данными об изменении магнитных параметров и процентного содержания органических веществ вдоль кернов ДО (Куражковский и др., 2002; Законнов и др., 2018). Следовательно, темпы седиментации на этом участке составляют, предположительно, около 0,7 см/год.

Уже после реализации первого этапа НККМ был сформулирован другой подход к исследованиям. Он подразумевал новый способ поиска и выявления зон интегральной седиментации на водохранилищах. Это стало возможным после обнаружения озер, затопленных после создания Рыбинского и Иваньковского водохранилищ.

Очевидно, что образовавшийся морфометрический рельеф дна определяет зону месторасположения реликтовых озер как зону интегральной седиментации в сформированных водохранилищах. Более того, зона накопления ДО в условиях сформированного водохранилища может быть достоверно распознана и выделена по диатомовому анализу при сравнении с теми осадками, которые образовались в затопленных озерах до создания водохранилища. Это позволяет получить данные о

планктонной биоте и химическом составе вод на протяжении всего существования водохранилищ.

Более того, значимая составляющая диатомовых водорослей в фитопланктонных комплексах (40–60%) позволяет провести возрастную идентификацию диатомовых комплексов из ДО с теми или иными интервалами биомониторинга, который проводился на обоих водохранилищах.

Планируется комплексное изучение колонок ДО в зонах интегральной седиментации и анализ многолетних рядов гидрохимических и гидробиологических наблюдений. В качестве объектов исследований вновь выбраны Ивановское и Рыбинское водохранилища. Это определяется длительностью их существования, мощностью накопившихся отложений, достоверным наличием палеозер и степенью изученности.

В дальнейшем планируется решение и обратной задачи: возможность «заполнить» временной промежуток 1990-х, когда биомониторинг был прерван, и информация была потеряна. Разумеется, это возможно со значительными допущениями, поскольку такие значимые группы фитопланктона, как зеленые, синезеленые и другие, не сохраняются в осадке. Однако их видовой состав и численность имеют выраженную корреляционную зависимость от таксономической структуры диатомовых комплексов. Если обратная задача по восстановлению непрерывности рядов наблюдений будет успешно разрешена, то будет возможна достоверная реконструкция долговременных изменений в таксономической структуре фитопланктонных комплексов с самого момента создания водохранилищ, когда система биомониторинга еще не была внедрена.

Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2022-0002 Государственного задания ИВГ РАН.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Законнов В.В., Законнова А.В., Цветков А.И., Шерышева Н.Г. Гидродинамические процессы их роль в формировании донных осадков Волжско-Камского каскада // Труды ИБВВ РАН. 2018, Вып. 81 (84). С. 35–46.
2. Куражковский А.Ю., Куражковская Н.А., Клайн Б.И., Законнов В.В. Стратификация горизонтов в донных осадках Рыбинского водохранилища // Водные ресурсы. 2002. Т.29, №5. С. 522–555.
3. Разумовский Л.В. Оценка информативности новой концепции комплексного мониторинга на примере трех водохранилищ // Сб. трудов XVII международной научной конференции диатомологов. Диатомовые водоросли: морфология, биология, систематика, флористика, экология, палеогеография, биостратиграфия (Минск 23–28 августа 2021 г.). – Минск: Колоград, 2021. – С. 106–112.

Диатомовые водоросли в планктоне порта Туапсе (Черное море) в декабре 2022 г.

Diatoms in the plankton of the port of Tuapse (Black Sea) in December 2022

Ясакова О.Н.¹, Корчагина А.В.²

Olga N. Yasakova, Anna V. Korchagina

¹Южный Научный Центр РАН (Ростов-на-Дону, Россия)

²ФГБУ «АМП Черного моря» (Новороссийск, Россия)

yasak71@mail.ru, ecol.anna@mail.ru

В статье представлены результаты исследования диатомовых водорослей в планктоне порта Туапсе и в районе открытого моря, за пределами порта (на изобате 500 м). Обнаружено 17 видов водорослей в акватории порта Туапсе и 7 видов – в открытом море. Средние величины биомассы диатомовых в открытом районе моря (392 мг/м³) были в 2 раза выше, чем в порту (192 мг/м³). При этом величины численности были примерно на одном уровне (31 и 39 тыс. кл/л). Доминировали в основном *Proboscia alata*, *Chaetoceros affinis*, *Pseudosolenia calcar-avis*.

Ключевые слова: фитопланктон; таксономический состав; численность; биомасса; порт Туапсе; Чёрное море

The article presents the results of research of diatoms in the plankton of the port of Tuapse and in the open sea area, outside the port (at an isobate of 500 m). 17 species of algae were found in the waters of the port of Tuapse and 7 species - in the open part of Black Sea. The average biomass of diatoms in the open sea area (392 mg/m³) was 2 times higher than in the port (192 mg/m³). At the same time, the abundance were approximately at the same level (31 and 39 thousand cells/l). *Proboscia alata*, *Chaetoceros affinis*, *Pseudosolenia calcar-avis* dominated mainly.

Keywords: phytoplankton; taxonomic composition; abundance; biomass; Tuapse port; Black Sea

Представленная публикация продолжает ряд исследований, посвященных изучению планктонных водорослей в акватории порта Туапсе и за его пределами, начатых в 2005 г. (Селифонова, 2006; Ясакова, Макаревич, 2017; Ясакова, 2021).

Материалы и методы. Исследования фитопланктона в районе порта Туапсе (3 станции) и за его пределами (1 станция) были проведены в декабре 2022 г. Пробы отбирали с борта судна, с поверхности моря с помощью пластикового батометра. Пробы (1–1,5 л) фиксировали раствором нейтрального формальдегида до конечной концентрации 1–2%; дубликат проб (0,5 л) – раствором Люголя и сгущали осадочным методом. Подсчет численности и определение объема клеток фитопланктона производили с помощью камер Нажотта, объемом 0,05 и 0,1 мл под микроскопом Микмед-2 при объективах 10×/0,30 и 40×/0,65. Биомассу водорослей оценивали объемным методом, используя оригинальные и литературные данные измерений объема клеток для каждого вида (Брянцева и др., 2005). При идентификации видов использовали

общепринятые руководства (Прошкина-Лавренко, 1963; Tomas, 1997). Для оценки сходства таксономической состава микроводорослевых сообществ исследуемых акваторий использовали коэффициент Серенсена-Чекановского, Дайса и пр. (Шмидт, 1984; Clarke, Warwick, 1994):

$$C_s = \frac{2C}{(A+B)} * 100\%,$$

где А, В – общее число видов, зарегистрированных в сравниваемых пробах; С – количество форм, общих для двух сравниваемых проб.

Результаты исследования.

Качественный состав. В декабре в составе фитопланктона обнаружено 19 видов диатомовых водорослей (*Bacillariophyta*). Максимальное видовое разнообразие (17 видов) отмечали в акватории порта: *Coscinodiscus granii* L.F.Gough, *Coscinodiscus subtilis* Ehrenberg, *Chaetoceros affinis* Lauder, *Chaetoceros compressus* Lauder, *Chaetoceros curvisetus* P.T. Cleve, *Chaetoceros diversus* P.T.Cleve, *Chaetoceros insignis* Proshkina-Lavrenko, *Chaetoceros peruvianus* Brightwell, *Chaetoceros scabrosus* Proshkina-Lavrenko, *Hemiaulus hauckii* Grunow ex Van Heurck, *Nitzschia sigmoidea* (Nitzsch) W.Smith, *Nitzschia tenuirostris* Mer., *Pleurosigma elongatum* W.Smith, *Proboscia alata* (Brightwell) Sundström, *Pseudo-nitzschia pseudodelicatissima* (Hasle) Hasle, 1993, *Pseudosolenia calcar-avis* (Schultze) B.G.Sundström, *Thalassionema nitzschioides* (Grunow) Mereschowsky. В открытом районе моря обнаружено 7 видов: *Entomoneis alata* (Ehrenberg) Ehrenberg, *Chaetoceros affinis*, *Hemiaulus hauckii*, *Leptocylindrus danicus* Cleve, *Nitzschia tenuirostris*, *Proboscia alata*, *Pseudosolenia calcar-avis*. Общность видов двух сравниваемых районов, коэффициент Серенсена-Чекановского, Дайса составил 42%.

Количественное развитие. В районе порта средние величины численности и биомассы диатомовых водорослей составили 31 тыс. кл/л и 192 мг/м³; они формировали 23% общей численности и 65% биомассы всего фитопланктона. Преобладали среди них (80% численности диатомовых) *Proboscia alata*, *Chaetoceros affinis*, *Chaetoceros compressus*, *Pseudo-nitzschia pseudodelicatissima*. Основу биомассы (89%) диатомовых формировали *Proboscia alata*, *Chaetoceros affinis* и *Pseudosolenia calcar-avis*.

В открытом районе моря величины численности диатомовых водорослей (39 тыс. кл/л) были на уровне величин, отмеченных в порту; значения биомассы (392 мг/м³) в 2 раза превышали показатели порта. При этом диатомовые формировали 15% общей численности и 65% биомассы всего растительного планктона. Как и в акватории порта, в открытом море доминировали виды *Proboscia alata*, *Nitzschia tenuirostris* и *Chaetoceros affinis*; составив 95% численности диатомовых. Основу биомассы (88%) диатомовых водорослей формировали крупные клетки *Proboscia alata*, характерные больше для осеннего планктона.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Брянцева Ю.В., Лях А.М., Сергеева А.В. Расчет объемов и площадей поверхности одноклеточных водорослей Черного моря. Севастополь, 2005. 25 с. (Препринт / НАН Украины, Институт Биологии Южных морей).
2. Прошкина-Лавренко А.И. Диатомовые водоросли планктона Черного моря. – Ботанический институт им. В.Л.Комарова АН СССР, 1963. – 216 с.
3. Селифонова Ж.П., Ясакова О.Н. Изменчивость структуры фито- и зоопланктона в Туапсинской бухте Черного моря под воздействием хронического нефтяного загрязнения // Современные проблемы

аридных и семиаридных экосистем юга России: Сб. научных статей. – Отв. ред. Г.Г. Матишов. – Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2006. – С. 518–529.

4. Шмидт В.М. Математические методы в ботанике. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 288 с.

5. Ясакова О.Н., Макаревич П.Р. Фитопланктон северо-восточной части Черного моря. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2017. – 176 с.

6. Ясакова О.Н. Состояние планктонного альгоценоза на акватории порта Туапсе и за его пределами в весенне-летний период 2019 г. // Морской биологический журнал. 2021. Т.6, №3. С. 104–114.

7. Clarke K.P., Warwick R.M. Change in marine communities: An approach to statistical analysis and interpretation. Bournemouth. – Natural Environment Res. Council, 1994. – 144 p.

8. Tomas C. (ed.). Identifying marine phytoplankton. – San Diego, CA: Academic Press, Harcourt Brace Company, 1997. – 821 p.

Секция 5.

Использование диатомовых водорослей в биотехнологии и для решения прикладных задач

Интересные виды в коллекции диатомовых водорослей Карадагской научной станции

Interesting species in the collection of diatoms at the Karadag scientific station

Давидович Н.А.

Nickolai A. Davidovich

*Карадагская научная станция имени Т.И. Вяземского – природный заповедник РАН –
филиал ФИЦ ИнБЮМ РАН (Феодосия, Россия)*

nickolaid@yandex.ru

Кратко описывается назначение коллекции диатомовых водорослей Карадагской научной станции и виды диатомовых из коллекции, интересные с точки зрения изучения проблемных вопросов, в частности, систематики и эволюции, токсикогенные, имеющие прикладное значение, потенциально полезные для биотехнологий.

Ключевые слова: диатомовые; коллекция; биотехнологии

The purpose of the collection of diatoms of the Karadag Scientific Station and the species of diatoms from the collection that are interesting from the point of view of studying problematic issues, in particular, taxonomy and evolution, toxicogenic, of applied importance, and potentially useful for biotechnology, are briefly described.

Keywords: diatoms; collection; biotechnologies

Карадагская научная станция имени Т.И. Вяземского, ныне являющаяся филиалом Федерального исследовательского центра «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского» РАН, оказалась тем местом, где долгие годы интерес нескольких поколений исследователей был направлен на изучение диатомовых водорослей, их жизненных циклов, систем скрещивания, особенностей полового воспроизведения и аукоспоруляции, репродуктивных барьеров и прочих вопросов, объединяемых направлением, которое можно обозначить как репродуктивная биология диатомовых. В основе всех этих исследований лежит необходимость использования клоновых культур. По мере выполнения работ накапливался не только опыт содержания, но и сами клоновые культуры. Зачастую после окончания запланированных экспериментов культуры оставались в коллекции. Сегодня коллекция диатомовых Карадагской научной станции представлена более, чем 500 штаммами (<https://ibss-ras.ru/about-ibss/structure-ibss/tsestry-kollektivnogo-polzovaniya/collection-of-diatoms-of-world-ocean/>), преимущественно морских, а также пресноводных видов, относящихся к более, чем 20 родам. Методы выделения и содержания культур диатомовых достаточно хорошо отработаны (Давидович и др., 2017). Целевое назначение коллекции состоит не в

том, чтобы собрать наибольшее возможное количество видов (общее их число оценивается несколькими десятками тысяч), а в том, чтобы выделить и ввести в культуру виды, для которых в настоящее время нет данных о репродуктивной биологии, а также интересные с иных точек зрения.

На сегодня известно более 17 тысяч видов диатомовых (Guiry, Guiry, 2022). Лишь для порядка 350 из них в литературе можно найти сведения, часто весьма неполные, о половой репродукции (Davidovich, Davidovich, 2022). Учитывая эти обстоятельства, можно сказать, что любой новый вид, появившийся в коллекции, будет представлять интерес для изучения. Из наиболее значимых ввиду их таксономического положения, поддерживаемых в настоящее время в коллекции, можно назвать *Synedrosphenia crystalina* (C.Agardh) Lobban & Ashworth (synonym *Ardissonea crystallina* (C.Agardh) Grunow) и *Toxarium undulatum* Bailey. Изучение их репродукции привело к пониманию уникальности эволюционной ветви семейства *Ardissoneaceae* (Davidovich et al., 2017).

В коллекции содержатся несколько видов из рода *Pseudo-nitzschia* H. Peragallo. Его представители известны своей токсикогенностью. Впервые половой процесс был описан у двух видов в 1998 году (Davidovich, Bates, 1998). С тех пор половое воспроизведение отмечено и изучено у 14 представителей этого рода (Davidovich, Davidovich, 2022).

Значительный интерес представляют виды, имеющие потенциал хозяйственного и технологического применения. Отметим род *Haslea* Simonsen. Часть видов этого рода способна синтезировать уникальный водорастворимый нефотосинтетический пигмент синего цвета, называемый мареннин (Gastineau et al., 2018). Интерес вызван практическим использованием водорослей, синтезирующих мареннин, для окрашивания устриц и повышения их коммерческой ценности. Сегодня схема полового процесса описана у шести представителей рода *Haslea* (Davidovich, Davidovich, 2022): *H. crucigera* (W. Smith) Simonsen, *H. ostrearia* (Gaillon) Simonsen, *H. subagnita* (Proshkina-Lavrenko) Makarova & Karayeva, *H. karadagensis*, *H. provincialis* Gastineau, Hansen & Mouget, *H. silbo* Gastineau, Hansen and Mouget. Четыре продуцента мареннин-подобных пигментов находятся в нашей коллекции.

В последнее время возрос интерес к видам, обитающим в экстремальных условиях солености, освещения, температуры. Небезосновательно предполагать, что виды, приспособленные к таким условиям, обладают необычным, не встречающимся у других диатомовых набором липидов и способностью к их синтезу. Нами выделены в культуру клоны *Nitzschia* cf. *thermaloides* Hustedt – диатомовой водоросли, обитающей в мелких водоемах, образованных выбросами воды грязевых вулканов Крыма. Изучено половое воспроизведение и показано, что популяция в этих водоемах не эфемерная, а постоянно присутствующая и способная воспроизводиться не только вегетативно, но и половым путем (Давидович и др., 2023). Надо заметить, что процесс полового воспроизведения у диатомовых, сопряженный с мейозом и сложным поведением половых партнеров, гораздо более требователен к условиям по сравнению с обычным митотическим делением.

В коллекции содержатся несколько видов из рода *Nitzschia* Hassall, толерантных к очень высокой солености. Они способны делиться и воспроизводиться половым путем при таких уровнях солености, когда наблюдается кристаллизация и осаждение солей. Выделены виды, способные переносить резкое изменение солености, они остаются живыми при переносе из среды с соленостью несколько десятков промиллей в дистиллированную воду и обратно. Их способность противостоять осмотическому стрессу вызывает несомненный интерес.

В коллекции представлены как виды-космополиты так и виды эндемики. Конспецифичность широко распространенных видов подтверждена экспериментально –

путем скрещивания, включая возвратное скрещивание, показана репродуктивная совместимость географически удаленных популяций.

Работа выполнена в рамках госзадания КНС–ПЗ РАН филиала ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ «Изучение фундаментальных физических, физиолого-биохимических, репродуктивных, популяционных и поведенческих характеристик морских гидробионтов», номер государственной регистрации 121032300019-0.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Давидович Н.А., Давидович О.И., Подунай Ю.А. Биология воспроизведения и жизненный цикл диатомовой водоросли *Nitzschia cf. thermaloides*, населяющей грязевые вулканы Крыма // Морской биологический журнал. 2023. Т.8, №2. С. 42–54. DOI: <https://doi.org/10.21072/mbj.2023.08.2.03>.
2. Давидович Н.А., Давидович О.И., Подунай Ю.А. Коллекция культур диатомовых водорослей Карадагской научной станции (Крым) // Морской биологический журнал. 2017. Т.2, №1. С. 18–28. DOI: <https://doi.org/10.21072/mbj.2017.02.1.03>.
3. Davidovich N.A., Bates S.S. Sexual reproduction in the pennate diatoms *Pseudo-nitzschia multiseriata* and *P. pseudodelicatissima* (Bacillariophyceae) // Journal of Phycology. 1998. V.34, Is.1. P. 126–137.
4. Davidovich N.A., Davidovich O.I. Diatoms with studied sexual reproduction // Fottea, Olomouc. 2022. V.22, №2. P. 292–296. DOI: <https://doi.org/10.1134/S102144372205017X>.
5. Davidovich N.A., Davidovich O.I., Podunay Y.A., Gastineau R., Kaczmarska I., Poulíčková A., Witkowski A. *Ardissonea crystallina* has a type of sexual reproduction that is unusual for centric diatoms // Scientific Reports. 2017. V.7, №14670. P. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15301-z>.
6. Gastineau R., Prasetya F.S., Falaise C., Cognie B., Decottignies P., Morançais M., Méléder V., Davidovich N., Turcotte F., Tremblay R., Pasetto P., Dittmer J., Bardeau J.-F., Pouvreau J.-B., Mouget J.-L. Marenin-like pigments: blue diatom or green oyster cult? // Blue Biotechnology: Production and Use of Marine Molecules. V.2. / Stéphane La Barre, Stephen S. Bates (Eds). Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2018. P. 529–551. DOI: <https://doi.org/10.1002/9783527801718.ch16>.
7. Guiry M.D., Guiry G.M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. 2022. <https://www.algaebase.org> (дата обращения – 24.05.2023).

Сравнение профилей жирных кислот штаммов диатомовых водорослей рода *Mayamaea*

Fatty acids composition of diatoms from the genus *Mayamaea*

Кривова З.В., Мальцев Е.И., Кезля Е.М., Куликовский М.С.

Zinaida V. Krivova, Yevhen I. Maltsev, Elena M. Kezlya,
Maxim Kulikovskiy

Институт физиологии растений имени К.А. Тимирязева РАН (Москва, Россия)

kosiapeya@mail.ru

Диатомовые водоросли являются одной из самых широко распространенных и разнообразных групп водорослей. Однако и сейчас количество работ, посвященных изучению их жирнокислотного состава, невелико. В данной работе проведено исследование профилей жирных кислот двух почвенных и одного пресноводного штаммов рода *Mayamaea*. Несмотря на то, что штаммы были выделены из разных экосистем, отмечены лишь незначительные отличия в составленных профилях жирных кислот. В ходе работы выявлено, что доминантными для исследуемых объектов являются насыщенные пальмитиновая и стеариновая жирные кислоты и мононенасыщенная пальмитолеиновая.

Ключевые слова: *Mayamaea*; Байкал; диатомовые водоросли; жирные кислоты; почва

Diatoms are the one of the most widespread and diverse groups of algae. However, even now the numbers of the works devoted to the study of their fatty acid composition isn't enough. In this paper, the fatty acid profiles of soil and freshwater strains of the genus *Mayamaea* were described. Despite the fact that the strains were isolated from different ecosystems, minor differences in the compiled fatty acid profiles were noted. In the course of the work, it was revealed that saturated palmitic and stearic acids and monounsaturated palmitoleic acid are dominant for the studied objects.

Keywords: *Mayamaea*; Baikal; diatoms; fatty acids; soil

Род *Mayamaea* относится к порядку Naviculales. Род включает в себя мелкоклеточные виды, имеющие эллиптическую форму. К специфическим морфологическим характеристикам представителей рода относится строение порового аппарата и наличие ярко выраженного стернума (Kezlya et al., 2020). Представители рода сходны по аутоэкологии: предпочитают местообитания с переменной влажностью, например супралитораль или почва. Также часто отмечаются в полисапробных зонах. Некоторые виды являются аэрофилами (Lange Bertalot et al., 2003). Для большинства видов *Mayamaea* состав жирных кислот (ЖК) общих липидов в биомассе неизвестен. В литературе есть данные о профиле жирных кислот почвенного штамма *Mayamaea terrestris*. Для него доминантными показаны насыщенная пальмитиновая кислота и мононенасыщенная пальмитолеиновая, также он накапливал полиненасыщенную омега-3 эйкозапентаеновую ЖК (Мальцев и др., 2019). Также, для штамма *Mayamaea* sp. JРСС СТDA0820, описано, что азотное голодание незначительно замедляет прирост биомассы, при этом происходит заметное увеличение концентрации липидов (Nakayasu et al., 2023).

Материалом для данной работы послужили штаммы диатомовых водорослей, выделенные из почвенных и пресноводных проб. Изоляция отдельных клеток диатомовых водорослей проводилась с помощью микропипетки под световым инвертированным микроскопом Zeiss AxioScope A1 (Германия) с очищением каждой клетки в нескольких каплях дистиллированной воды. Альгологически чистые монокультуры водорослей содержались в жидкой среде WARIS-H+Si (McFadden et al., 1986) в колбах Эрленмейера (250 мл) при 25 °С и постоянном освещении 100 мкмоль фотонов м⁻² с⁻¹. Таксономическое положение штаммов определялось с помощью анализа морфологии с использованием микроскопа Zeiss AxioScope A1 (Германия), а также молекулярно-филогенетических исследований. Выделение ДНК из диатомовых водорослей производилось набором InstaGene Matrix (BIORAD, США) в соответствии с протоколом производителей. Последовательности, кодирующие баркодинговый регион V4 гена 18S рРНК (390–410 н.), были амплифицированы с использованием праймеров D512 и D978 (Zimmermann et al., 2015). Последовательности, кодирующие хлоропластный ген *rbcL*, были амплифицированы с помощью праймеров *rbcL404* (Ruck et al., 2011) и *rbcL1255* (Alverson et al., 2007). Штаммы были проанализированы после достижения стационарной фазы роста. Для получения жирнокислотных профилей использовался метод экстрагирования метиловых эфиров жирных кислот (МЭЖК) с помощью гексана. Состав МЭЖК определяли с использованием ГХ-МС (газовая хроматография/масс-спектрометрия) на приборе Agilent 7890A GC (Agilent Technologies, Inc., США) с 60-м капиллярной колонкой DB-23 с внутренним диаметром 0,25 мм.

В работе сравнивали состав жирных кислот двух почвенных штаммов: *Mayamaea* sp. VP580 (тропический лес, Вьетнам), *Mayamaea fossalis* MZ-BL (искусственное листовое насаждение в степной зоне, Запорожская обл.) и одного пресноводного – *Mayamaea* sp. B596 (планктон, озеро Байкал). Для исследуемых штаммов было показано, что основными в профилях жирных кислот были насыщенные пальмитиновая (16,41%; 21,54%; 19,63%), стеариновая (28,25%; 41,44%; 36,52%) и мононенасыщенная пальмитолеиновая (24,74%; 24,68%; 31,95%) жирные кислоты. У всех штаммов была обнаружена полиненасыщенная омега-6 линолевая кислота, но только у B596 в значимой концентрации (9,74%; 0,37%; 0,49%). Также описанные штаммы накапливают незначительные проценты (менее 5%) насыщенных лауриновой, миристиновой (кроме B596 – 6,87%) и арахиновой ЖК. Также в профиле ЖК штамма B596 обнаружены невысокие концентрации длинноцепочечных полиненасыщенных омега-3 α-линоленовой (3,87%) и омега-6 арахидоновой (4,14%) кислот. У штаммов VP580 и MZ_BL отмечена мононенасыщенная омега-9 олеиновая кислота (6,15%; 2,76%). По результатам работы можно сделать вывод – несмотря на то, что штаммы были выделены из разных местообитаний и, вероятно, относятся к разным видам, у них присутствуют общие тенденции к синтезу жирных кислот. Штаммы накапливают высокие концентрации насыщенных и мононенасыщенных жирных кислот и практически не запасают полиненасыщенные. Следовательно, при дальнейшем изучении данных штаммов стоит делать акцент на их практическом применении в качестве продуцентов насыщенных жирных кислот, например, при производстве биотоплива.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-74-10081).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Мальцев Е.И., Шкурина Н.А., Куликовский М.С. Использование диатомовых водорослей при повышении эффективности кормов для аквакультуры // Вопросы современной альгологии. 2019. Т.20, №2. С. 303–307. DOI: [https://doi.org/10.33624/2311-0147-2019-2\(20\)-303-307](https://doi.org/10.33624/2311-0147-2019-2(20)-303-307).

2. Alverson A.J., Jansen R.K., Theriot E.C. Bridging the Rubicon: phylogenetic analysis reveals repeated colonizations of marine and fresh waters by thalassiosiroid diatoms // *Molecular phylogenetics and evolution*. 2007. V.45, №1. P. 193–210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2007.03.024>.
3. Kezlya E., Glushchenko A., Kociolek J.P., Maltsev Y., Martynenko N., Genkal S., Kulikovskiy M. *Mayamaea vietnamica* sp. nov.: a new terrestrial diatom (Bacillariophyceae) species from Vietnam // *Algae*. 2020. V.35, №4. P. 325–335. DOI: <https://doi.org/10.4490/algae.2020.35.11.23>.
4. Lange B.H., Cavacini P., Tagliaventi N., Alfinito S. Diatoms of Sardinia: rare and 76 new species in rock pools and other ephemeral waters // *Diatoms of Sardinia: Rare and 76 New Species in Rock Pools and Other Ephemeral Waters* – ARG GANTNER, 2003 – 438 p.
5. McFadden G.I., Melkonian M. Use of Hepes buffer for microalgal culture media and fixation for electron microscopy // *Phycologia*. 1986. V. 25, № 4. P. 551–557. DOI: <https://doi.org/10.2216/i0031-8884-25-4-551.1>
6. Nakayasu M., Amano M., Tanaka T., Shimakawa G., Matsuda Y. Different responses of photosynthesis to nitrogen starvation between highly oil-accumulative diatoms, *Fistulifera solaris* and *Mayamaea* sp. JPCC CTDA0820 // *Marine Biotechnology*. 2023. V.25, №2. P. 272–280. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10126-023-10203-w>
7. Ruck E.C., Theriot E.C. Origin and evolution of the canal raphe system in diatoms // *Protist*. 2011. V.162, №5. P. 723–737. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.protis.2011.02.003>.
8. Zimmermann J., Glöckner G., Jahn R., Enke N., Gemeinholzer B. Metabarcoding vs. morphological identification to assess diatom diversity in environmental studies // *Molecular ecology resources*. 2015. V.15, №3. P. 526–542. DOI: <https://doi.org/10.1111/1755-0998.12336>.

Кластерный анализ некоторых форм створок диатомовых водорослей

A cluster analysis of some shapes of diatom valves

Лях А.М.

Anton M. Lyakh

ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»
(Севастополь, Россия)

me@antonlyakh.ru

В работе представлены результаты применения кластерного анализа для выделения похожих форм створок диатомовых водорослей. Кластерный анализ использует числовые описания форм. Для получения таких описаний, контуры форм были преобразованы в последовательности нормированных и согласованных коэффициентов эллиптического преобразования Фурье. При помощи трех вариантов метода иерархической кластеризации по значениям коэффициентов были построены дендрограммы, усеченные на уровне 6, 10 и 20 кластеров. Из полученных кластеров были выделены устойчивые группы форм, присутствующие во всех вариантах кластеризаций. Для каждой группы была построена средняя форма, которая считалась типовой. Типовые формы послужили образцом для классификации прочих форм створок диатомовых.

Ключевые слова: диатомовые водоросли; форма створки; кластерный анализ; эллиптическое преобразование Фурье

The results of the application of a cluster analysis to the shapes of some diatom valves are presented in the paper. The cluster analysis uses numeric descriptors of the shapes. To get such descriptors, the outlines of shapes have been transformed to the sequences of normalized and coordinated coefficients of elliptic Fourier transform. The coefficients have been used to construct shape dendrograms with the help of three variants of hierarchical cluster analysis. The dendrograms have been truncated at the level of 6, 10 and 20 clusters. From the obtained clusters the stable groups of shapes, that are presented in all variant of clustering, have been separated. For each shape group an average shape have been constructed, which has been considered as a type shape. The type shapes are used as a template for the classification of the other shapes of diatom valves.

Keywords: diatoms; valve shape; cluster analysis; elliptic Fourier transform

Разнообразие форм створок диатомовых микроводорослей вызывает потребность в поиске адекватного способа систематизации сведений об этих формах. Обычно для этого формы объединяют в группы по степени схожести и выделяют в каждой группе характерные (типовые) формы. Эта задача и являлась *целью* настоящей работы.

Для систематизации многочисленных сведений о формах организмов используют два классических подхода: качественный и количественный.

Качественный подход субъективен. В этом случае для разграничения форм исследователи полагаются на собственные представления об отличительных признаках. Ими могут быть: форма общеизвестного объекта-аналога, на которую похожа наблюдаемая форма (форма груши, форма эллипса); выраженные особенности участка

границы объекта (прямая, изогнутая, волнистая); узнаваемое строение характерной части объекта (острая, вытянутая, притупленная, закругленная).

Значения качественных признаков описывают словом или словосочетаниями, которые становятся основой для названий конкретных форм. Для передачи нюансов строения, например пропорций, используют прилагательные или префиксы (Гололобова и др., 2022; Гогорев и др., 2023). Но из-за того, что одно и то же видимое геометрическое свойство можно выразить разным словом, возникает обилие плохо формализуемых описаний, которые создают серьезную путаницу. Терминологические словари, основная задача которых состоит в систематизации, унификации и уточнении многочисленных определений форм (Гололобова и др., 2022; Гогорев и др., 2023), по сути просто закрепляют некоторое название за выделенной исследователями характерной формой, но не дают четкого критерия отличия одной формы от другой. Потому что такой критерий нельзя сконструировать из качественных описаний. Спектр форм непрерывен. Между конкретными изображенными типовыми формами находится бесконечное число переходных вариантов, которые, с определенного момента, невозможно однозначно отнести к одному из выделенных типов, руководствуясь только словесными описаниями. Для этого нужны иные критерии. Поэтому качественный подход к выделению форм мало эффективен.

Количественный подход объективнее качественного. В этом случае форму описывают наборами чисел, которые позволяют анализировать форму математическими методами. В том числе, они позволяют сравнивать формы и выделять группы похожих и отличающихся форм.

От того насколько хорошо числа передают геометрические особенности формы, зависит точность последующего математического анализа. К примеру размеры не дают представления о целостной форме (особенно сложной), поэтому сравнение размеров не позволяет корректно выделить похожие формы. А к наиболее распространенным способам достаточно точного количественного описания формы относятся:

- представление формы последовательностью координат точек (меток), расставленных по правилам в геометрически или биологически значимых местах;
- описание границы формы бесконечной последовательностью кривых, которые при суммировании все больше и больше приближаются к исходной форме.

Описание формы метками неоднократно подвергалось критике (Pappas et al., 2014). Поэтому в работе был использован второй подход, в котором граница формы створок была описана последовательностью эллипсов, характеристики которых служат дескрипторами формы. Такие характеристики называются коэффициентами эллиптического преобразования Фурье (Kuhl and Giardina, 1982; Crampton, 1995).

Коэффициенты эллиптического преобразования Фурье (кЭПФ) широко используются для сравнения форм разнообразных объектов: от очертаний раковин двустворчатых моллюсков (Crampton, 1995) и форм створок диатомовых (Wishkerman and Hamilton, 2018), до форм озер на полюсе Титана (Dhingra et al., 2019). Это связано с тем, что коэффициенты позволяют точно описать границу любого плоского контура, они хорошо учитывают геометрию сложных форм и позволяют решить обратную задачу: восстановить контур по значениям коэффициентов.

Классический метод расчета кЭПФ нормирует коэффициенты, то есть исключает влияние на значение коэффициентов поворота контура и положения его стартовой точки (Kuhl and Giardina, 1982; Crampton, 1995). Но при этом на значения нормированных коэффициентов влияет зеркальная симметрия и направление обхода контуров. Это значит, что симметричные контуры одинаковой формы и контуры с противоположным направлением обхода (по и против часовой стрелки) будут описаны разными наборами коэффициентов, что сделает невозможным корректное сравнение форм. Для исключения влияния на коэффициенты зеркальной симметрии и направления обхода нормированные

коэффициенты были согласованы (Лях, 2019). Нормированные и согласованные коэффициенты вычислены в программе «Эль-Фурье» (Программа Эль-Фурье, 2023).

Кластерный анализ использован для выделения по значениям коэффициентов групп похожих форм. Методы кластерного анализа объединяют объекты в группы (кластеры), используя расстояния между признаками объектов. Они относятся к методам обучения без подсказок, то есть решения о принадлежности объекта к тому или иному кластеру метод принимает на основе значений расстояний. Таким образом кластерный анализ является объективным способом группировки форм.

К настоящему времени описано несколько десятков алгоритмов кластеризации (Ezugwu et al., 2022; Henning, 2022). Из них биологам наиболее привычна агломеративная иерархическая кластеризация, результатом которой является дендрограмма. Она использована для кластеризации форм створок диатомовых по значениями коэффициентов.

Метод дихотомически объединяет в кластеры все объекты. Итоговое число кластеров определяется значением порога, без которого оно совпадает с количеством объектов. В работе для прослеживания динамики изменения состава кластеров дендрограммы были разделены на 6, 10 и 20 кластеров. Всего было кластеризовано 66 форм створок диатомовых, взятых из работы Гогорева и др. (Гогорев и др., 2023).

Разновидности метода иерархической кластеризации отличаются способами измерения расстояния между кластерами – мерой. Для кластеризации использовано три меры: полное расстояние (complete linkage), среднее расстояние (average linkage) и расстояние Варда (Wards). В результате получено три дендрограммы, с отличающимся составом кластеров.

Среди полученных кластеров были выделены независимые от меры, устойчивые группы форм, которые присутствуют во всех вариантах кластеризаций. Считалось, что именно эти группы содержат типовые формы. Для каждой группы была построена средняя форма. Для этого были вычислены средние значения коэффициентов, составляющих каждую группу форм, и по ним, при помощи обратного эллиптического преобразования Фурье, были восстановлены средние формы.

Средние формы считались типовыми. Они служили образцом для классификации прочих форм створок диатомовых, а также для выбора изображения диатомовых с похожими формами створок из *Архипа* – библиотеки опубликованных изображений одноклеточных водорослей (Архип, 2023).

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ «Закономерности формирования и антропогенная трансформация биоразнообразия и биоресурсов Азово-Черноморского бассейна и других районов Мирового океана» (гос. регистрационный № 121030100028-0).

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. *Архип*. Библиотека опубликованных изображений одноклеточных водорослей. 2023. <https://3d-microalgae.org/archip> (дата обращения: 07.06.2023).
2. Гогорев Р.М., Гололобова М.А., Лях А.М., Дорофеев Н.И. Основные формы створок диатомовых водорослей: терминология. II. Формы створок, симметричные относительно трансапикальной оси, и переходные (комбинированные) формы // *Новости систематики низших растений*. 2023. Т. 57-1. С. 7–26. <https://doi.org/10.31111/nsnr/2023.57.1.7>
3. Гололобова М.А., Гогорев Р.М., Лях А.М., Дорофеев Н.И. Основные формы створок диатомовых водорослей: терминология. I. Формы створок, симметричные относительно апикальной оси, и формы с радиальной симметрией // *Новости систематики низших растений*. 2022. Т. 56-1. С. 29–54. <https://doi.org/10.31111/nsnr/2022.56.1.29>

4. Лях А.М. Анализ биологических форм на основе согласованных коэффициентов эллиптического преобразования Фурье // Наука Юга России. 2019. Т. 15, № 4. С. 63–70. <https://doi.org/10.7868/S25001640190408>
5. Программа Эль-Фурье. Описывает субъективную форму объективными числовыми коэффициентами. 2023. <https://antonlyakh.ru/elfourier> (дата обращения: 01.06.2023).
6. *Dhingra R.D., Barnes J.W., Hedman M.M., Radebaugh J.* Using elliptical Fourier descriptor analysis (EFDA) to quantify Titan lake morphology // *The Astronomical Journal*. 2019. V. 158, № 6. P. 1–13. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab4907>
7. *Ezugwu A.E., Ikotun A.M., Oyelade O.O., Abualigah L., Agushaka J.O., Eke C.I., Akinyelu A.A.* A comprehensive survey of clustering algorithms: state-of-the-art machine learning applications, taxonomy, challenges, and future research prospects // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2022. V. 110. 104743. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.104743>
8. *Henning C.* An empirical comparison and characterization of nine popular clustering methods // *Advances in Data Analysis and Classification*. 2022. V. 16. P. 201–209. <https://doi.org/10.1007/s11634-021-00478-z>
9. *Kuhl F., Giardina C.* Elliptic Fourier features of a closed contour // *Computer Graphics and Image Processing*. 1982. V. 18. P. 236–258. [https://doi.org/10.1016/0146-664X\(82\)90034-X](https://doi.org/10.1016/0146-664X(82)90034-X)
10. *Pappas J.L., Kociolek J.P., Stoermer E.F.* Quantitative morphometric methods in diatom research // *Nova Hedwigia Beihefte*. 2014. 143: 281–306. <https://doi.org/10.1127/1436-7270/2014/015>
11. *Wishkerman A., Hamilton P.B.* Shape outline extraction software (DiaOutline) for elliptic Fourier analysis application in morphometric studies // *Applications in Plant Science*. 2018. 6(12): e1204. <https://doi.org/10.1002/aps3.1204>

Разнообразие жирных кислот диатомовых водорослей

Fatty acids diversity of diatoms

Мальцев Е.И., Кривова З.В., Мальцева С.Ю., Куликовский М.С.

Yevhen I. Maltsev, Zinaida V. Krivova, Svetlana Y. Maltseva,
Maxim S. Kulikovskiy

Институт физиологии растений имени К.А. Тимирязева РАН (Москва, Россия)

maltsev.ye@yandex.ru

Изучение состава жирных кислот общих липидов в биомассе центрических и пеннатных диатомовых водорослей позволило проанализировать биотехнологический потенциал 62 штаммов микроводорослей, выделенных из разнотипных экосистем. Установлено, что профили жирных кислот диатомовых водорослей в первую очередь богаты длинноцепочечными жирными кислотами (до 97,9% от общего количества), в меньшей степени – жирными кислотами с средней и очень длинной цепью. У исследованных штаммов содержание омега-3 жирных кислот достигало 38,7%. Учитывая полученные результаты сделан вывод, что среди изученных диатомовых водорослей присутствуют ценные для биотехнологии штаммы.

Ключевые слова: биотехнология; общие липиды; омега-3; продуценты

The study of the fatty acids content of total lipids in the biomass of centric and pennate diatoms made it possible to analyse the biotechnological potential of 62 microalgae strains isolated from diverse ecosystems. It has been established that the fatty acid profiles of diatoms are primarily rich in long-chain fatty acids (up to 97.9% of the total), to a lesser extent – in medium-chain and very-long-chain fatty acids. In the studied strains, the content of omega-3 fatty acids reached 38.7%. Considering the obtained results, it was concluded that among the studied diatoms, there are strains valuable for biotechnology.

Keywords: biotechnology; total lipids; omega-3; producers

Жирные кислоты, выполняя структурную, энергетическую и регуляторную функции, являются одними из ключевых соединений, обеспечивающих физиологически нормальное функциональное состояние клеток водорослей, а также выступают маркером их метаболического статуса (de Carvalho, Caramujo, 2018). Кроме того, регуляция соотношения насыщенные-ненасыщенные жирные кислоты в составе клеточных структур обеспечивает адаптационную функцию клетки к пероксидному окислению и спровоцировавшему его стрессу. Следовательно изучение состава жирных кислот культуры водорослей позволяет оценить ее функциональное состояние, стадию роста и характер реализации защитных функций.

Всего проведено изучение состава жирных кислот общих липидов 62 штаммов почвенных, пресноводных и солоноводных диатомовых водорослей. В составленных профилях присутствовали основные группы жирных кислот: с средней цепью (10–14 атомов углерода), длиной (16–18 атомов углерода) и очень длинной цепью (более 20 атомов углерода) (Maltsev, Maltseva, 2021). Жирные кислоты с короткой цепью (6–8 атомов углерода) не были обнаружены.

Жирные кислоты со средней длиной цепи достаточно часто отмечались в составе липидов исследованных штаммов микроводорослей, но в незначительных количествах. Каприновая 10:0 кислота обнаружена у диатомовых водорослей в диапазоне 0,2–0,3% от общего количества жирных кислот с максимальным значением у почвенного штамма VP290 *Pinnularia vietnamogibba* Kezlya, Maltsev, Krivova et Kulikovskiy (Kezlya et al., 2022). Лауриновая 12:0 кислота отмечена в профилях с концентрацией 0,1–3,1%, при этом ее наибольшее количество наблюдалось в биомассе пресноводного штамма B734 *Pinnularia* sp. Среди жирных кислот со средней длиной цепи наибольшие концентрации обнаружены для миристиновой 14:0 кислоты – 0,1–14,4%, при этом присутствовала она в профилях 95% изученных штаммов. Максимальными концентрациями 14:0 кислоты характеризовались штаммы морских и солоноводных диатомовых водорослей: 10,6% у штамма svn307 *Halamphora* sp., 11,0% у mns105 *Nitzschia pusilla* Grunow и 14,4% у krs12 *Halamphora* sp. В целом известно, что диатомовые водоросли могут накапливать достаточно большие концентрации миристиновой 14:0 кислоты, например, *Nitzschia palea* (Kützing) W.Smith – до 26,1% (Lang et al., 2011), *Chaetoceros* sp. CS256 – 23,6% (Renaud et al., 2002). Среди мононенасыщенных среднецепочечных жирных кислот обнаружена небольшая концентрация 14:1n-7 кислоты у морского штамма svn529 *Karayevia* sp.

Длинноцепочечные жирные кислоты синтезируются в пластидах эукариотических водорослей и составляют основу их жирнокислотных профилей (Maltsev, Maltseva, 2021). В исследуемой выборке суммарное содержание длинноцепочечных жирных кислот было в диапазоне 71,7–97,9% с максимальным значением у почвенного штамма MZ–BH44 *Hantzschia* sp. При этом нами отмечено разное соотношение между C16 и C18 жирными кислотами. Некоторые проанализированные штаммы водорослей характеризовались накоплением преимущественно C16 жирных кислот в сравнении с C18 – в первую очередь это солоноводные штаммы. Так, у штамма svn513 *Amphora* cf. *makarovae* содержание C16 жирных кислот составляло 80,4%, у штамма mns86 *Nitzschia* sp. – 80,8%, а максимум зафиксирован у штамма mns67 *Stephanocyclus meneghiniana* (Kützing) Kulikovskiy, Genkal et Kociolek – 83,7%. Повышенная способность диатомовых водорослей к накоплению C16 жирных кислот отмечалась и ранее, однако с меньшими значениями, например, в профиле жирных кислот *Chaetoceros* sp. их было 55,2% (Renaud et al., 2002). Наоборот, преобладание C18 жирных кислот в сравнении с C16 установлено для почвенных диатомовых водорослей. Например, у штамма VP249 *Humidophila* sp. отмечено содержание C18 жирных кислот на уровне 64,2%. Близкими значениями характеризовался штамм VP280 *Pinnularia insolita* Kezlya, Maltsev, Krivova et Kulikovskiy – 66,0%, а максимальная концентрация C18 жирных кислот обнаружена в биомассе штамма VP289 *Pinnularia microgibba* Kezlya, Maltsev, Krivova et Kulikovskiy – 73,1% (Kezlya et al., 2022).

У диатомовых водорослей жирные кислоты с очень длинной углеродной цепью разнообразны и могут накапливаться в значительных количествах (Lang et al., 2011). Максимальное содержание бегеновой 22:0 кислоты (3,1%) обнаружено в биомассе штамма B749 *Pinnularia* sp., а лигноцериновой 24:0 кислоты (4,6%) – у штамма svn307 *Halamphora* sp. Невысокие концентрации церотиновой 26:0 кислоты (0,2%) отмечены у штамма svn513 *Amphora* cf. *makarovae*. Лидерами по накоплению незаменимой омега-6 дигомо-γ-линоленовой 20:3n-6 кислоты были штаммы B675 и B734 – пресноводные представители рода *Pinnularia* Ehrenberg, в профилях которых данной кислоты было 4,0–5,6%. Наибольшим содержанием (5,1–7,7%) ценной арахидоновой 20:4n-6 кислоты характеризовались штаммы mns7 и mns105 *Nitzschia pusilla*, VP298 *Fallacia* sp. с максимальным значением у штамма mns7. Значимые концентрации (4,1 и 8,4%) омега-6 докозатетраеновой 22:4n-6 кислоты зафиксированы в биомассе пресноводных

центрических диатомовых водорослей: M243 *Cyclostephanos invisitatus* (M.H.Hohn et Hellerman) E.C.Theriot, Stoermer et Håkansson и ryb101 *Stephanodiscus* sp. Активным синтезом незаменимой омега-3 эйкозапентаеновой 20:5n-3 кислоты отличались пресноводные центрические штаммы ryb117 и ryb415 *Cyclotella* sp., которые накапливали данную кислоту в диапазоне 15,0–18,9% от общего содержания жирных кислот. Обнаружено, что ценная докозапентаеновая 22:5n-3 кислота в небольших количествах (до 3,8%) может синтезироваться штаммом диатомовых водорослей M189 *Cyclostephanos invisitatus*. Незаменимая омега-3 докозагексаеновая 22:6n-3 кислота в незначительных количествах накапливается в биомассе солоноводных пенистых штаммов svn544 и svn532 *Navicula salinicola* Hustedt – до 1,2% и у центрических пресноводных штаммов из рода *Cyclotella* (Kützing) Brébisson – до 2,5%.

Общей чертой всех изученных профилей жирных кислот является доминирование насыщенных жирных кислот у почвенных штаммов в диапазоне от 53,2% до 92,4%. При этом у пресноводных штаммов насыщенные жирные кислоты составляли меньшую часть – от 11,5 до 63,1% общего количества жирных кислот. У данной группы диатомовых водорослей значительно больше отмечено мононенасыщенных жирных кислот – в диапазоне 14,0–64,5%. У солоноводных штаммов помимо насыщенных жирных кислот (до 81,3%) также обнаружено высокое содержание полиненасыщенных жирных кислот (до 33,7%). У исследованных штаммов содержание омега-3 жирных кислот было в пределах 0,2–38,7% с минимальным значением у почвенного штамма MZ-BH14 *Hantzschia amphioxys* (Ehrenberg) Grunow, а максимальным – у пресноводного штамма M189 *Cyclostephanos invisitatus*. В целом, учитывая полученные профили, можно сделать вывод, что среди изученных штаммов диатомовых водорослей присутствуют ценные продуценты жирных кислот для биотехнологической промышленности.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-74-10081).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. de Carvalho C.C.C.R., Caramujo M.J. The various roles of fatty acids // *Molecules*. 2018. V. 23, P. 2583. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules23102583>.
2. Kezlya E., Maltsev Y., Genkal S., Krivova Z., Kulikovskiy M. Phylogeny and fatty acid profiles of new *Pinnularia* (Bacillariophyta) species from soils of Vietnam // *Cells*. 2022. V. 11, № 15. P. 2446. DOI: <https://doi.org/10.3390/cells11152446>.
3. Lang I., Hodac L., Friedl T., Feussner I. Fatty acid profiles and their distribution patterns in microalgae: a comprehensive analysis of more than 2000 strains from the SAG culture collection // *BMC Plant Biology*. 2011. V. 11. P. 124. DOI: <https://doi.org/10.1186/1471-2229-11-124>.
4. Maltsev Y., Maltseva K. Fatty acids of microalgae: diversity and applications // *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 2021. V. 20. P. 515–547. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11157-021-09571-3>.
5. Renaud S.M., Thinh L.V., Lambrinidis G., Parry D.L. Effect of temperature on growth, chemical composition and fatty acid composition of tropical Australian microalgae grown in batch cultures // *Aquaculture*. 2002. V. 211. P. 195–214. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(01\)00875-4](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(01)00875-4).

**Воздействие ультразвука на формирование таксоцены
диатомовых на искусственных субстратах с целью защиты
систем технического водоснабжения атомных электростанций**

**Ultrasound impact on the formation of diatom taxa on artificial
substrates to protect the technical water supply systems
of nuclear power plants**

Неврова Е.Л.¹, Петров А.Н.¹, Мороз Н.А.², Касьянов А.Б.²

**Elena L. Nevrova, Alexei N. Petrov, Natalya A. Moroz,
Anatolyi B. Kasyanov**

¹ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН
(Севастополь, Россия)

²АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных
электростанций» (Москва, Россия)

el_nevrova@mail.ru

В условиях лаборатории и морской акватории проведены длительные эксперименты по изучению ультразвукового воздействия с различными параметрами интенсивности и продолжительности на формирование микроперифитона бетонных и стальных субстратов. Полученные результаты позволяют рекомендовать проведение экспериментальных работ на полнофункциональном устройстве более высокой мощности в условиях работающей атомной электростанции.

Ключевые слова: биопомехи; методы защиты; технологическое оборудование; электростанции; Bacillariophyta

Long-term experimental studying of ultrasonic impact with different intensity and duration on microperiphyton on concrete and steel substrates were performed under laboratory and marine conditions. Obtained result allows to recommend expanding experiments using full-functional ultrasonic device of higher power under the conditions of nuclear power plant.

Keywords: biofouling; ultrasonic protection methods; technological equipment; power plants; Bacillariophyta

Эксплуатация систем технического водоснабжения атомных электростанций (СТВ АЭС) часто усложняется вследствие образования биообрастаний, что приводит к снижению эффективности энергоблоков и необходимости очистки, ремонта либо замены технологического оборудования (Звягинцев и др., 2015; Протасов и др., 2011). Интенсивное развитие массовых видов организмов-обрастателей в водоемах подпитки АЭС и водоемах-охладителях вызывает комплексные нарушения работы СТВ АЭС: коррозию и сужение трубопроводов, неисправности работы подвижек различных систем, в т.ч. систем безопасности. Общий ущерб от биопомех на АЭС и ТЭС уже в прошлом

десятилетия превысил 11 млрд. руб. (Калайда и др., 2008). Начальным звеном микроперифитона, формирующегося на поверхностях СТВ АЭС, являются бактерии и бентосные диатомовые водоросли, образующие первичную биопленку и благоприятную среду для последующего оседания и развития сообщества макроперифитона (макрофиты, моллюски, усоногие раки, трубчатые полихеты, асцидии и др.) (Ковальчук и др., 2008, Неврова, 2022).

Одним из безреагентных методов превентивной защиты и очистки оборудования от биопомех является ультразвуковая установка (УЗУ). Эффект метода ультразвуковой обработки технологического оборудования основан на излучении, вызывающем образование кавитационных пузырьков в тканях гидробионтов, что снижает их возможности оседания на субстрат и последующего развития (Мороз и др., 2021). Разработанная сотрудниками АО «ВНИИАЭС» УЗУ применима для комплексной борьбы с биопомехами, позволяя осуществлять профилактическую защиту оборудования от обрастаний, избежать останова СТВ АЭС, вывода в ремонт и проведения чистки. Данный метод борьбы с обрастаниями экологически безопасен за счет обработки УЗ водных масс в системах оборотного водоснабжения. На основе экспериментальных данных подбираются наиболее эффективные параметры воздействия УЗ на перифитон, что позволяет как предупредить формирование сообществ микро- и макрообрастаний на поверхностях СТВ, так и избежать массовой гибели гидробионтов-фильтраторов в водоемах АЭС (Звягинцев и др., 2015; Мороз и др., 2021).

Длительные эксперименты проведены сначала в лабораторных условиях, имитирующих естественную обстановку в морской среде, затем непосредственно в морской акватории. Изучено влияние УЗУ с различными параметрами интенсивности и продолжительности воздействия на формирование таксоценоза Bacillariophyta на образцах из стали и бетона – основных материалов, из которых изготовлены элементы СТВ АЭС.

На первом этапе воздействия УЗУ отмечено первичное стимулирование развития микроперифитона как на бетонном, так и на металлическом субстрате.

На втором этапе эксперимента увеличение частоты воздействия и длительности облучения УЗУ выразительно повлияло на диатомовые водоросли. По истечении пяти месяцев эксперимента повышенная интенсивность воздействия УЗУ (мощность 500 Вт, частота $28.5 \pm 5\%$ кГц, сила тока 3 А, периодичность работы 5 раз в неделю по 8 часов в день) вызвала значительное уменьшение плотности поселения (в 2–4 раза) и видового богатства диатомовых на обоих типах субстрата, по сравнению с контролем и с данными предыдущих месяцев. На всех типах субстрата, независимо от условий эксперимента, доминировали мелкоклеточные виды из родов *Navicula* Vory 1822 и *Nitzschia* Hassall 1845. Всего обнаружено 30 видов бентосных диатомовых, относящихся к 21 роду, 17 семействам, 13 порядкам и 3 классам Bacillariophyta.

Результаты экспериментов в лабораторных и натуральных условиях свидетельствуют об эффективном воздействии повышенных параметров УЗУ на уменьшение интенсивности обрастания бетонного и металлического субстратов, по сравнению с контрольными образцами. На основании полученных данных рекомендуется проведение экспериментальных работ на полнофункциональной УЗУ более высокой мощности в условиях работающей АЭС (Мороз и др., 2021).

Работа выполнена в отделе Экологии бентоса ФИЦ ИнБЮМ в рамках Госзадания № 121030100028-0 по теме «Закономерности формирования и антропогенная трансформация биоразнообразия и биоресурсов Азово-Черноморского бассейна и других районов Мирового океана», а также в рамках поисковых работ АО «ВНИИАЭС».

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. *Звягинцев А.Ю., Полторуха О.П., Масленников С.И.* Обрастание морских систем технического водоснабжения и анализ методов защиты от обрастания в водоводах (аналитический обзор) // *Вода: химия и экология*. 2015. №1. С. 37–60.
2. *Калайда М.Л., Новикова Г.В., Синюткина Т.П., Шмакова А.А.* Борьба с биообрастаниями – важная задача энерго- и ресурсосбережения // *Энергетика Татарстана*. 2008. №2 (10). С. 51–55. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12898466>
3. *Ковальчук Ю.Л., Неврова Е.Л., Шалаева Е.А.* Диатомовые обрастания твердых субстратов. – М.: КМК, 2008. – 174 с.
4. *Мороз Н.А., Неврова Е.Л., Замыслова Т.Н., Касьянов А.Б., Петров А.Н., Ревков Н.К.* Методы борьбы с биообрастаниями на атомной электростанции // Орлова М.И., Родионов В.А. (ред.) Проблемы создания защитных покрытий нового поколения от коррозии, биообрастания и обледенения для морских, береговых и сухопутных объектов. – СПб: Изд-во СПбГЭУ, 2021. – С. 94–103. <https://elibrary.ru/item.asp?id=47360095>
5. *Неврова Е.Л.* Разнообразие и структура таксоценов бентосных диатомовых водорослей (Bacillariophyta) Чёрного моря. – Севастополь: ФИЦ ИнБЮМ, 2022. – 329 с. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/12192>
6. *Протасов А.А., Семенченко В.П., Силаева А.А., Тимченко В.М., Бузевич И.Ю., Гулейкова Л.В., Дьяченко Т.Н., Морозова А.А., Юришинец В.И., Ярмошенко Л.П., Примак А.Б., Морозовская И.А., Масько А.Н., Голод А.В.* Техно-экосистема АЭС. Гидробиология, абиотические факторы, экологические оценки. – Киев: Институт гидробиологии НАН Украины, 2011. – 234 с.

Особенности антиоксидантной защиты отдельных представителей пеннатных диатомовых водорослей

Antioxidant protections features of individual pennate diatoms representatives

Яковийчук А.В.¹, Мальцев Е.И.², Куликовский М.С.²

Aleksandr V. Yakoviichuk, Yevhen I. Maltsev, Maxim S. Kulikovskiy

¹Мелитопольский государственный университет (Мелитополь, Россия)

²Институт физиологии растений имени К.А. Тимирязева РАН (Москва, Россия)

alex.yakov1991@gmail.com

Проведено комплексное исследование показателей антиоксидантного статуса двух штаммов диатомовых водорослей: морского svn544 *Navicula salinicola* и почвенного MZ–BL *Mayamaea fossalis*. Результаты позволили установить различия в формировании антиоксидантного ответа клеток на стресс, которые обусловлены как видовыми, так и экологическими особенностями исследованных штаммов.

Ключевые слова: *Navicula salinicola*; *Mayamaea fossalis*; ферменты; витамины; жирные кислоты; каротиноиды; хлорофиллы

A comprehensive study of the indicators of the antioxidant status of two strains of diatoms was carried out: marine svn544 *Navicula salinicola* and soil MZ–BL *Mayamaea fossalis*. The results allowed us to establish differences in the antioxidant response of cells to stress, which are due to both species and environmental characteristics of the studied strains.

Keywords: *Diatomae*; *Navicula salinicola*; *Mayamaea fossalis*; enzymes; vitamins; fatty acids; carotenoids; chlorophylls

Многие штаммы диатомовых водорослей широко используются для биотехнологического производства биологически-активных веществ (Smerilli et al., 2016). Однако вопрос поиска продуктивных и неприхотливых к условиям культивирования штаммов все же стоит очень остро. Кроме того, устойчивые штаммы являются наиболее интересными, ведь производство многих веществ индуцируется стрессорами различного генеза, однако любые процессы стрессирования сопровождаются интенсификацией процессов липидной пероксидации (ПОЛ), и основная нагрузка ложится на систему антиоксидантной защиты (АОЗ). Это ведет к развитию оксидативного стресса – нарушению баланса между производством и инактивацией активных форм кислорода АФО (Almeida et al., 2017), или формированию антиоксидантного ответа (Kurutas, 2016; Cao et al., 2022). Антиоксидантный ответ сопровождается метаболическими перестройками систем клетки, которые как напрямую (система АОЗ), так и опосредованно (жирнокислотный состав, энергетическая система, вторичный метаболизм и др.) принимают участие в формировании компенсаторной реакции на стресс (McLain et al., 2011; Naudí et al., 2013; Cao et al., 2022). Так же стоит

отметить, что антиоксидантный ответ реализуется специфически для различных родов, видов и, как ранее установлено, изолятов одного вида микроводорослей, так же, как и накопление вторичных метаболитов (Goiris et al., 2012; Yakoviiichuk et al., 2023). Поэтому комплексное изучение состояния системы антиоксидантной защиты, жирнокислотного состава, состояния энергетической системы и содержания различных низкомолекулярных антиоксидантов является первоочередным в стратегии выбора штаммов для дальнейшего биотехнологического использования.

На данный момент представленной в литературе информации недостаточно для того, чтобы установить закономерности накопления метаболитов и формирования антиоксидантного ответа для отдельных видов диатомовых водорослей, в частности представителей родов *Navicula* Vory и *Mayamaea* Lange-Bertalot. Если принять во внимание чувствительность биохимических маркеров к экологическим и другим факторам культивирования, становится очевидной необходимость глубоких комплексных исследований отдельных видов и штаммов.

Была поставлена цель на основании биохимических маркеров проанализировать антиоксидантный статус штаммов svn544 *Navicula salinicola* Hustedt и MZ-BL *Mayamaea fossalis* (Krasske) Lange-Bertalot, представляющих различные биотопы (морские, почвенные).

Культивирование морского штамма проводили на среде ESAW, а почвенного – на среде WC в течение 15 дней. Изучали следующие биохимические показатели: содержание хлорофиллов (Chl *a*, *b*, *c*); содержание каротиноидов (Car); содержание витаминов А, Е; глутатионпероксидазную активность (ГПО); каталазную активность (КАТ); супероксиддисмутазную активность (СОД); активность сукцинатдегидрогеназы (СД); содержание ТБК-активных продуктов в исходном гомогенате (ТВААР) и после индукции пероксидного окисления липидов ионами Fe²⁺ (ТВААР_i); состав жирных кислот липидов (ЖК); коэффициент антиоксидантной активности (K_{АОА}); общую ненасыщенность ЖК липидов (N); содержания протеинов. Исследования осуществляли при достижении культурами стационарной фазы роста.

Скрининг штаммов демонстрирует наличие относительно низкого содержания хлорофиллов у штаммов, что характерно для стационарной стадии роста, которая сопровождается катаболизмом хлорофиллов, белков и накопление веществ-цитопротекторов. Стоит отметить, что пигментный состав svn544 представлен тремя типами хлорофиллов Chl *a*, Chl *b*, Chl *c* в концентрациях (0,12±0,01; 0,08±0,07; 0,13±0,06 мг/г сухой массы (DW)). Для MZ-BL весь пул фотосинтетических пигментов сформирован Chl *a* в концентрации 0,23±0,04 мг/г, что на 91,67% выше, чем содержание данного пигмента для svn544. Отсутствие хлорофиллов *b*, *c* у MZ-BL скорее связано с их распадом, что может быть одним из механизмов адаптации к неблагоприятным условиям, и использованием продуктов распада в качестве питательных компонентов, поскольку стационарная фаза обычно наступает из-за лимитированной доступности питательных компонентов в среде культивирования. Хотя суммарное содержание хлорофиллов выше у svn544, соотношение общего содержания каротиноидов к содержанию хлорофилла *a* (Car/Chl *a*) ниже для MZ-BL (17,44 мг/г DW для MZ-BL и 41,08 мг/г DW для svn544), что указывает на повышенную фотосинтетическую активность клеток MZ-BL по отношению к svn544. Повышенный метаболический потенциал подтверждается в 44,79 раз увеличенным содержанием α-токоферола (361,48±22,91 мкг/г DW и 8,06±0,06 мкг/г DW для MZ-BL и svn544), синтез которого происходит при активном фотосинтезе. Это также подтверждается повышенным в 4,78 (в гомогенате) и 1,74 раз (после активации пероксидного окисления ионами Fe²⁺) содержанием вторичных продуктов распада липидов, поскольку во время фотосинтеза и интенсификации энергетических процессов значительно возрастает генерация АФО (Foyer, Hanke, 2022). Однако анаэробное окисление энергетических субстратов

протекает более интенсивно в клетках штамма svn544, на что указывает повышенная на 77,24% активность сукцинатдегидрогеназы, это в свою очередь вызывает снижение антиоксидантного статуса клетки, поскольку СД при превращении субстрата генерирует АФО (Manhas et al., 2020), которые ведут к активации ферментов антиоксидантной защиты. Так у штамма svn544 СОД-активность повышена в 2,63, а ГПО-активность в 2,44 раз относительно MZ-BL, при идентичной КАТ-активности, что указывает на выработку именно супероксида и поражение им двойных связей жирных кислот с образованием пероксидов липидов. Вероятно, это приводит к понижению ненасыщенности ЖК липидов у MZ-BL, и реализует один из альтернативных механизмов повышения антиоксидантной устойчивости клеток. Данный фактор необходимо учитывать при использовании штамма в качестве источника липидов, поскольку формирование антиоксидантного ответа MZ-BL идет с конвертацией или оксидацией ненасыщенных ЖК, что сопровождается снижением пищевой ценности получаемых продуктов. На 72,54% ниже ненасыщенность ЖК липидов MZ-BL относительно svn544, которая реализована в большей степени за счет пониженного в 5,04 раза общего содержания полиненасыщенных ЖК, в основном ω -3 (0,53% и 8,37% для MZ-BL и svn544). В таком случае штамм svn544 может быть ценным с точки зрения получения обогащенных незаменимыми ЖК липидов, так как не задействует, либо задействует в меньшей мере механизм понижения ненасыщенности при формировании антиоксидантного ответа.

В то же время содержание каротиноидов для штаммов находилось на уровне $4,01 \pm 1,10 - 4,93 \pm 0,58$ мг/г DW, что в среднем приближено к нижней границе концентраций для представителей диатомовых – от 2,24 до 21,67 мг/г DW (Kim et al., 2012; Safafar et al., 2015; Namidi et al., 2019), а содержание продукта их прямой конвертации – ретинола было выше у svn544 ($12,76 \pm 0,58$ – svn544; $9,48 \pm 1,62$ мкг/г DW – MZ-BL). Из чего следует вывод, что каротиноиды и их производные имеют незначительный вклад в формирование антиоксидантного ответа для данных штаммов.

Учитывая, что антиоксидантная активность клеток штамма MZ-BL в 2,76 раз выше ($K_{AO3} = 0,21$ и $0,58$, для svn544 и MZ-BL соответственно), а также анализируя описанные выше результаты, очевидно в формировании антиоксидантного ответа для svn544 основной вклад вносит ферментативная ветвь антиоксидантной защиты (СОД, КАТ, ГПО), поскольку их активность значительно повышена при низких концентрациях низкомолекулярных антиоксидантов (каротиноиды, ретинол, α -токоферол), и не задействуются альтернативные механизмы повышения антиоксидантной устойчивости (снижение ненасыщенности жирных кислот липидов, понижение активности энзимов энергообеспечения). У штамма MZ-BL, судя по данным, антиоксидантный ответ реализуется за счет низкомолекулярных антиоксидантов, в первую очередь, α -токоферола, значительного снижения ненасыщенности жирных кислот липидов, а также понижением активности сукцинатдегидрогеназы. Ферментативная ветвь системы АОЗ, вероятно, активируется в условиях более интенсивного или длительного воздействия лимитирующих стресс-факторов и вносит меньший вклад в общий антиоксидантный статус клетки.

Выводы

Установлен повышенный антиоксидантный статус почвенного штамма MZ-BL *Mayamaea fossalis* относительно морского svn544 *Navicula salinicola*. Основной вклад в формирование антиоксидантного ответа у штамма svn544 вносит ферментная система АОЗ, а для MZ-BL – это низкомолекулярное звено АОЗ (α -токоферол), и альтернативные механизмы задействующие энергетический и липидный обмен. С точки зрения биотехнологического использования биомасса данных штаммов представляют собой ценное сырье, которое может использоваться в разных целях из-за различий в реализации антиоксидантной защиты клеток в стресс-условиях. MZ-BL может быть

интересен в качестве источника α -токоферола, который наряду с пониженным содержанием ненасыщенных ЖК будет иметь высокую сохранность. Штамм svn544 является потенциальным источником липидов, обогащенных незаменимыми ω -3,6 жирными кислотами, которые не затрагиваются в процессе формирования антиоксидантного ответа.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-14-00320-П).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

1. Almeida A.C., Gomes T., Langford K., Thomas K.V., Tollefsen K.E. Oxidative stress in the algae *Chlamydomonas reinhardtii* exposed to biocides // *Aquatic Toxicology*. 2017. V.189. P. 50–59. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2017.05.014>
2. Cao Y., Yang K., Liu W., Feng G., Peng Y., Li Z. Adaptive responses of common and hybrid bermudagrasses to shade stress associated with changes in morphology, photosynthesis, and secondary metabolites // *Frontiers in Plant Science*. 2022. V.13. P. 817105. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.817105>
3. Foyer C.H., Hanke G. ROS production and signalling in chloroplasts: cornerstones and evolving concepts // *The Plant Journal: For Cell and Molecular Biology*. 2022. V.111, №3. P. 642–661. DOI: <https://doi.org/10.1111/tpj.15856>
4. Goiris K., Muylaert K., Fraeye I., Foubert I., De Brabanter J., De Cooman L. Antioxidant potential of microalgae in relation to their phenolic and carotenoid content // *Journal of Applied Phycology*. 2012. V.24. P. 1477–1486. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10811-012-9804-6>
5. Hamidi M., Kozani P.S., Kozani P.S., Pierre G., Michaud P., Delattre C. Marine bacteria versus microalgae: Who is the best for biotechnological production of bioactive compounds with antioxidant properties and other biological applications? // *Marine Drugs*. 2019. V.18, №1. P. 28. DOI: <https://doi.org/10.3390/md18010028>
6. Kim S.M., Jung Y.J., Kwon O.N., Cha K.H., Um B.H., Chung D., Pan, C.H. A potential commercial source of fucoxanthin extracted from the microalga *Phaeodactylum tricorutum* // *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2012. V.166, №7. P. 1843–1855. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12010-012-9602-2>
7. Kurutas E.B. The importance of antioxidants which play the role in cellular response against oxidative/nitrosative stress: current state // *Nutrition Journal*. 2016. V.15, №1. P. 71. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12937-016-0186-5>
8. Manhas N., Duong Q.V., Lee P., Richardson J.D., Robertson J.D., Moxley M.A., Bazil J.N. Computationally modeling mammalian succinate dehydrogenase kinetics identifies the origins and primary determinants of ROS production // *The Journal of Biological Chemistry*. 2020. V.295, №45. P. 15262–15279. DOI: <https://doi.org/10.1074/jbc.RA120.014483>
9. McLain A.L., Szweda P.A., Szweda L.I. α -Ketoglutarate dehydrogenase: a mitochondrial redox sensor // *Free Radical Research*. 2011. V.45, №1. P. 29–36. DOI: <https://doi.org/10.3109/10715762.2010.534163>
10. Naudí A., Jové M., Ayala V., Portero-Otín M., Barja G., Pamplona R. Membrane lipid unsaturation as physiological adaptation to animal longevity // *Frontiers in Physiology*. 2013. V.4. P. 372. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphys.2013.00372>
11. Safafar H., van Wageningen J., Møller P., Jacobsen C. Carotenoids, phenolic compounds and tocopherols contribute to the antioxidative properties of some microalgae species grown on industrial wastewater // *Marine Drugs*. 2015. V.13, №12. P. 7339–7356. DOI: <https://doi.org/10.3390/md13127069>
12. Smerilli A., Orefice I., Corato F., Gavalás Olea A., Ruban A.V., Brunet C. Photoprotective and antioxidant responses to light spectrum and intensity variations in the coastal diatom *Skeletonema marinoi* // *Environmental Microbiology*. 2016. V.19, №2. P. 611–627. DOI: <https://doi.org/10.1111/1462-2920.13545>
13. Yakoviichuk A., Krivova Z., Maltseva S., Kochubey A., Kulikovskiy M., Maltsev Y. Antioxidant status and biotechnological potential of new *Vischeria vischeri* (Eustigmatophyceae) soil strains in enrichment cultures // *Antioxidants*. 2023. V.12, №3. P. 654. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox12030654>

Содержание

Секция 1. Биология, морфология и систематика

Булатов С.А.

Изучение морфологии створок диатомовой водоросли
Coscinodiscus radiatus Ehrenberg из морских и гипергалинных экосистем 4

**Глущенко А.М., Кезля Е.М., Мальцев Е.И., Генкал С.И., Коциолек Дж.П.,
Куликовский М.С.**

Sellaphora terrestris Glushchenko, Kezlya, Maltsev & Kulikovskiy
из Вьетнама и замечания по филогении и таксономии рода *Sellaphora*
и систематическому положению рода *Microcostatus* 7

Гогорев Р.М., Пушина З.В.

Бесшовные пеннатные диатомовые из морских миоценовых отложений
массива Фишер (горы Принс-Чарльз, Восточная Антарктида) 10

Гололобова М.А., Пушина З.В., Гогорев Р.М., Георгиев А.А.

Загадочная ископаемая центрическая диатомовая из Антарктиды 13

Капустин Д.А., Филиппов Д.А., Шадрин С.Н., Куликовский М.С.

Новые морфотипы стоматоцист золотистых водорослей из Шиченгского
верхового болота (Вологодская область) 16

Лобус Н.В., Глущенко А.М., Мальцев Е.И., Куликовский М.С.

Fragilaria shirshovii sp. nov. – новый вид арафидных диатомовых водорослей
(Bacillariophyta, Fragilariophyceae) из Обского эстуария (Карское море, Арктика) 18

Цеплик Н.Д.

Современная систематика и филогения ахнантоидных диатомовых 20

Юрчак М.И., Гогорев Р.М., Соколова И.В., Куликовский М.С., Глущенко А.М.

Номенклатура и таксономия двух байкальских видов *Cocconeis*
(Bacillariophyta): *Cocconeis baikalensis* и *Cocconeis skvortzowii* 22

Секция 2. Генетика, эволюция и филогения; флористика, биогеография и фитоценология

Байрамова Э.М., Марченков А.М., Захарова Ю.Р., Петрова Д.П., Бедошвили Е.Д.

Роль метакаспаз в развитии и гибели клеток в лабораторной культуре
диатомовой водоросли *Ulnaria acus* (Kützing) Aboal 26

Бедошвили Е.Д., Байрамова Э.М., Морозов А.А., Петрова Д.П.

Сравнительный анализ компонентов микротрубочкового центра
у диатомовых водорослей 29

Гогорев Р.М., Юрчак М.И., Мельников И.А.

Предварительные данные о ледовой и планктонной флоре
Арктического бассейна (по результатам экспедиции «СП-41», 2022–2023 гг.) 32

Еремкина Т.В.

Разнообразие диатомовых водорослей в водоемах Курганской области 35

Игнатенко М.Е., Яценко-Степанова Т.Н. Диатомовые водоросли озера Журманколь (государственный природный заповедник «Оренбургский»)	39
Кезля Е.М., Ризаев Ш.Ю., Лупандин-Петренко К.С., Рассадкин П.С., Фундовой Д.И., Куликовский М.С. Генетическое разнообразие некоторых распространенных видов диатомовых водорослей	42
Корбут Д.Е. Диатомовые водоросли оз. Янычково (Свердловская область)	45
Кулизин П.В., Воденеева Е.Л., Шарагина Е.М., Охупкин А.Г. Диатомовые водоросли фитопланктона рек юга таежной зоны в пределах водосбора Средней Волги	48
Макаревич П.Р., Ларионов В.В., Дружкова Е.И., Олейник А.А. Диатомеи донных биотопов континентального шельфа Баренцева моря	51
Макарёноква Н.Н. – Диатомовые водоросли в подледном фитопланктоне озера Воже и его притока – реки Вожеги (Вологодская область)	54
Патова Е.Н., Гусев Е.С., Шабалина Ю.Н., Новаковская И.В., Сивков М.Д. Разнообразие диатомовых водорослей в биологических почвенных корках северных регионов Урала на основе морфологических и метагеномных подходов	58
Рассадкин П.С., Лупандин-Петренко К.С., Фундовой Д.И., Джурко А.П., Алпатов С.О., Капустин Д.А., Куликовский М.С. К флоре диатомовых водорослей р. Тулома (Мурманская обл.)	60
Свирид А.А., Михеева Т.М., Петров В.Н. Видовой состав летнего комплекса диатомовых водорослей эпифитона <i>Ceratophyllum demersum</i> L. в реке Припять (Национальный парк «Припятский»)	62
Степанова В.А. Бентосные диатомовые водоросли восточной части Финского залива Балтийского моря	65
Шарагина Е.М., Воденеева Е.Л., Кулизин П.В., Мольков А.А., Середнева Я.В., Бондарев О.О., Охупкин А.Г. Состав и структура диатомовых водорослей в зоне влияния Нижегородской ГЭС	68
<u>Секция 3. Использование диатомовых водорослей в биостратиграфии и палеорекострукциях</u>	
Авраменко А.С., Пушкарь В.С. Причины высокой продуктивности диатомей в неогеновых водоемах Южного Приморья	72
Агафонова Е.А., Ключиткина Т.С., Кравчишина М.Д., Чеховская М.П., Лозинская Л.А. Состав диатомовых ассоциаций голоценовых отложений северо-восточной части Норвежско-Гренландского бассейна	76

Валиева Э.А., Фролова Л.А., Нигматуллин Н.М., Глушко П.А. Диатомовый анализ донных отложений тундрового озера бассейна реки Еркута (полуостров Ямал, Россия)	80
Гладенков А.Ю. Структура четвертичной и неогеновой систем в Международной стратиграфической шкале: модификации последних лет	85
Ковалёва Г.В. Результаты диатомового анализа колоннок донных отложений из южной части Азовского моря и Керченского пролива	88
Косова А.Л., Денисов Д.Б., Слуковский З.И., Вокуева С.И. Диатомовые комплексы из донных отложений озера Семеновского (г. Мурманск)	91
Лудикова А.В. Диатомовые комплексы в позднеледниковых-голоценовых отложениях озера Большого Щучьего (Полярный Урал)	94
Лысенко Е.И., Макшаев Р.Р. Диатомеи в колонках голоценовых отложений средней части дельты р. Волга (в районе с. Бараний Бугор)	99
Масленникова А.В., Гулаков В.О. Диатомовые комплексы донных отложений озера Яктыкуль (Южный Урал)	102
Мехоношина Е.А. Обзор материалов изучения диатомовых в Пермском Прикамье и первые результаты диатомового анализа отложений озера Новожилово	106
Обрезкова М.С., Цой И.Б., Астахов А.С. Диатомовые водоросли и геохимические особенности донных осадков морей Восточной Сибири и их значение для палеореконструкций	109
Палагушкина О.В., Фролова Л.А. Диатомовые в отложениях термокарстовых озер в Ямало-Ненецком автономном округе, Западно-Сибирская Арктика, Россия	113
Прушковская И.А., Цой И.Б. Кремнистые микроводоросли в поверхностных осадках Шантарского района Охотского моря	117
Разумовский В.Л., Кушнарера Т.Н. Оценка долговременных трансформаций экологической обстановки на акватории Иваньковского водохранилища	121
Разумовский Л.В. Палеоэкологические реконструкции в позднем голоцене по диатомовым комплексам (проблематика, возможности, решения)	125
Рудинская А.И., Дружинина О.А., Филиппова К.Г., Лазукова Л.И., Жаров А.А., Лаврова Н.Б. Реконструкция условий осадконакопления в палеоводоемах северной части Самбийского полуострова по данным комплексного изучения разреза Куликово	128

Толстоброва А.Н. Предварительные результаты диатомового анализа донных отложений озера Имандра (Кольский регион)	133
Черепанова М.В., Романова А.В., Минюк П.С. Диатомовая летопись эволюции оз. Грязевое (Магаданская область) в голоцене	135
<i>Секция 4. Экология, использование диатомовых водорослей как биоиндикаторов</i>	
Вокуева С.И., Денисов Д.Б., Барина С.С. Оценка современного состояния экосистемы озера Имандра (Россия, Мурманская область) с помощью статистических и биоиндикационных методов	140
Габышев В.А., Барина С.С., Генкал С.И. Новые данные об очаге биоразнообразия диатомовых водорослей в окрестностях заповедника «Усть-Ленский» в Арктике	143
Глущенко Г.Ю. Оценка качества воды некоторых водоемов Ростовской области (Россия)	146
Дорохова М.Ф. Почвенные диатомовые водоросли районов нефтепромыслов	151
Дружкова Е.И., Венгер М.П., Сажин А.Ф. Структура и продуктивность фитопланктонного сообщества на юго-западе Карского моря в начале летнего периода	155
Корнева Л.Г. Диатомовые водоросли крупных равнинных водохранилищ волжского бассейна: эколого-ценотические аспекты	159
Михайлов В.В. Диатомовые водоросли Новосибирского водохранилища как показатели качества его вод	162
Намятов А.А., Пастухов И.А. Изменение соотношения запасов биогенных элементов при продукции и минерализации диатомовых и других систематических групп водорослей в Баренцевом море	165
Петров В.Н., Карпаева А.Ю. Роль диатомовых водорослей в фитопланктоне дистрофных озер	170
Разумовский Л.В., Разумовский В.Л., Кушнарёва Т.Н., Бугаева Т.Н., Анисимова А.В. Новый алгоритм поиска зон интегральной седиментации на примере Иваньковского и Рыбинского водохранилищ	172
Ясакова О.Н., Корчагина А.В. Диатомовые водоросли в планктоне порта Туапсе (Черное море) в декабре 2022 г.	175

Секция 5. Использование диатомовых водорослей в биотехнологии и для решения прикладных задач

Давидович Н.А. Интересные виды в коллекции диатомовых водорослей Карадагской научной станции	179
--	-----

Кривова З.В., Мальцев Е.И., Кезля Е.М., Куликовский М.С. Сравнение профилей жирных кислот штаммов диатомовых водорослей рода <i>Mayamaeua</i>	182
Лях А.М. Кластерный анализ некоторых форм створок диатомовых водорослей	185
Мальцев Е.И., Кривова З.В., Мальцева С.Ю., Куликовский М.С. Разнообразие жирных кислот диатомовых водорослей	189
Неврова Е.Л., Петров А.Н., Мороз Н.А., Касьянов А.Б. Воздействие ультразвука на формирование таксоцена диатомовых на искусственных субстратах с целью защиты систем технического водоснабжения атомных электростанций	192
Яковичук А.В., Мальцев Е.И., Куликовский М.С. Особенности антиоксидантной защиты отдельных представителей пеннатных диатомовых водорослей	195