

## 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,  $\beta$ -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,  $\beta$ -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 км<sup>2</sup>. Вода в озере гидрокарбонатная магниево-кальциевая с минерализацией около 200 мг/дм<sup>3</sup>. Согласно данным 2021–2022 гг., содержание общего фосфора (TP) в летней и весенней воде с места отбора колонки донных отложений составляет 8–10 мкг/дм<sup>3</sup>, а концентрация общего азота (TN) – 0,31–0,41 мг/дм<sup>3</sup>. Концентрация TP в начале октября 2021 года – 48 мкг/дм<sup>3</sup>, а TN – 0,56 мг/дм<sup>3</sup>. 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  $^{210}\text{Pb}$  (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  $\beta$ -мезосапробами, по трофическому статусу — мезо-эвтрофами 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  $^{210}\text{Pb}$ , 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 *Cymbella falsata diluviana*, *Aulacoseira ambigua*, *Pantocsekiella 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 *Pantocsekiella 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 ( $35 \text{ мкг/дм}^3$ ) по сравнению с реальным ( $8-10 \text{ мкг/дм}^3$ ). Содержание ТР, полученное на основе региональной трансферной функции ( $17 \text{ мкг/дм}^3$ ) 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. Тургойк 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.