

К 90-летию Н.Н. Давыдовой

**ОЦЕНКА ИНФОРМАТИВНОСТИ МЕТОДА ГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА
НА ПРИМЕРЕ ОЗЕРА БОЛЬШОЕ ДЗИТАКУ (ЗАПАДНЫЙ КАВКАЗ)**

© 2021 г. В. Л. Разумовский*

Институт водных проблем Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: nethaon@mail.ru*

Поступила в редакцию 18.05.2021 г.

После доработки 09.09.2021 г.

Принята к публикации 28.09.2021 г.

Работа посвящена изучению озер Кавказа, наиболее перспективных для применения метода графического анализа таксономических пропорций в диатомовых комплексах. Ранее было изучено семь озер, в которых этот метод признан информативным. Исследования донных отложений оз. Большое Дзитаку проводились по сходному алгоритму. Проведен послойный анализ таксономической структуры диатомовых комплексов. Приводится краткое описание метода и результатов его применения. Установлено, что диатомовые комплексы, сформировавшиеся в центральной части озера, не подвергались значимым процессам переотложения. Полученные результаты позволяют включить оз. Большое Дзитаку в список озер Кавказа, перспективных для дальнейших экологических и палеоклиматических реконструкций позднего голоцена. Рекомендованы дальнейшие исследования на акватории озера с привлечением широкого спектра биологических и физико-химических методов, в том числе возрастные датировки озерных осадков изотопными методами.

Ключевые слова: диатомовые комплексы, горные озера, таксономические пропорции, графический анализ

DOI: 10.31857/S0869607121060057

ВВЕДЕНИЕ

Донные отложения (ДО) озерного генезиса широко используются для палореко-струкций экологических событий в позднем голоцене. Это связано с тем, что озерные осадки обычно содержат кремнеземные панцири диатомей, по которым возможна достоверная реконструкция событийных рядов прошлого, с весьма высоким временным разрешением. При реконструкции палеоклиматических событий наиболее перспективными объектами считаются малые озера (площадь $<1 \text{ км}^2$). Это обусловлено тем, что для многих из них характерна простота очертаний, отсутствие сложной дифференциации рельефа дна, низкие темпы осадконакопления и наличие единой точки интегральной седиментации [5, 13].

При оценке палеоэкологических и палеоклиматических трансформаций, происходящих в озерных экосистемах, широко применяется анализ диатомовых комплексов. Диатомовые водоросли (класс *Bacillariophyceae*, отдел *Ochrophyta*) включены в приори-

тетную биоиндикационную группу, поскольку их створки хорошо сохраняются в донных осадках благодаря наличию кремнеземного панциря [1, 4, 6].

Цель работы — провести оценку степени информативности метода графического анализа (МГА) для диатомовых комплексов из донных отложений оз. Большое Дзитаку.

Для осуществления этой цели было необходимо решить следующие задачи:

1. Произвести послойный анализ диатомовых комплексов из осадков донных отложений оз. Большое Дзитаку.

2. На основании полученных данных выполнить построения в линейной и логарифмической системах координат, согласно МГА.

3. Исходя из полученных данных, установить наличие (или же отсутствие) признаков переотложения в ДО и сделать вывод о дальнейших перспективах работы с объектом исследования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Озеро Большое Дзитаку (43°45'17" с.ш., 40°23'09" в.д.) расположено на территории Кавказского государственного биосферного заповедника, в долине Дзитаку. Озеро находится на высоте 1913 м над ур. м. и его очертания имеют выпукло-вогнутую форму (рис. 1). Длина озера 195 м, ширина 190 м, максимальная глубина более 10 м. На юго-восточном берегу озера расположен вал лавинного происхождения [15].

Экспедиционные исследования проводились сотрудниками Института географии РАН и Института водных проблем РАН. Донные осадки отбирались в юго-восточной части озера, в июле 2012 г., в точке, где отмечены наибольшие глубины (11.5 м).

Поверхностные осадки отбирали стратометром ударно-замыкающего типа с закрывающейся диафрагмой, снаряженным ударными трубками различной длины (от 25 до 40 см). Пробы отбирали двумя способами. На первом этапе пробы отбирали с надувной лодки. Стратометр опускали на дно и после вхождения ударной трубки в грунт и срабатывания замыкающего механизма, стратометр медленно поднимали. Когда он оказывался недалеко от поверхности воды, резиновой пробкой закрывали его нижнюю часть, чтобы при прохождении границы двух сред (вода-воздух) нижняя часть колонки ДО не вывалилась. После подъема стратометра на поверхность ударную трубку отделяли от него и замыкали резиновой пробкой сверху.

Образцы на диатомовый анализ отбирались с интервалом 1 см, за исключением верхнего интервала 0–2 см (обводненный и неконсолидированный слой осадка). Каждый образец помещали в пластиковый бокс и плотно закрывали.

Для выдавливания колонки ДО использовался специальный штоковый поршень. Перед этой операцией, из верхней части трубки удаляли придонный слой воды, попавший в нее вместе с осадком. Придонный слой воды сливали в отдельные пластиковые боксы.

Если результат отбора колонок ДО при помощи стратометра был удовлетворительным (по гранулометрическому составу осадка), то проводился повторный отбор. Для этого использовали надувной катамаран и размещенный на нем бур типа “бур Несье” [16]. Поскольку верхняя неконсолидированная часть осадка (полужидкий сапропель) могла быть потеряна при бурении, образцы с глубины 0–250 мм дополнительно отбирали с помощью ящичного пробоотборника (box-corer) [13].

При такой методике отбора, колонки ДО не разрезали на берегу, а перевозили в специальных пластиковых контейнерах (длиной 100–150 см и диаметром 100 мм) для дальнейшей послойной дифференциации колонок на отдельные образцы в лабораторных условиях. На сегодняшний день, анализ этих колонок ДО не проведен.

Обработка проб, изготовление постоянных препаратов, подсчет и идентификация створок диатомей проводились по стандартным методикам [1, 6, 17]. При подсчете



Рис. 1. Географическое расположение оз. Большое Дзитаку.

Fig. 1. Geographical location of the lake Bolshoe Dzitaku.

створок в препаратах оценивалась только их относительная численность. Помимо традиционных форм диатомового анализа в работе был применен МГА.

МГА состоит в ранжировании таксономических пропорций в диатомовых комплексах. Таксоны ранжируются по показателю относительной численности. При этом по оси абсцисс откладывается число идентифицированных таксонов видового и более низкого рангов (далее в тексте — таксонов), а по оси ординат — их относительная численность.

В результате, в линейной системе координат строится исходная гистограмма (рис. 2а, 2б) [10]. При отсутствии внешнего негативного воздействия на экосистемы водоема для построенных гистограмм характерно нелинейное распределение таксономических пропорций. Обычно это соответствует одной из двух нециклических форм зависимостей, возникающих в экосистемах при ответных реакциях на внешнее воздействие [14]. Ранее, при анализе переотложенных комплексов, была выделена (идентифицирована) третья форма распределения таксономических пропорций, которая имеет линейные очертания [10].

Анализ полученных графиков (гистограмм) проводится в линейной и логарифмической системе координат. В логарифмической системе координат анализируются не сами графики, а их тренды, представленные результирующими прямыми линиями (рис. 2в, 2г). Кроме того, при анализе в логарифмической системе координат, постро-

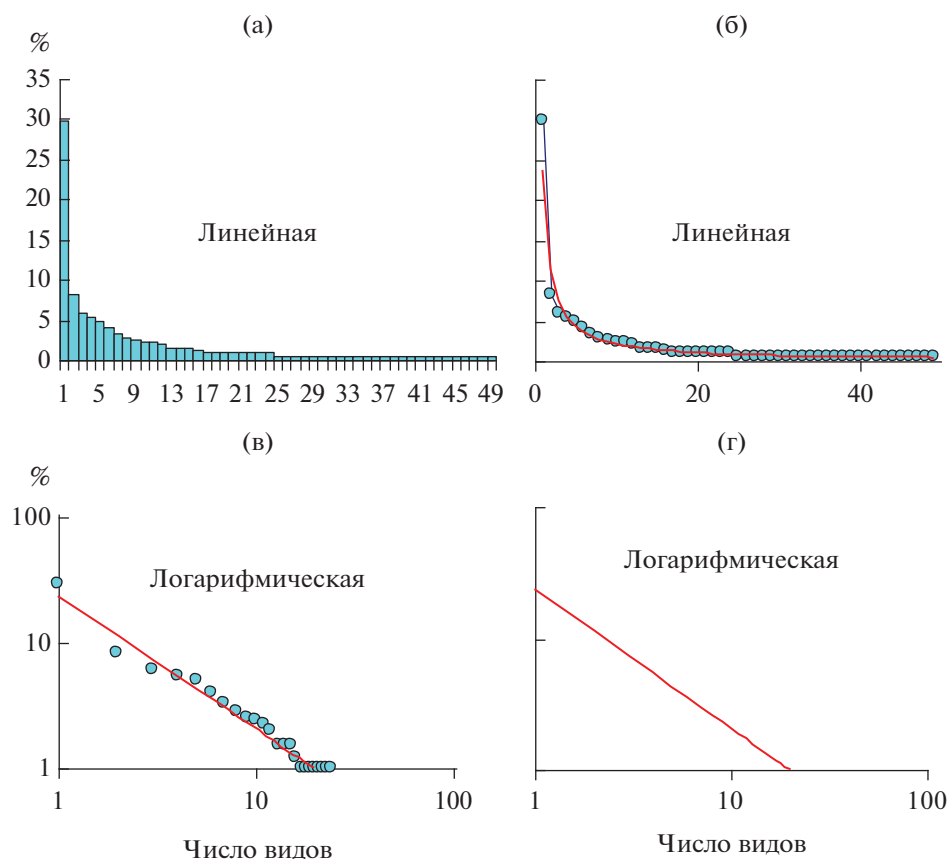


Рис. 2. Методика графического анализа в линейной и логарифмической системе координат (по [10], с сокращениями).

Fig. 2. The method of graphical analysis in a linear and logarithmic coordinate system (according to [10], with abbreviations).

енные результирующие линии образуют определенные устойчивые совокупности или генерации.

Было выявлено три типа генераций [9, 10]. В первом случае образуется устойчивая генерация результирующих линий с единым центром или областью их локализации. Во втором случае также образуется единый центр локализации, но, по сравнению с первым типом, центр локализации заметно смещен “вправо”, на едином графике, на котором построены результирующие линии. В третьем случае образуется генерация, в которой результирующие линии располагаются на графике параллельно. Для малых озер (<1 км²) характерен первый тип генерации результирующих линий.

Следует упомянуть, что в линейной системе координат у полученных графиков или гистограмм всегда образуется “хвост”, состоящий из показателей редких и случайных таксонов, имеющих незначительную относительную численность в диатомовых комплексах.

В отличие от доминирующих и сопутствующих таксонов, представляющих собой некую устойчивую, экологически адаптированную совокупность, в хвостовой части

гистограммы располагается “хаотизированная” часть диатомового комплекса. Это представители таксонов, присутствие или отсутствие которых в каждом биотопе имеет спорадический или случайный характер. Общая совокупность этих таксонов полностью попадает под определение “статистический шум”.

Доминирующие и сопутствующие таксоны составляют около 2/3 от общей относительной численности в комплексе [2]. Это приблизительно соответствует 2σ (где σ — стандартное отклонение при нормальном распределении).

Поэтому, в логарифмической системе координат результирующие линии строились двумя способами: с учетом всего спектра таксонов (чтобы не потерять часть информации) и только с учетом доминирующих и сопутствующих таксонов. В последнем случае треть от общей относительной численности, т.е. “хвост” гистограммы, не учитывалась.

Во всех случаях, в логарифмической системе координат, для результирующих линий рассчитывался коэффициент детерминации (R^2), позволяющий оценить статистическую достоверность проводимых графических построений.

Достоверность оценивается по коэффициенту корреляции (r), который считается удовлетворительным (достоверным), если он более 0.75 (соответственно $R^2 > 0.57$). Кроме того, был проведен расчет минимального корреляционного ряда n_α при котором с вероятностью $P = 1 - \alpha$ можно утверждать, что $\rho \neq 0$ при данном r [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для диатомового анализа были изготовлены постоянные препараты по 24 интервалам апробации, с учетом придонного слоя воды, приповерхностного слоя осадков, и верхнего интервала неконсолидированного слоя ДО (рис. 3а). Общее число идентифицированных в препаратах таксонов составило более 110.

В группу таксонов, доминирующих по всему разрезу колонки, входят: *Achnanthes minutissimum* (Kützing) Czarnecki, *Aulacoseira ambigua* (Grunov) Simonsen, *Aulacoseira subarctica* (Otto Müller) E.Y. Haworth, *Fragilaria construens* var. *subsalina* (Hustedt) N.A. Andersen, E.F. Stroemer & R.G. Kreiss, *Punctactriata glubokoensis* Williams, Chudaev et Gololobova.

После расчета относительной численности (%) всех идентифицированных таксонов, дальнейший анализ первичного материала проводился в рамках МГА. Еще в процессе подсчета относительной численности таксонов в препаратах сформировалось предположение, что формы полученных в дальнейшем гистограмм не будут соответствовать экспоненциальной форме распределения таксономических пропорций. Ранее, в ходе многочисленных исследований было установлено, что экспоненциальная форма распределения присуща подавляющему числу малых озер, если они не подвергаются внешнему негативному воздействию [7–12].

Было сделано предположение, что наиболее вероятное внешнее воздействия связано с регулярным сходом лавин на акваторию озера. Это предположение не подтвердилось. Все полученные гистограммы имели нелинейные, пропорциональные очертания (рис. 3а).

В случае выраженного воздействия лавинного генезиса на уже консолидированные в осадке диатомовые комплексы, распределение таксономических пропорций приобрело бы, в той или иной степени, линейные очертания. Это так же было неоднократно продемонстрировано при анализе таксономической структуры диатомовых комплексов в других горных озерах [7, 11].

Полученные гистограммы имеют смешанные очертания между экспоненциальной и логистической формой распределения таксономических пропорций. Подобные очертания

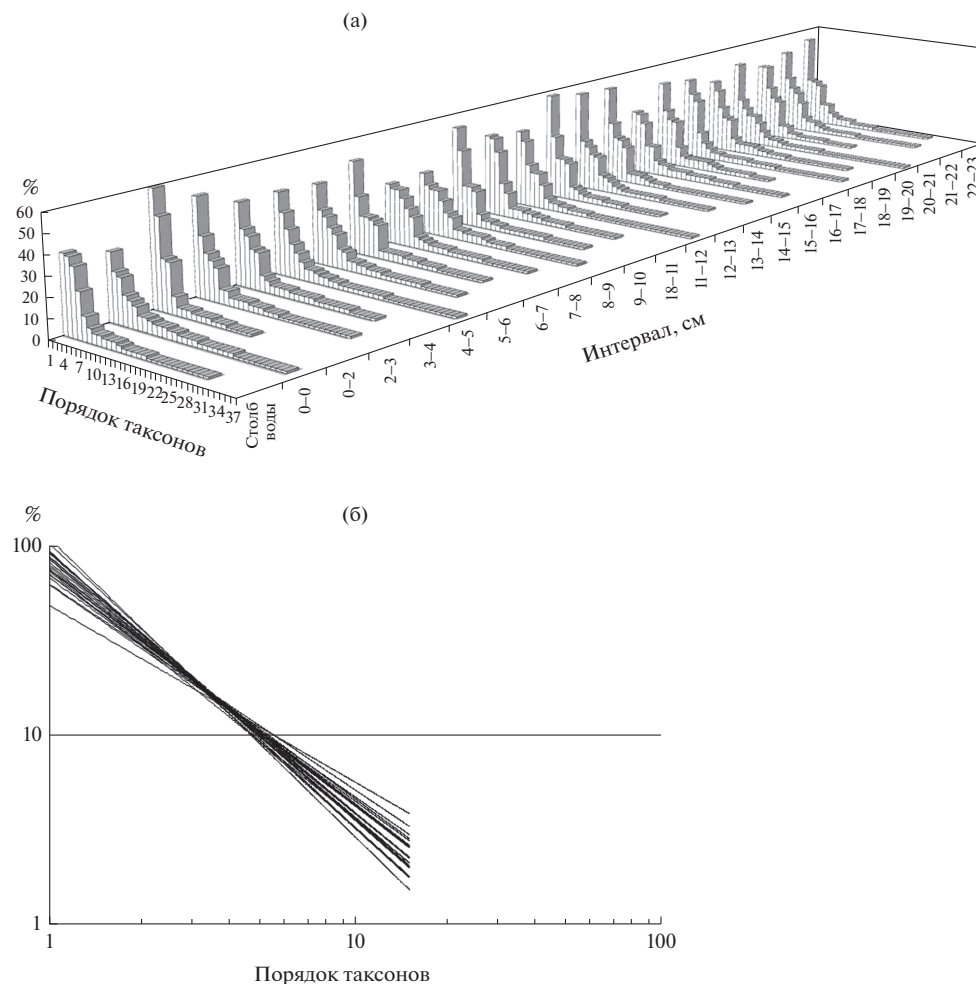


Рис. 3. Таксономическая структура диатомовых комплексов из донных отложений оз. Большое Дзитаку в линейной (а) и логарифмической (б) системе координат.

Fig. 3. Taxonomic structure of diatom complexes from the lake Bolshoe Dzitaku bottom sediments in linear (a) and logarithmic (b) coordinate systems.

ния гистограмм характерны для более крупных, средних озер (площадь 1–4 км²), а оз. Большое Дзитаку относится к категории малых (<1 км²).

Данное несоответствие размеров озера и очертаний гистограмм объясняется совмещением двух ассоциаций диатомовых комплексов в зоне интегральной седиментации. Озеро является проточным и поступающие из впадающего ручья створки диатомовых водорослей видоизменяют исходные очертания таксономических пропорций в диатомовых комплексах. Если озеро было бы непроточным, то экспоненциальные очертания полученных гистограмм преобладали.

То, что в первую очередь, рассматривалось внешнее воздействие лавинного генезиса, определялось его выраженностью в виде вала, расположенного на юго-восточном берегу озера (см. рис. 1).

Анализ в логарифмической системе координат подтвердил отсутствие внешнего негативного воздействия. Полученные результирующие линии образуют генерацию с выраженным центром локализации, вокруг которого и происходит модуляция результирующих линий во времени (рис. 36). Такой тип генерации результирующих линий характерен для малых озер. Это, косвенным образом, подтверждает отсутствие сильного внешнего воздействия проточного генезиса, даже с учетом весеннего паводка.

Остается открытым вопрос, каким образом происходит воздействие лавинного генезиса на акваторию озера и формирование донных отложений. На сегодняшний день отсутствуют опубликованные наблюдения за сезонностью сходов лавин. Сходят ли лавины в сезоны открытой воды или в сезоны ледяного покрова на акватории озера? Какова мощность и динамика этого воздействия на водные толщи озера?

Косвенным признаком отсутствия выраженного воздействия на глубинные водные толщи озера служит выявленное послойное формирование осадков в зоне интегральной седиментации на максимальных глубинах, где были отобраны колонки ДО. Это было достоверно подтверждено при помощи МГА, как в линейной, так и в логарифмической системе координат (рис. 3а, 3б). В то же время, присутствие в осадке из колонки ДО грубообломочных включений косвенным образом свидетельствует о воздействии лавинных масс на поверхностные слои водной толщи на значительной площади акватории озера.

Окончательные ответы и заключения будут получены при проведении комплексного анализа (геохимического, гранулометрического, изотопного, диатомового и др.) более длинных колонок ДО, отобранных в ходе экспедиционных исследований сотрудниками Института географии РАН.

ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования диатомовых комплексов позволяют сделать вывод о значимой информативности МГА.
2. Анализ таксономической структуры диатомовых комплексов не выявил процессов переотложения в зоне интегральной седиментации ДО.
3. Верхний, исследованный слой ДО указывает на перспективность использования оз. Большое Дзитаку в качестве модельного водоема для палеоэкологических и палеоклиматических реконструкций.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИВП РАН, тема № 0147-2019-0004, п. 4.2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Давыдова Н.Н. Диатомовые водоросли — индикаторы природных условий водоемов в голоцене. Л.: Наука, 1985. 243 с.
2. Джонсман Р.Г.Г., Тер Браак С.Дж.Ф., Ван Тонгерен О.Ф.Р. Анализ данных в экологии сообществ и ландшафтов. М.: РАСХН, 1999. 306 с.
3. Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении: Учебник. М.: Изд-во МГУ, 1995. 320 с.
4. Кордэ Н.В. Биостратиграфия и типология русских сапропелей. М.: Изд-во АН СССР, 1969. 219 с.
5. Моисеенко Т.И., Разумовский Л.В., Гашкина Н.А., Шевченко А.В., Разумовский В.Л., Машуков А.С., Хорошавин В.Ю. Палеоэкологические исследования горных озер // Водные ресурсы. 2012. Т. 39. № 5. С. 543–557.
6. Полякова Е.И. Диатомовый анализ // Методы палеогеографических реконструкций. М.: Изд-во МГУ, 2010. С. 126–160.
7. Разумовский В.Л. Оценка экологического состояния высокогорных озер Приэльбрусья по результатам диатомового анализа // Водные ресурсы. Т. 41. 2014. № 2. С. 200–205.
8. Разумовский В.Л. Формирование экосистемы карстового озера в степном поясе гор Кавказа (диатомовый анализ) // Аридные экосистемы. 2014. № 2 (59). С. 69–73.
9. Разумовский Л.В. Оценка трансформации озерных экосистем методом диатомового анализа. М.: ГЕОС, 2012. 199 с.

10. Разумовский Л.В., Моисеенко Т.И. Оценка пространственно-временных трансформаций озерных экосистем методом диатомового анализа // Докл. 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. № 12. Экология. 2013. С. 121–127.
12. Разумовский Л.В., Шелехова Т.С., Разумовский В.Л. Новейшая история озер Большое и Зеркальное по результатам диатомового анализа // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 2. С. 222–227.
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. Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы, критерии, решения. Кн. 1. М.: Наука, 2005. 281 с.
15. <http://mountaindreams.ru/lake/catalog/ozera-massiva-pseashxo/ozera-dzitaku/>
16. Nesje A. A piston corer for lacustrine and marine sediments // Arctic and Alpine Research. 1992. V. 24. № 3. P. 257–259.
17. Renberg I. A procedure for preparing large sets of diatom slides from sediment cores // J. Paleolimnology. 1990. V. 4. P. 87–90.

Evaluation of the Graphical Analysis Method Informative Value on the Example of the Lake Bolshoe Dzitaku (Western Caucasus)

V. L. Razumovsky*

Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: nethaon@mail.ru*

The work is devoted to the Caucasus lakes study which is the most promising for the application of the taxonomic proportions graphical analysis method in diatom complexes. Previously, seven lakes were studied, in which this method was confirmed as informative. Studies of the bottom sediments of the lake Bolshoe Dzitaku were carried out using a similar algorithm. A layer-by-layer analysis of the diatom complexes taxonomic structure is carried out. A brief description of the method and the results of its application are given. It was found that the diatom complexes formed in the central part of the lake were not subjected to significant processes of redeposition. The obtained results allow us to include the lake Bolshoe Dzitaku in the list of lakes of the Caucasus that are promising for further ecological and paleoclimatic reconstructions of the Late Holocene. Further studies on the lake's water area involving a wide range of biological and physico-chemical methods, including age dating of lake sediments by isotopic methods, are recommended.

Keywords: diatom complexes, mountain lakes, taxonomic proportions, graphical analysis

REFERENCES

1. Davydova N.N. Diatomovye vodorosli – indikatory prirodnih uslovij vodoemov v golocene. L.: Nauka, 1985. 243 s.
2. Dzhongman R.G.G., Ter Braak S.Dzh.F., Van Tongeren O.F.R. Analiz dannyh v ekologii soobshchestv i landshaftov. M.: RASXN, 1999. 306 s.
3. Dmitriev E.A. Matematicheskaya statistika v pochvovedenii: Uchebnik. M.: Izd-vo MGU, 1995. 320 s.
4. Korde N.V. Biostratigrafiya i tipologiya russkih sapropelej. M.: Izd-vo AN SSSR, 1969. 219 s.
5. Moiseenko T.I., Razumovskij L.V., Gashkina N.A., Shevchenko A.V., Razumovskij V.L., Mashukov A.S., Horoshavin V.Yu. Paleoeologicheskie issledovaniya gornyh ozer // Vodnye resursy. 2012. V. 39. No. 5. S. 543–557.
6. Polyakova E.I. Diatomovyy analiz // Metody paleogeograficheskikh rekonstrukcij. M.: Izd-vo MGU, 2010. S. 126–160.
7. Razumovskij V.L. Ocenka ekologicheskogo sostoyaniya vysokogornyh ozer Priel'brus'ya po rezul'tatam diatomovogo analiza // Vodnye resursy. V. 41. 2014. No. 2. C. 200–205.

8. Razumovskij V.L. Formirovanie ekosistemy karstovogo ozera v stepnom poyase gor Kavkaza (diatomovyy analiz) // *Aridnye ekosistemy*. 2014. No. 2(59). S. 69–73.
9. Razumovskij L.V. Ocenka transformacii ozernyh ekosistem metodom diatomovogo analiza. M.: GEOS, 2012. 199 s.
10. Razumovskij L.V., Moiseenko T.I. Ocenka prostranstvenno-vremennyh transformacij ozernyh ekosistem metodom diatomovogo analiza // *Doklady akademii nauk. Obshhaya biologiya*. 2009. V. 429. No. 3. S. 274–277.
11. Razumovskij L.V., Razumovskij V.L. Registraciya novejsih ekosistemnyh sobytij v ozere Karakel' po pereotlozhennym diatomovym kompleksam // *Vestnik Tyumenskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. No. 12. *Ekologiya*. 2013. S. 121–127.
12. Razumovskij L.V., Shelehova T.S., Razumovskij V.L. Novejshaya istoriya ozer Bol'shoe i Zerkal'noe po rezul'tatam diatomovogo analiza // *Vodnye resursy*. 2015. V. 42. No. 2. S. 222–227.
13. Solomina O.N., Kalugin I.A., Aleksandrin M.Yu., Bushueva I.S., Darin A.V., Dolgova E.A., Zhomelli V., Ivanov M.N., Maczkovskij V.V., Ovchinnikov D.V., Pavlova I.O., Razumovskij L.V., Chepurayeva A.A. Burenie osadkov oz. Karakel' (dolina r. Teberda) i perspektivy rekonstrukcii istorii oledeneniya i klimata golocena na Kavkaze // *Lyod i Sneg*. 2013. No. 2(122). S. 102–111.
14. Shitikov V.K., Rozenberg G.S., Zinchenko T.D. *Kolichestvennaya gidroekologiya: metody, kriterii, resheniya*. Kn. 1. M.: Nauka, 2005. 281 s.
15. <http://mountaindreams.ru/lake/catalog/ozera-massiva-pseashxo/ozera-dzitaku/>
16. Nesje A. A piston corer for lacustrine and marine sediments // *Arctic and Alpine Research*. 1992. V. 24. No. 3. P. 257–259.
17. Renberg I. A procedure for preparing large sets of diatom slides from sediment cores // *J. Paleolimnology*. 1990. V. 4. P. 87–90.