

К 90-летию Н.Н. Давыдовой

НОВАЯ ФОРМА АНАЛИЗА ДИАТОМОВЫХ КОМПЛЕКСОВ ОЗЕРА ИМАНДРА

© 2021 г. Л. В. Разумовский*

Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

**E-mail: l.razumovskiy1960@mail.ru*

Поступила в редакцию 14.05.2021 г.

После доработки 18.06.2021 г.

Принята к публикации 30.06.2021 г.

В работе предложена новая форма анализа диатомовых комплексов оз. Имандра. Построены гистограммы таксономических пропорций в диатомовых комплексах. Выделены два типа гистограмм естественной, ненарушенной структуры диатомовых комплексов. Первый из них по своим очертаниям близок к экспоненциальной зависимости, а второй — имеет определенное подобие с логистической зависимостью. При проявлении негативного внешнего воздействия оба типа гистограмм изменяют свою форму. Степень их искажения отражает общий уровень антропогенной нагрузки на конкретный участок акватории. Для перемещенных и переотложенных комплексов выделен третий тип графиков — линейный. Проведенные исследования позволили выявить участки акватории озера, где палеорекострукции наиболее перспективны. Установлены участки акватории, в которых интерпретация полученных результатов затруднена, а палеорекострукции не рекомендованы.

Ключевые слова: диатомовые комплексы, озеро Имандра, графический анализ, таксономические пропорции, антропогенная нагрузка

DOI: 10.31857/S0869607121060045

ВВЕДЕНИЕ

Озеро Имандра относится к природным объектам, расположенным в районе длительного техногенного воздействия. Это приводит к значимым негативным трансформациям, что выражается в многофакторном нарушении гидрохимического и теплового режима и интегральном загрязнении пресных вод.

На сегодняшний день необходимо найти научно-обоснованное компромиссное решение, которое позволит осуществить водопользование, не приводящее к необратимой деградации природных комплексов. Поэтому любые исследования, предлагающие новые или дополнительные критерии оценки состояния природных сообществ будут всегда актуальны.

Современные комплексные экологические исследования больших озер без привлечения диатомового анализа проводятся достаточно редко. Вместе с тем, диатомовый анализ имеет значительный неиспользованный информационный потенциал.

Основная цель данной работы — установление перспективности изучения таксономической структуры диатомовых комплексов при палеорекострукциях и оценке новейших антропогенных изменений на акватории оз. Имандра.

Для осуществления этой цели было необходимо: выявить участки акватории, где процессы природной био- и гидротурбации наиболее интенсивны; определить зоны седиментационного транзита и переотложения озерных осадков; установить признаки негативного антропогенного воздействия на структуру диатомовых комплексов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Структуру и объем первичного материала составили пробы из 5 колонок донных отложений (ДО) длиной до 25 см, которые были разрезаны на отдельные образцы с интервалом в 1 см (61 образец). Колонки ДО были отобраны стратометром ударно-замыкающего типа.

Отбор и обработка проб для проведения диатомового анализа, изготовление и просмотр постоянных препаратов осуществлялись по стандартным методикам [3, 17]. Пробы из колонок ДО были изучены Л.Я. Каган, а результаты этой работы опубликованы в коллективной монографии [6]. Следует упомянуть, что в этой работе относительная численность в диатомовых комплексах приводится только для видов, содержание которых составляло более 1%. В процессе дальнейших исследований был применен авторский метод графического анализа таксономических пропорций (МГА) [13].

МГА состоит из нескольких этапов. На первом этапе в пробах на диатомовый анализ определяется относительная (процентная) численность всех идентифицированных таксонов видового и более низкого рангов (далее в тексте — таксонов). Далее строится гистограмма, где по оси абсцисс откладывается число идентифицированных таксонов, а по оси ординат — их относительная численность. Таксоны ранжируются по показателю относительной численности в сторону его уменьшения. В этой статье приводится первый этап МГА, признанный наиболее наглядным.

Было выделено три типа распределения таксономических пропорций, которые формируются под воздействием природных абиотических факторов: экспоненциальный, логистический и линейный [13].

Два первых типа соответствуют прижизненным таксономическим пропорциям, которые объективно отражают естественную экологическую обстановку в пресноводных водоемах. Третий тип (линейный) соответствует комплексам, которые подверглись процессам переноса и переотложения [14].

Нелинейный характер распределения — признак многофакторного прижизненного воздействия. Линейный характер распределения — признак селективного воздействия одного фактора, после отмирания клеток диатомовых и их оседания на дно водоема.

Распознавание переотложенных комплексов позволило получить новую информацию о гидрологических изменениях в прошлом.

При изменении абиотических параметров среды оба типа нелинейных графиков трансформируются, и один из них может преобразовываться в другой. Резкая смена абиотических параметров водной среды приводит к искажению исходных очертаний графиков.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Озеро Имандра — самый крупный водоем на Кольском п-ове [1, 11]. Его длина составляет 103 км, площадь с островами — 880.4 км², объем воды — 10.86 км³. Наибольшая глубина 67 м, средняя глубина 13.3 м. Озеро фактически состоит из трех отдельных озер, объединенных в единую макроструктуру каскадного типа: Большая Имандра, Йокостровская Имандра и Бабинская Имандра [15] (рис. 1).

Оз. Имандра — одно из наиболее изученных озер в России. Здесь были проведены подробные многолетние исследования по гидрологии, гидрохимии, составу грунтов,

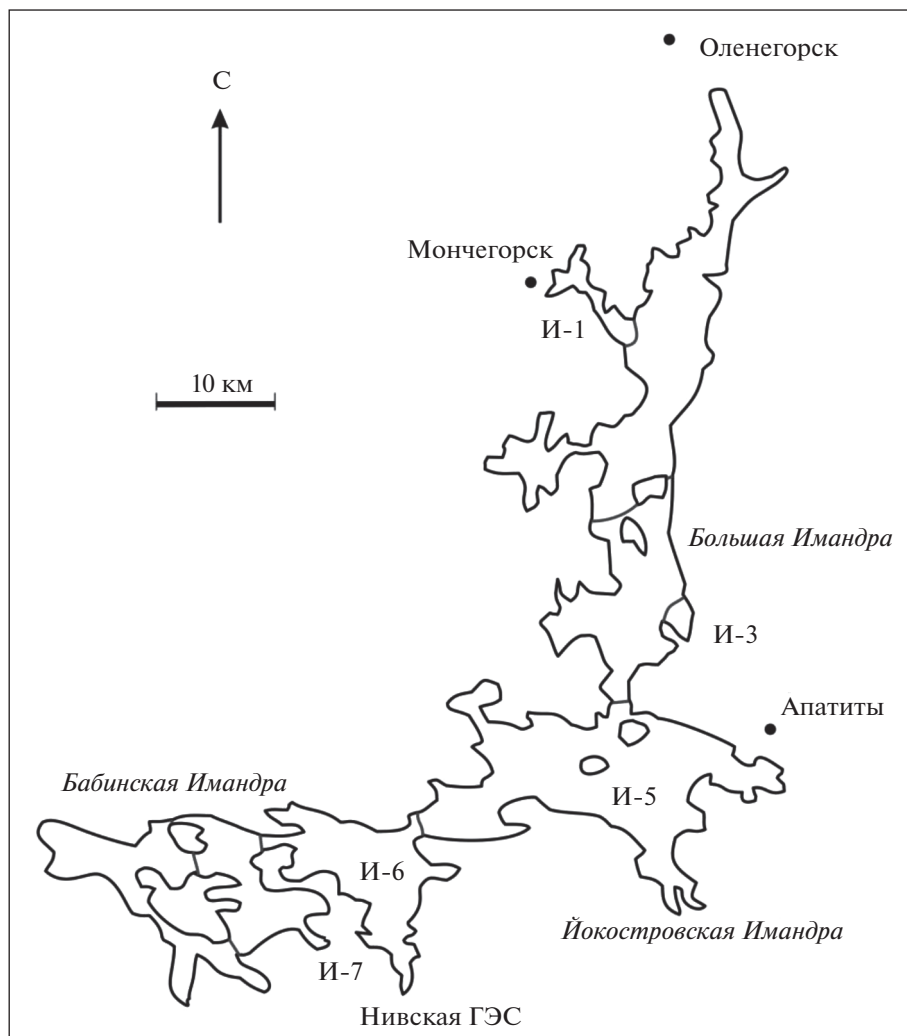


Рис. 1. Карта-схема районирования оз. Имандра [12]. Пояснения в тексте.

Fig. 1. Map-scheme of the lake Imandra zones [12]. Explanations are in the text.

микробиологии, биоценологии, биопродуктивности и др. [8, 7, 9, 11]. В частности, составлен систематический список современных диатомовых водорослей [4–6].

Месторасположение колонок ДО приведено по выделенным на акватории озера зонам [12], с сокращениями. Поэтому при анализе первичного материала была использована исходная система обозначений зон (рис. 1).

И-1 — губа Монче (Мончегуба), зона влияния сточных вод медно-никелевого производства (комбинат “Североникель”). Длина колонки 25 см. В верхней части колонки (интервал 1–5 см) гистограммы имеют однотипную, экспоненциальную форму. Во всех остальных интервалах преобладает второй тип распределения таксономических пропорций (логистический). Очертания полученных гистограмм достаточно инвариантны. В интервалах 7–8, 13–14, 21–22 см пропорции в очертаниях гистограмм

заметно нарушены (искажены) (рис. 2а). Наиболее вероятным объяснением многократного нарушения таксономических пропорций, является антропогенное воздействие, накладывающееся на природные процессы формирования химического состава вод в этом районе озера [10].

И-3 — губа Белая, зона влияния сточных вод апатит-нефелинового производства (ОАО «Апатит»). Длина колонки 20 см. По всей глубине апробации отмечено выраженное доминирование первого по относительной численности таксона. Гистограммы имеют экспоненциальную форму (рис. 2б). С точки зрения биоиндикации, данный процесс можно охарактеризовать как начальную стадию экологического регресса: хроническую, негативную перестройку таксономической структуры диатомовых комплексов, обусловленную регулярным и длительным поступлением загрязняющих веществ.

И-5 — Йокостровский пролив, зона транзитного потока (рис. 1). Длина колонки 16 см. В интервале 1–7 см гистограммы имеют экспоненциальные очертания. В интервале 7–16 см гистограммы приобретают линейные, однотипные очертания. В донных отложениях оз. Имандра такой тип распределения таксономических пропорций отмечен впервые (рис. 2в).

И-6 — губа Зашейковская, зона формирования стока оз. Имандра (смещение стоков из Большой, Йокостровской и Бабинской Имандры). Длина колонки 22 см. В интервале 1–4 см гистограммы имеют пологие, пропорциональные очертания логистического типа. С глубины 4 см их очертания заметно меняются. Они приобретают различные формы и соответствуют сочетанию двух основных типов распределения: (экспоненциальному и логистическому). Значительных искажений в таксономических пропорциях не отмечено (рис. 2г).

И-7 — губа Молочная, зона влияния подогретых вод Кольской АЭС (рис. 1). Длина колонки 17 см. Форма и очертания гистограмм заметно варьирует. Смена одного типа распределения (экспоненциального) на другой (логистический) не имеет выраженных закономерностей по разрезу колонки. В интервалах 4–5 и 7–8 см таксономические пропорции заметно искажены (рис. 2д).

Трехмерная модель распространения подогретых вод позволяет достоверно объяснить причинно-следственные связи трансформации и искажения таксономической структуры в диатомовых комплексах на акватории Бабинской Имандры в губе Молочная [2, 7].

Аномальные явления, приводящие к изменению естественных циклов вегетационной активности диатомовых водорослей, являются следствием температурной стратификации. В результате к верхней части водного столба приурочены подогретые воды, а в нижней части находятся глубинные водные массы с более низкими придонными температурами. Следствием процесса горизонтальной стратификации выступает замедление (вплоть до полного прекращения) водообмена между поверхностными и глубинными водными массами. В свою очередь, ухудшение конвекции приводит к истощению запасов O_2 на придонных горизонтах, ухудшению аэрации и, в конечном итоге, к эвтрофикации [2].

В результате анализа диатомовых комплексов из колонок ДО было установлено, что отдельные участки акватории оз. Имандра являются зонами локальной, первичной седиментации и скопления створок диатомовых водорослей. Очертания гистограмм на этих участках акватории имеют экспоненциальный характер распределения таксономических пропорций в диатомовом комплексе.

Соответственно, имеются участки интегральной седиментации, где смешиваются створки, поступающие из нескольких зон локальной седиментации. В зонах интегральной седиментации озера очертания полученных гистограмм наиболее разнообразны (инвариантны). Формирование пропорций происходит, как следствие совме-

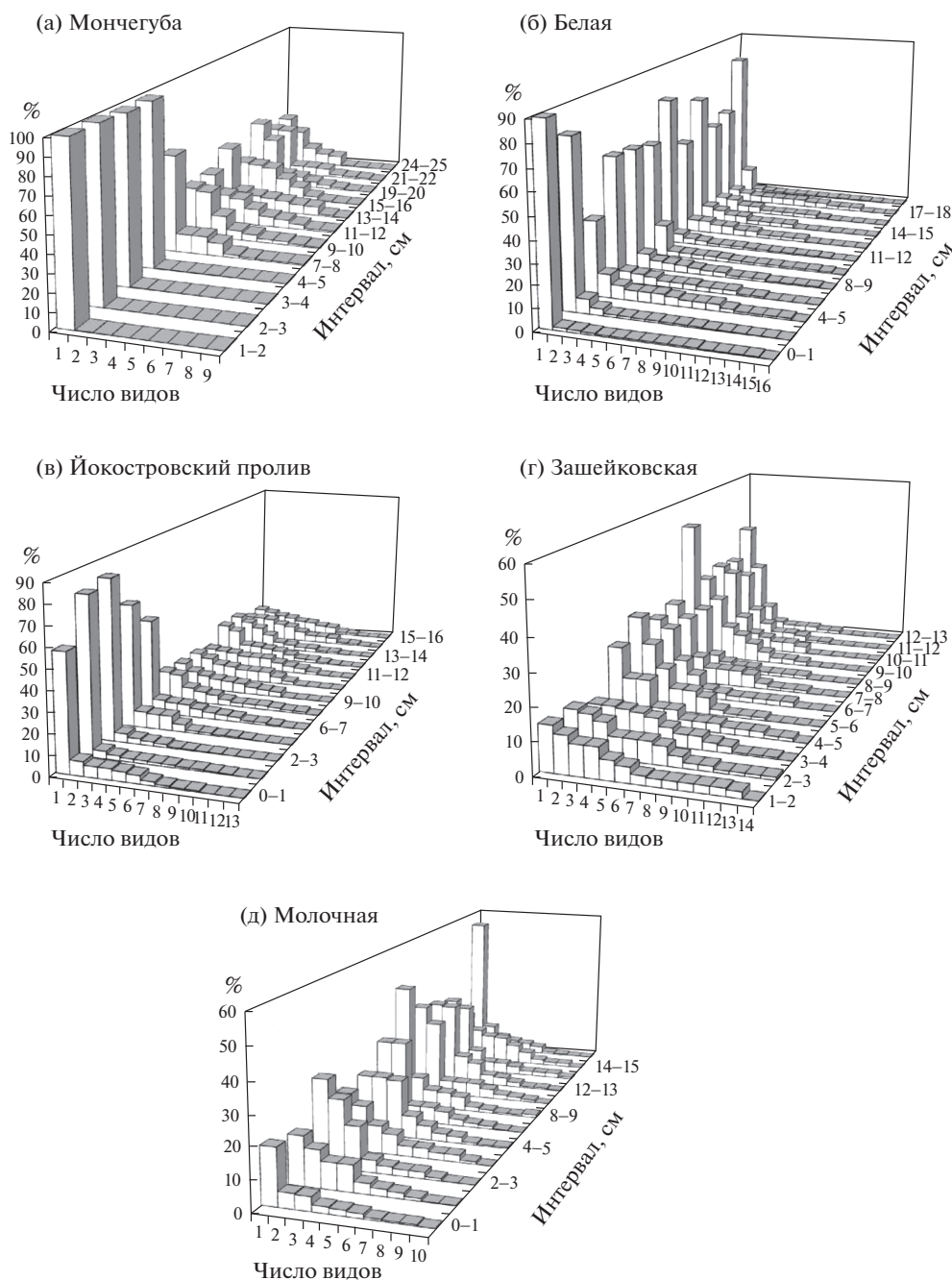


Рис. 2. Гистограммы таксономических пропорций в диатомовых комплексах из колонок донных отложений оз. Имандра.

Fig. 2. Histograms of diatom complexes taxonomic proportions in the bottom sediments columns of the lake Imandra.

щения в очертаниях гистограмм двух исходных типов распределения: экспоненциального и логистического.

Исследования, связанные с достоверными палеореконструкциями, возможны только в трех зонах из пяти: в губах Белая, Зашейковская и Молочная.

В губе Монче, в верхней части колонки, построенные гистограммы имеют абсолютно идентичные очертания (рис 2а). Сходные явления отмечены в Йокостровском проливе. Очевидно, что это связано с процессами гидро- и биотурбации на этих участках акватории. Формирующиеся осадки, в том числе и створки диатомовых водорослей, прежде чем перейти в следующую стадию литогенеза, перемешиваются в верхних слоях ДО. В результате происходит нивелирование (выравнивание) таксономических пропорций.

Для зоны Йокостровского пролива во всех интервалах, за исключением верхней части колонки ДО, гистограммы имеют линейные очертания. В Йокостровском проливе преобладают процессы переотложения и переноса. Этот участок акватории приурочен к зоне седиментационного транзита. Таксономические пропорции в диатомовых комплексах трансформируются и приобретают линейный характер распределения на построенных гистограммах (рис. 2в).

Любые выводы об антропогенной нагрузке, сделанные по диатомовым комплексам из двух вышеупомянутых зон, могут только ввести в заблуждение. Именно эти два участка акватории не рекомендованы для оценки негативных трансформаций природных сообществ в новейшее время и для палеореонокструкций.

Помимо естественных природных типов таксономических пропорций, установлены два варианта изменения таксономических пропорций при искажении природных биогеохимических процессов под воздействием антропогенной нагрузки [10].

В первом случае антропогенная нагрузка имеет длительную и непрерывную направленность. Происходит адаптационное искажение естественных биогеохимических циклов экосистемы, и очертания гистограмм приобретают выраженную экспоненциальную форму, определяемую доминированием только одного таксона. Подобные негативные трансформации в очертаниях построенных гистограмм характерны для губы Белая (И-3), в зоне влияния сточных вод апатит-нефелинового производства.

Во втором случае происходит выраженное искажение таксономических пропорций: в интервалах колонки ДО из губы Монче, в зоне влияния сточных вод медно-никелевого производства, в колонке ДО из губы Молочная, зоне влияния подогретых вод Кольской АЭС. Данная форма воздействия приводит к релаксационно-колебательной зависимости биогеохимических циклов в природных экосистемах [16]. Соответственно, в различных интервалах колонки гистограммы с искаженными таксономическими пропорциями чередуются с гистограммами, где таксономические пропорции не подверглись изменению.

ВЫВОДЫ

На примере таксономического состава диатомовых комплексов из колонок донных отложений оз. Имандра была продемонстрирована высокая информативность МГА при определении участков акватории озера, пригодных для палеореонокструкций и оценки тенденций изменения естественных биогеохимических процессов.

При помощи МГА была установлена возможность достоверного распознавания изменения таксономических пропорций, которые определяются естественными природными явлениями (переносом и биотурбацией), и процессами негативных изменений в структуре диатомовых комплексов под воздействием антропогенной нагрузки.

Пространственно-временной анализ таксономического состава диатомовых комплексов из колонок ДО позволяет сформировать наиболее обоснованную стратегию палеореонокструкции природной обстановки для акватории оз. Имандра.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИВП РАН, тема № 0147-2019-0004, п. 4.2 и гранта РФФИ № 18-05-60012 Арктика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас Мурманской области. М.: ГУГК при Совете Министров СССР, 1971. 33 с.
2. Бардан С.И. Динамика обменных процессов в планктонном сообществе в свете теории экологических модификаций // Экологические модификации и критерии экологического нормирования: Труды совещания (СССР, Нальчик, 1–12 июня 1991 г.). Л.: Гидрометеозидат, 1991. С. 221–247.
3. Давыдова Н.Н. Диатомовые водоросли – индикаторы природных условий водоемов в голоцене. Л.: Наука, 1985. 243 с.
4. Денисов Д.Б. Изменение гидрохимического состава и диатомовой флоры донных отложений в зоне воздействия горнорудного производства // Водные ресурсы. 2007. Т. 34. № 6. С. 719–730.
5. Каган Л.Я. Изменение сообществ диатомовых водорослей при антропогенном преобразовании экосистемы оз. Имандра // Водные ресурсы. 2001. Т. 28. № 3. С. 329–338.
6. Каган Л.Я. Реконструкция исторического прошлого по диатомовым комплексам из донных отложений // Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра. М.: Наука, 2002. С. 227–256.
7. Крючков В.В., Моисеенко Т.И., Яковлев В.А. Экология водоемов-охладителей в условиях Заполярья. Апатиты: Кол. фил. АН СССР, 1985. 131 с.
8. Купецкая К.Н., Великорецкая И.И., Венус Б.Г. и др. Большие озера Кольского полуострова. Л.: Наука, 1976. 364 с.
9. Моисеенко Т.И. Теоретические основы нормирования антропогенных нагрузок на водоемы Субарктики. Апатиты: КНЦ РАН, 1997. 261 с.
10. Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А. Формирование химического состава вод озер в условиях изменения окружающей среды. М.: Наука, 2010. 276 с.
11. Моисеенко Т.И., Дауэвальтер В.А., Лукин А.А., Кудрявцева Л.П. и др. Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра. М.: Наука, 2002. 403 с.
12. Моисеенко Т.И., Сандимиров С.С. Антропогенная нагрузка // Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра. М.: Наука, 2002. С. 24–31.
13. Разумовский Л.В., Моисеенко Т.И. Оценка пространственно-временных трансформаций озерных экосистем методом диатомового анализа // Доклады Академии наук. 2009. Т. 429. № 3. С. 274–277.
14. Разумовский Л.В., Разумовский В.Л., Чудаев Д.А., Гололобова М.А. Диатомовые водоросли из донных отложений озера Каракель (Центральный Кавказ) и реконструкция региональных климатических событий в позднем голоцене // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. № 4. С. 443–447.
15. Рихтер Г.Д. Физико-географический очерк озера Имандра и его бассейна. Л.: Гостехтеоретиздат, 1934. 144 с.
16. Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы, критерии, решения. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. С. 59–61.
17. Renberg I. A procedure for preparing large sets of diatom slides from sediment cores // J. Paleolimnology. 1990. V. 4. P. 87–90.

The New form of Diatom Assemblages Analysis of the Lake Imandra

L. V. Razumovsky*

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

*E-mail: l.razumovskiy1960@mail.ru

Samples of surface sediments and sediment columns from various sections of the Lake Imandra were collected for diatom analysis. Histograms of diatom complexes species proportions were constructed. Two types of graphs of the natural (undisturbed) diatom complexes structure were distinguished. The first one, in its outlines, is close to an exponential dependence, and the second one has a certain similarity with the logistic dependence. Both types of histograms change their shape when a negative external influence takes place. The degree of their distortion reflects the overall level of anthropogenic load on a particular section of the water area. The third type of graphs — linear graphs was distinguished for the dis-

placed and redeposited diatom complexes. The research allowed to identify the lake's water areas where paleoreconstructions are the most efficient. Water areas where the interpretation of the obtained results is difficult, and paleoreconstructions are not recommended, have been identified as well.

Keywords: diatom complexes, lake Imandra, graphical analysis, taxonomic proportions, anthropogenic load

REFERENCES

1. Atlas Murmanskoy oblasti. M.: GUGK pri Sovete Ministrov SSSR, 1971. 33 s.
2. Bardan S.I. Dinamika obmennykh processov v planktonnom soobshchestve v svete teorii ekologicheskikh modifikatsiy // *Ekologicheskie modifikatsii i kriterii ekologicheskogo normirovaniya: Trudy soveshchaniya (SSSR, Nal'chik, 1–12 iyunya 1991 g.)*. L.: Gidrometeoizdat, 1991. S. 221–247.
3. Davydova N.N. Diatomovye vodorosli – indikatory prirodnkh usloviy vodoemov v golocene. L.: Nauka, 1985. 243 s.
4. Denisov D.B. Izmenenie gidrokhimicheskogo sostava i diatomovoy flory donnykh otlozheniy v zone vozdeystviya gornorudnogo proizvodstva // *Vodnye resursy*. 2007. V. 34. No. 6. S. 719–730.
5. Kagan L.Ya. Izmenenie soobshchestv diatomovykh vodorosley pri antropogennom preobrazovanii ekosistemy oz. Imandra // *Vodnye resursy*. 2001. T. 28. № 3. S. 329–338.
6. Kagan L.Ya. Rekonstruktsiya istoricheskogo proshlogo po diatomovym kompleksam iz donnykh otlozheniy // *Antropogennye modifikatsii ekosistemy ozera Imandra*. M.: Nauka, 2002. S. 227–256.
7. Kryuchkov V.V., Moiseenko T.I., Yakovlev V.A. Ekologiya vodoemov-ohladiateley v usloviyakh Zapolyar'ya. Apatity: Kol. fil. AN SSSR, 1985. 131 s.
8. Kupeczkaya K.N., Velikoreczkaya I.I., Venus B.G. i dr. Bol'shie ozera Kol'skogo poluostrova. L.: Nauka, 1976. 364 s.
9. Moiseenko T.I. Teoreticheskie osnovy normirovaniya antropogennykh nagruzok na vodoemy Subarktiki. Apatity: KNCz RAN, 1997. 261 s.
10. Moiseenko T.I., Gashkina N.A. Formirovanie khimicheskogo sostava vod ozer v usloviyakh izmeneniya okruzhayushhej sredy. M.: Nauka, 2010. 276 s.
11. Moiseenko T.I., Dauval'ter V.A., Lukin A.A., Kudryavtseva L.P. i dr. Antropogennye modifikatsii ekosistemy ozera Imandra. M.: Nauka, 2002. 403 s.
12. Moiseenko T.I., Sandimirov S.S. Antropogennaya nagruzka // *Antropogennye modifikatsii ekosistemy ozera Imandra*. M.: Nauka, 2002. S. 24–31.
13. Razumovskiy L.V., Moiseenko T.I. Ocenka prostranstvenno-vremennykh transformatsiy ozernykh ekosistem metodom diatomovogo analiza // *Doklady Akademii nauk*. 2009. V. 429. No. 3. S. 274–277.
14. Razumovskiy L.V., Razumovskiy V.L., Chudaev D.A., Gololobova M.A. Diatomovye vodorosli iz donnykh otlozheniy ozera Karakel' (Central'nyy Kavkaz) i rekonstruktsiya regional'nykh klimaticheskikh sobytij v pozdnem golocene // *Vodnye resursy*. 2018. V. 45. No. 4. S. 443–447.
15. Rihter G.D. Fiziko-geograficheskij ocherk ozera Imandra i ego bassejna. L.: Gostehteorizdat, 1934. 144 s.
16. Shitikov V.K., Rozenberg G.S., Zinchenko T.D. Kolichestvennaya gidroekologiya: metody, kriterii, resheniya. Tol'yatti: IEVB RAN, 2003. S. 59–61.
17. Renberg I. A procedure for preparing large sets of diatom slides from sediment cores // *J. Paleolimnology*. 1990. V. 4. P. 87–90.