

СОДЕРЖАНИЕ

Том 153, номер 6, 2021

Декарбонизация как средство борьбы с потеплением климата и проблемы “зеленой” энергетики <i>В. И. Берёзкин</i>	3
Оценка научно-прикладной значимости карстовых пещер Южного Урала и Предуралья <i>Ю. В. Соколов, А. И. Смирнов</i>	21
Наталья Наумовна Давыдова (к 90-летию со дня рождения) <i>Т. В. Сапелко, А. В. Лудикова, Д. А. Субетто</i>	32
Кремнистые микроводоросли в донных отложениях Ладожского озера и их роль в палеолимнологических реконструкциях <i>А. В. Лудикова, Д. Д. Кузнецов</i>	46
Новая форма анализа диатомовых комплексов озера Имандра <i>Л. В. Разумовский</i>	65
Реконструкция палеогеографических условий позднеледниковья-голоцена в Центральной Карелии (на основе комплексного анализа озерных отложений озера Южное Хаугилампи) <i>Т. С. Шелехова, Н. Б. Лаврова, Д. А. Субетто</i>	73
Оценка информативности метода графического анализа на примере озера Большое Дзитаку (Западный Кавказ) <i>В. Л. Разумовский</i>	90

ДЕКАРБОНИЗАЦИЯ КАК СРЕДСТВО БОРЬБЫ С ПОТЕПЛЕНИЕМ КЛИМАТА И ПРОБЛЕМЫ “ЗЕЛЕННОЙ” ЭНЕРГЕТИКИ

© 2021 г. В. И. Берёзкин*

*Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН –
Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН,
Санкт-Петербург, Россия*

**E-mail: v.berezkin@inbox.ru*

Поступила в редакцию 01.07.2021 г.

После доработки 03.10.2021 г.

Принята к публикации 14.10.2021 г.

Анализируются современные усилия по борьбе с потеплением климата путем продвижения к конечной цели, объявленной многими странами как полная декарбонизация их экономик к 2050 г. Рассмотрены основные тенденции в минимизации вредных воздействий на природную среду посредством замены ископаемого топлива на возобновляемые и экологически чистые (“зеленые”) источники – водород, энергию ветра, Солнца, воды. Описаны также перспективные в данном контексте разработки атомной энергетики. Рассмотрены проблемы создания термоядерных электростанций. Показано, что “зеленых” источников энергии, в строгом смысле, сегодня не существует, а обозначенные пути достижения нулевого выброса вредных веществ довольно противоречивы и поэтому выглядят пока трудно реализуемыми. Вместе с этим отмечено, что развивать “зеленую” энергетику жизненно необходимо не только с точки зрения охраны природы, но и в связи с тем, что традиционные ископаемые источники энергии рано или поздно будут исчерпаны. Обозначено, какие проблемы необходимо будет решить. Показано, что их очень много и они очень сложные. Сделан вывод, что уровень современных технологий и существующие здесь идеи позволяют предположить, что углеродное топливо как первичный источник энергии к 2050 г. останется востребованным. И поскольку достижение декарбонизации сопряжено также с проблемами, решения которых пока не найдены или не проверены практикой, постольку путь в данном направлении будет, скорее всего, более длительным.

Ключевые слова: потепление климата, декарбонизация мировой экономики, “зеленые” источники энергии

DOI: 10.31857/S0869607121060021

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдающееся потепление климата обычно связывают с усилением антропогенной нагрузки на окружающую среду в виде увеличения выбросов парниковых газов: H_2O , CO_2 , CH_4 и др. Данный тезис не считается однозначным, однако то, что в настоящее время деятельность человека характеризуется постоянным ростом вредных выбросов – бесспорный факт. Эти выбросы в основном обусловлены использованием невозобновляемых источников энергии на основе углерода. Поэтому сегодня во всех развитых странах прилагаются усилия по разработке эффективных природоохранных мер. Особенно заметная деятельность наблюдается в энергетике. Здесь

главной целью объявлено постепенное замещение угля, нефти, природного газа “зелеными” возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ). В этой связи уже более 65 стран поставили задачу полной декарбонизации своих экономик к 2050 г. или за период 2045–2060 гг. [9].

Наиболее значимыми на сегодня “зелеными” ВИЭ считаются гидроресурсы, ветер, солнечное излучение. Поэтому интенсивно разрабатываются и строятся соответствующие объекты, изучаются особенности их функционирования и возможности увеличения эффективности их работы. К таким объектам относятся гидро-, ветряные и солнечные электростанции (соответственно ГЭС, ВЭС и СЭС).

Отметим также автономный “зеленый” транспорт на электротяге, поскольку он также характеризуется нулевым углеродным выбросом. Здесь вместо двигателей внутреннего сгорания (ДВС) используются электродвигатели (ЭД), питающиеся от аккумуляторных батарей (АКБ) или батарей водородных топливных элементов (ВТЭ).

Достоинства “зеленой” энергетики очевидны. Главное из них состоит в отсутствии сжигания топлива и соответствующего прямого загрязнения окружающей среды. Однако и здесь существуют серьезные экологические проблемы, которые не всегда упоминают и анализируют. Кроме того, есть другие проблемы, имеющие принципиальный характер. Среди них одна из самых важных – это энергетическая рентабельность.

В настоящей работе дан анализ основных тенденций в деле снижения вредных воздействий на природную среду мировой энергетикой. Рассмотрены недостатки “зеленых” ВИЭ. Показано, что экологически чистых источников энергии в строгом смысле не существует, но развивать “зеленую” энергетику действительно необходимо также и в связи с тем, что традиционные ископаемые источники энергии, являющиеся сегодня основой мировой экономики, рано или поздно будут исчерпаны.

Делается вывод, что в ближайшем будущем трудно рассчитывать на полноценную замену традиционных экологически проблемных источников энергии чем-либо другим. Тенденции в энергетике, включая темпы роста доли “зеленых” ВИЭ в производстве энергии, уровень современных технологий и существующие здесь идеи позволяют предполагать, что углеродное топливо как первичный источник энергии и к 2050 г. останется востребованным, не говоря уже о нуждах нефтехимии, металлургии и других отраслей. Так что достичь глобальной декарбонизации к намеченному сроку будет трудно.

ОСНОВНЫЕ ДОСТИГНУТЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Согласно [20], в 2020 г., как и во все предыдущие годы, в мировом производстве энергии (тепловой и электрической) основным ее источником оставалось традиционное углеродное топливо. При этом доли нефти, газа и угля составили величины, соответственно, равные 31.21, 24.72 и 27.20%. Доля атомных электростанций (АЭС) – 4.31%, ГЭС – 6.86%. Суммарная доля других возобновляемых источников энергии – биотоплива (твердого, жидкого и газообразного), ветра, Солнца, приливов и т.д. равна 5.70%. Так что на теплоэлектростанциях (ТЭС), использующих углеродные ископаемые виды топлива, выработано 83.13% энергии.

Спрос на энергию постоянно растет. Ее выработка в мире за период 2010–2020 гг. увеличилась на 10.14% (в аналогичный, но допандемийный период с 2009 по 2019 г. – на 21% [21]). Первая пятерка ее производителей в 2020 г. выглядела так (10^{18} Дж): Китай – 145.46; США – 87.79; Индия – 31.98; Россия – 28.31; Япония – 17.03. Увеличивается также и производство вредных веществ (парниковых газов, пыли, сажи, оксидов серы, азота и т.д.), зольных материалов. Так, выбросы только CO_2 за период 2010–2020 гг. выросли с 31291.4 до 32284.1 млн т/год. При этом страны, вырабатывающие наибольшие количества энергии, больше всех выбрасывают в атмосферу и CO_2 (млн т в

2020 г.): Китай – 9899.3; США – 4457.2; Индия – 2302.3; Россия – 1482.2; Япония – 1027.0.

Для оценки эффективности того или иного источника широко используется показатель энергетической рентабельности EROI (“energy return on investment”). Это отношение полученной энергии к энергии, затраченной на это получение. Параметр впервые ввел биолог Ч. Холл в 1970-х гг., исследуя миграцию рыб [22]. Идея проста: на поиск и добычу пропитания нельзя тратить энергии больше, чем ее содержится в трофее, т.е. при $EROI \leq 1$ энергозатраты на производство энергии не компенсируются получаемой энергией, что делает бессмысленной такой процесс, а чем EROI больше единицы, тем добыча энергии выгодней. Идея параметра EROI оказалась продуктивной, и в дальнейшем она была распространена на нефть и другие источники [23]. Подчеркнем, что речь идет именно о затраченной энергии, а не о стоимости материалов, оборудования, работ [15].

В настоящее время EROI для производства энергии из угля у разных авторов обычно находится в пределах 30–80, из нефти и газа – от 11 до 35 (чаще всего ~30, как и у АЭС), для сланцевой нефти EROI ~ 5. Для биогаза, биоэтанола, биодизеля разного происхождения (из травы, кукурузы, сахарного тростника, рапсового масла и т.д.) EROI ~ 2–3 и даже EROI < 1 [24].

ОСОБЕННОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ГЭС, СЭС И ВЭС И ПЕРЕРАБОТКИ НЕКОТОРЫХ ОТСЛУЖИВШИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Для ГЭС в литературе чаще всего встречаются величины EROI ~ 50. Строительство крупных ГЭС выступает серьезной нагрузкой на окружающую среду. Так, крупные равнинные ГЭС, построенные на всех континентах, кроме Австралии и Антарктиды, приводят к масштабным затоплениям. Появляются большие поверхности испарения, увеличивается влажность, не в лучшую сторону изменяется климат. Теряются значительные территории, включающие сельскохозяйственные и лесные угодья. Изменение устоявшихся экосистем в руслах и поймах рек делает природную среду невозможной для обитания некоторых видов флоры и фауны. Плотины препятствуют нересту проходных рыб и т. п. Могут быть и другие проблемы, причем не только в случае равнинных ГЭС. Например, в Китае р. Янцзы протекает в основном по горным районам. На ней в 1992–2012 гг. построена самая мощная в мире ГЭС (22500 МВт) “Три ущелья” [38]. При этом было затоплено 13 городов, 140 поселков, 1350 деревень, потеряно около 28 тыс. га обрабатываемых земель. Считается, что в случае прорыва дамбы в районе ГЭС в зоне затопления могут оказаться около 360 млн человек. Большую потенциальную угрозу несут в себе ГЭС, сооруженные в районах с повышенной сейсмической активностью. Отметим также, что строительство ГЭС не везде возможно и не всегда оправдано по многим причинам. Так, многие страны близки к исчерпанию возможностей постройки новых станций. Например, Европа в целом использует свой гидропотенциал уже более чем на 70%, Япония – на 90%. Большими ресурсами гидроэнергии обладает Россия, но она использует их только на 20%. Во многих других странах с высоким гидропотенциалом (Китай, страны Южной Америки) ситуация аналогичная. Проблема в том, что наиболее богатые гидроресурсами регионы удалены от основных потребителей энергии [3].

При получении материалов (цемент, сталь и т.д.), а также оборудования для средних и крупных ГЭС сжигается очень много углеродного топлива. Поэтому можно констатировать, что утверждение, согласно которому все ГЭС производят экологически чистую энергию, не полностью соответствует действительности.

СЭС строятся из батарей солнечных панелей, в свою очередь состоящих из отдельных фотоэлементов. У разных панелей коэффициент фотоэлектрического преобразова-

ния, иными словами, коэффициент полезного действия (КПД) обычно равен 5–25%. Производительность панелей максимальна, когда Солнце в зените. При сплошной облачности она падает более чем на порядок, в темное время суток она равна нулю. С другой стороны, при работе в ясный солнечный день фотоэлементы нагреваются, что отрицательно сказывается на эффективности их работы: со временем существенно падает КПД, уменьшается срок службы. Срок службы панелей (это обычно 7–25 лет) определяется временем деградации фотоэлементов и зависит от многих факторов – конструкции, материалов, температурного режима, влагостойкости и т.д.

Основа солнечных панелей – это высокочистый кремний, в них присутствует также немало ценных и редких элементов, в том числе токсичных (свинец, кадмий, галлий, мышьяк, теллур, селен, индий, ртуть и т.д.). Сам кремний получают из силанов – ядовитых и взрывоопасных жидкостей.

Большой проблемой является переработка отслуживших солнечных батарей. Панели измельчают. Вытравливающими растворами от кремния отделяют просветляющие, активные полупроводниковые, промежуточные и другие слои, обрабатывают сам кремний, который затем переплавляют в слитки для дальнейшего использования. Полученные растворы очищают, концентрируют, осаждают в несколько циклов, извлекают металлы и другие вещества. Так что технология затратна и финансово, и энергетически, при этом она достаточно грязная. Поэтому панели вместо цеха переработки нередко оказываются на свалке. У СЭС EROI для всего жизненного цикла станций низкий. В различных источниках наиболее часто встречаются величины ~4–7 (см., например, [15]).

Самые крупные СЭС построены в основном в пустынях [29, 35]. Например, китайская СЭС Лунъянся [35] находится в провинции Цинхай, на северо-востоке Тибета (рис. 1). Она состоит из 4 млн панелей общей максимальной мощностью 850 МВт и занимает площадь 30 км². Сравнимые по мощности СЭС построены также в Мексике, ОАЭ, США и других странах; все они хорошо видны из космоса. Когда панели только таких СЭС начнут вырабатывать ресурс, то ежегодный масштаб их переработки будет огромен. В то же время переработка необходима, поскольку иначе будут безвозвратно теряться большие количества ценных и редких элементов.

ВЭС. В устройство ветряков входят: лопасти (обычно три, причем это самая сложная и дорогая часть ветроэлектростанции); ротор, к которому они крепятся, и который насажен на главную ось (первичный вал); редуктор; вторичный вал (ось генератора); поворотная система; тормозной механизм и т.д. Все это устанавливают на несущей стальной мачте или башне из железобетона. Материал лопастей – композит на основе стеклянных, стальных, углеродных волокон в полимерной матрице. Диапазон рабочих скоростей ветра промышленных ветряков находится в пределах от 3–4 до 20 м/с. Ниже этого предела турбина останавливается сама (ее эффективность становится нулевой), при максимально возможном ветре мощность турбины максимальна. При слишком сильном ветре автоматика разворачивает плоскость вращения лопастей параллельно направлению ветра и останавливает лопасти во избежание разрушения всей установки.

Развиваемая мощность турбины зависит от ее конструкции (в том числе от величины потерь в механической и электрической части) и силы ветра. Средний фактор (коэффициент) ветряной загрузки в мире равен 24–27% [3]. Он зависит от ветровой специфики конкретной местности, погодных условий, времени суток, времени года. В частности, в приморской ветроэнергетике данный параметр может превышать 40%, в материковых областях он обычно не более 20%. Так что эффективность ветрогенераторов в среднем примерно такая же, как и у СЭС, или несколько выше.

Отметим, что более общий параметр в энергетике – это коэффициент использования установленной мощности, КИУМ (отношение произведенной за конкретный период электроэнергии к максимально возможной выработке за тот же период). Он применим не только к любым ЭС, но и к любым энергосистемам (от районных до гло-



Рис. 1. Китайская СЭС Луньянся на северо-востоке Тибета; сверху – вид с уровня земли, внизу – из космоса (справа – водохранилище на р. Хуанхэ) [35].

Fig. 1. The Chinese Longyanxia solar power plant in the north-east of Tibet; above – a view from ground level, below – from space (on the right – a water reservoir on the Yellow River) [35].

бальных). КИУМ, в отличие от коэффициента ветряной загрузки, можно повышать и понижать в зависимости от уровня текущего потребления энергии. Выработка электроэнергии ветряной турбиной не регулируется. Ее можно лишь остановить.

Для ВЭС наиболее востребованы сегодня турбины с максимальной мощностью 2–3 МВт. У них высота башни ~100 м, а размах лопастей может быть еще больше, вес каждой – порядка 100 т. Уровень шума таких установок достигает 110 дБ и более, что эквивалентно уровню шума вертолета. Генерируется также инфразвук – низкочастотные колебания, передающиеся в почву и грунт. У многих жителей ближайших населенных пунктов пейзаж с промышленными ветряными установками вызывает раздражение, дискомфорт. В сочетании с другими воздействиями это может привести к “синдрому ветрогенератора” (нарушению сна, головной боли, тошноте, тахикардии, проблемам с памятью, с концентрацией внимания и т.д.). Только в США ВЭС ежегодно убивают более полумиллиона птиц [28].

Для достаточно населенных регионов выделение территорий для строительства крупных ВЭС (как и СЭС или равнинных ГЭС) – вопрос сложный. Такие ВЭС построены в малонаселенных или безлюдных местностях. Например, в Китае в провинции Ганьсу действует гигантский ветропарк общей мощностью около 8 ГВт (на 2020 г.) [30] (рис. 2). В дальнейшем ее планируется довести до 20 ГВт. Комплекс расположен в пустыне Гоби. Его минус – это отсутствие в регионе крупных потребителей электроэнергии. Считается, что он ориентирован на будущее.

Большой проблемой любых ВЭС выступает переработка отслуживших свой срок (20–25 лет) промышленных ветроустановок. В настоящее время рассматриваются различные ее направления, но их суть практически одинакова (см., например, [39]). Ло-

пасти измельчаются в гранулы. Затем прессованием, склеиванием, сплавлением предполагается производство различных изделий — полимерных досок, поддонов для складских помещений, наружных отделочных материалов, ограждений и даже железнодорожных шпал. В связи с этим необходимо отметить два момента. Во-первых, подобные изделия не пользуются пока достаточным спросом, поскольку к их качеству имеется много претензий. Во-вторых, когда и эти изделия отслужат свой срок, то непонятно, куда потом их девать и что делать с миллионами тонн полимерных досок, поддонов и т.п. Отметим также, что в настоящее время в лабораториях прорабатывается также пиролиз в инертной атмосфере при температурах 450–700°C. Предполагается, что таким образом можно получать синтез-газ ($\text{CO} + \text{H}_2$, используется как промышленное химическое сырье или топливо при производстве тепловой и электрической энергии), уголь для различных целей (например, для приготовления красок, клеев и даже удобрений), восстанавливать армирующие волокна для повторного их использования. Понятно, что пиролиз лопастей требует огромных затрат энергии, а качество получаемых продуктов будет заметно уступать аналогам, получаемым по другим уже давно отработанным технологиям.

В связи с указанными обстоятельствами, лопасти и другие части конструкции в настоящее время, как правило, отправляют на свалку и/или засыпают землей (рис. 3). Всего в 2019–2020 гг. подлежали утилизации турбины общей мощностью 2 ГВт [39]. Считается, что к 2050 г. можно ожидать накопления десятков млн т композитов, подлежащих утилизации. Наши оценки показывают, что после 2050 г. необходимо будет перерабатывать только лопастей около 2 млн т в год.

Для ВЭС оценки EROI обычно дают величины 16–18 (см., например, [15]). Поскольку эффективные технологии переработки деталей ветротурбин сегодня практически отсутствуют, то в EROI, скорее всего, не учтены энергозатраты на нее, т.к. они фактически не известны. Отсюда следует, что необходимо разрабатывать эффективные со всех точек зрения методы переработки рабочих деталей ВЭС (как и СЭС).

Серьезной проблемой функционирования ВЭС и СЭС является неравномерность работы (пики и провалы в производстве электроэнергии), требующая их подключения к крупным энергосистемам со стабильными источниками (например, ГЭС, АЭС). При этом общий вклад СЭС и ВЭС не должен превышать 25% во избежание дестабилизации работы всей энергосистемы и ее отключения [3]. Это вынуждает использовать мощные аккумуляторные батареи (АКБ) или иметь запасы топлива для дизель-генераторов, используемых в локальных сетях.

Так, в Южной Австралии на территории ВЭС мощностью 100 МВт построена и подключена к общей энергосети крупнейшая в мире Li-AKB емкостью 129 МВт час [37] (рис. 4). При слабом ветре или штиле она способна выдавать в сеть порядка 100 МВт электрической мощности, но только в течение примерно 1 часа.

Более удачный, на наш взгляд, вариант буферизации организован при вводе в эксплуатацию упоминавшейся выше китайской СЭС Луньянся. Этот солнечный парк объединен с местной ГЭС с таким же названием.

Отметим также, что строительство ГЭС, СЭС и ВЭС сопряжено с использованием значительных количеств природных ресурсов, а на предприятиях, связанных с производством и утилизацией элементов данных ЭС, происходят выбросы CO_2 и других вредных веществ. К сожалению, соответствующие количественные оценки в литературе найти трудно.

Несмотря на все сказанное отметим, что “зеленые” ВИЭ уже начали исполнять важную экологическую функцию экономии углеродных ресурсов.



Рис. 2. Ветропарк в Китае в провинции Ганьсу на территории пустыни Гоби [30].

Fig. 2. A wind farm in China in Gansu province on the territory of the Gobi Desert [30].

АВТОНОМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СРЕДСТВА

Оксиды углерода и другие вредные вещества являются продуктами не только электростанций на углеродном топливе, но и автономных транспортных средств с двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Согласно разным оценкам, сегодня только выхлопы таких автомобилей дают до 70–90% загрязнений воздушной среды в мегаполисах. Поэтому большое внимание уделяется автономному транспорту на электротяге, эксплуатация которого характеризуется нулевым углеродным выбросом.

В современном электромобилестроении доминирует транспорт на литий-ионных АКБ, поскольку по совокупности параметров (емкости, плотности запасаемой энергии и т.п.) они пока превосходят все остальные типы. Li-АКБ состоят из множества элементов (ячеек), разных у разных производителей [25, 26, 35]. Например, компания Tesla использует цилиндрические элементы Panasonic, напоминающие хорошо известные батарейки типа AA. АКБ легкового автомобиля емкостью, например, 85 кВт ч состоит из 7104 ячеек. Вес АКБ в сборе – 540 кг, габариты: длина/толщина/ширина – 2100/150/1500 мм. Напряжение на АКБ – 400 В. Отметим, что для АКБ легкового автомобиля Tesla Model S требуется 52.5 кг лития, для электрогрузовика Tesla Semi Truck – порядка 100 кг.

Li-АКБ выдерживают от 500 до 1 тыс. перезарядок, после чего они перестают воспринимать заряд. Так что при ежедневной интенсивной эксплуатации батарею придется менять на новую уже через 2–3 г. У Li-АКБ недостаточно широкий температурный диапазон. Уже при легком морозе емкость резко падает (т. е. падает пробег между зарядками), при жаре работа Li-АКБ нестабильна, поэтому приходится применять принудительное охлаждение, обычно жидкостное. Существует опасность пожара и взрыва при авариях, разгерметизации ячеек. У разных производителей цена Li-АКБ примерно одинакова (в среднем \$1 тыс. за 1 кВт ч), так что для массового потребителя электромобиль не очень доступен. Поэтому во всем мире ведется поиск дешевого, безопасного, долговечного аккумулятора с быстрой зарядкой и высокой плотностью энергии.

Что касается других применений Li, то это важнейший материал для атомной энергетики, металлургии, производства керамики, стекла, полимеров и т.д. [33]. Отметим, также, что облучением лития получают тритий – второй наряду с дейтерием компонент топлива для возможных в будущем термоядерных электростанций (см., например, [3]).

Хотя литий довольно широко распространен в природе, он относится к редким металлам, поскольку находится в рассеянном виде. Более 70% месторождений Li нахо-



Рис. 3. Кладбище примерно 1000 стекловолоконных лопастей с трех ВЭС, построенных на северо-западе США в 1990-х гг. в первую волну ветроэнергетики и отработавших 25 лет. Каждую лопасть разрежут на три части и затем все захоронят [39].

Fig. 3. A cemetery of about 1000 fiberglass blades from three wind farms built in the northwest of the United States in the 1990s in the first wave of wind power and worked for 25 years. Each blade will be cut into three parts and then all will be buried [39].

дится в Чили, Боливии и Аргентине. Основные его источники – это минерализованные воды, соли высохших соляных озер, солончаковые отложения пустынь с содержанием Li 0.01–1% [10, 16]. Растворы перекачивают в искусственные водоемы, выпаривают на солнце до полутора лет. Смесь растворов перерабатывают с помощью целого ряда химических реакций и электролиза расплавов солей с последующей очисткой от примесей вакуумной дистилляцией, ректификацией, зонной плавкой. Затем литий рафинируют, последовательно выпаривая разные металлы из расплава. Так что добыча и производство Li – сложный и долгий процесс, очень вредный, грязный, а также энергозатратный. Поэтому остро стоит вопрос о переработке АКБ для повторного использования Li, а также иных редких и ценных используемых в Li-АКБ металлов, в том числе, опасных и ядовитых, попадание на свалку которых крайне нежелательно. В частности, растворимые соединения кадмия поражают центральную нервную систему, печень, почки, способствуют разрушению костей; кобальт и его соединения токсичны, обладают канцерогенным и мутагенным действием.

Считается [31], что в настоящее время перерабатывается только 3% из всего объема мирового производства батареек и аккумуляторов. Это очень энергоемкий процесс, в котором для извлечения металлов тратится в 6–10 раз больше энергии, чем требуется для их добычи. Что касается Li-АКБ, то к настоящему времени разработано не так уж много технологий их переработки [7]. Различные металлы вытравливаются химически и разделяются с помощью довольно дорогого оборудования (магнитных сепараторов, электролизаторов и т. д.). Так что переработка литиевых аккумуляторов – это не только энергоемкий процесс, но также довольно сложный, грязный и дорогой, с большим количеством отходов.

По расчетам International Energy Agency (IEA), если сегодняшние темпы роста производства электротранспорта сохранятся, то уже к 2030 г. будет произведено 11 млн т отработавших Li-АКБ [40].

К настоящему времени практически все основные автопроизводители (Audi, BMW, Ford, Honda, Hyundai, Mercedes, Toyota, Volvo и т.д.) объявили о прекращении в ближайшем будущем производства автомобилей с ДВС. С 2030–2040-х гг. в Великобритании, США, Франции, Японии и других странах начнет действовать запрет на их



Рис. 4. Литий-ионная супербатарея мощностью 100 МВт, Южная Австралия, г. Джеймстаун [37].

Fig. 4. Lithium-ion super battery with a capacity of 100 MW, South Australia, Jamestown [37].

производство. Пользоваться старыми машинами с ДВС и перепродавать их запрещено не будет [27].

В 2020 г. указанные компании произвели около 60 млн автомобилей [34]. Если теперь представить, что в 2040 г. они выпустили столько же автомобилей (автобусов, грузовиков, легковых автомобилей) со средней мощностью, скажем, 100 кВт (или 136 л. с.), но не с ДВС, а с АКБ, то только для их подзарядки потребуется $60 \text{ млн} \times 100 \text{ кВт} = 6 \text{ ТВт}$ электрической мощности. И это без учета возможного увеличения выпуска электроавтомобильной техники с сегодняшнего дня по 2040 г. и работающих электроавтомобилей, произведенных до 2040 г., а также всех других потребителей электроэнергии.

В 2020 г. всего в мире произведено 26823.2 ТВт ч электроэнергии [20]. Поэтому совокупная мощность всех электростанций планеты в 2020 г. была равна $26823.2 \text{ ТВт ч} / (365 \text{ сут} \times 24 \text{ ч}) = 3.06 \text{ ТВт}$. В различных других источниках представлены величины примерно от 2 до 5 ТВт.

Лития для производства 60 млн единиц только электротранспорта потребуется более 3 млн т, если исходить из расчета 50 кг на машину, или свыше 6 млн т, если брать 100 кг и не учитывать других потребностей в данном металле. Мировые запасы пригодного для промышленной добычи лития на конец 2020 г. оценивались в 18.955 млн т, а используемого в Li-АКБ кобальта – в 6.902 млн т [20]. Так что полный перевод автотехники на АКБ, как запланировано во многих странах, выглядит пока не слишком реально. Альтернативу или дополнение к транспорту на АКБ может составить транспорт на водородных топливных элементах (ВТЭ).

Топливные элементы вырабатывают электроэнергию во многом подобно тому, как это происходит в других химических источниках тока, например, тех же Li-АКБ. Только если в последних Li находится в замкнутом объеме, то в первых источник энергии (бензин, этанол, метанол, метан, водород) поступает извне, а наружу выходят продукты химических реакций (оксиды углерода и др.). В качестве топлива наиболее предпочтителен водород, поскольку продуктом его преобразования является просто водяной пар. В качестве катализатора, как правило, используется платина. Можно предположить, что часть выхлопного газа ВТЭ, т.е. водяного пара, включится в природный круговорот воды, а часть поступит в атмосферу, усугубляя парниковый эффект. В итоге сколько молекул водорода будет использовано во всех ВТЭ, столько молекул воды будет возвращено в окружающую среду. Кроме того, при отрицательных температурах возникает проблема обледенения объектов, работающих на ВТЭ. К сожалению, обсуждение данных обстоятельств в литературе найти трудно.

В энергоустановках элементарные ВТЭ объединяют в модули, как и единичные элементы в Li-АКБ; из модулей собирают батареи нужной мощности, вплоть до величин, характерных для небольших электростанций.

Основная проблема водородных энергоустановок – это сам водород. Он химически чрезвычайно активен и при этом легко проникает в объем металлов (явление окклюзии, растворения газов в металлах с образованием твердых растворов [1]). В результате многие металлы, включая высокопрочные стали, сплавы титана и никеля, становятся хрупкими вследствие образования металлгидридов. Более того, некоторые металлы просто рассыпаются в порошки металлгидридов. Водород способен проникать также в резину, пластики и даже стекло. Если он находится под высоким давлением (например, в топливном баке транспортного средства), то проблема усугубляется. Жидкое состояние водорода между его плавлением и кипением характеризуется очень низкими температурами: $t_{\text{пл}} = -252.6^\circ\text{C}$ и $t_{\text{кип}} = -259.1^\circ\text{C}$ (или $T_{\text{пл}} \approx 14\text{ K}$, $T_{\text{кип}} \approx 20\text{ K}$) [17]. Более низкие температуры плавления и кипения только у гелия. Так что для хранения водорода в жидком виде, в том числе на борту транспортного средства, требуется тяжелое криогенное оборудование. В этой связи рассматривают разные варианты его транспортировки и хранения при температурах окружающей среды. Например, хранение в обратимо гидрирующихся металлах и сплавах, в эффективных адсорбентах водорода, для чего можно использовать капиллярные матрицы, составленные, в частности, углеродными нанотрубками и т.д. [2]. Несмотря на все трудности, уже сегодня мелкими сериями выпускаются транспортные средства различного назначения, от легковых автомобилей (например, Toyota Mirai, Япония) до поездов (например, Coradia iLint, Франция). Однако ВТЭ пока дороги, объемы их выпуска остаются небольшими, поэтому и водородная инфраструктура находится в зачаточном состоянии. Например, в Германии водородных заправок сегодня около ста на всю страну.

ВОДОРОД КАК АЛЬТЕРНАТИВНОЕ ТОПЛИВО В ДЕКАРБОНИЗАЦИИ МИРОВОЙ ЭКОНОМИКИ

Водород – это очень важное промышленное сырье. Его производят примерно 75 млн т в год. Еще около 42 млн т вырабатывают в смеси с другими газами (обычно в виде синтез-газа) [5, 8]. В энергетике и на транспорте его потребляется пока менее 0.01 млн т в год. Вырабатывается он в основном тремя способами [13]. Более $\frac{3}{4}$ водорода производится конверсией метана (самый дешевый пока метод), для чего расходуются более 205 млрд м³ природного газа. Почти весь остальной водород получают из кокса (на это уходит 107 млн т каменного угля). В итоге в атмосферу наряду с другими вредными веществами поступает 830 млн т CO₂. Это больше, чем в 2020 г. выбросила, например, Германия (604.9 млн т) [20]. Небольшая часть (около 0.1%) вырабатывается электролизом воды, точнее водных растворов солей или гидроксидов металлов, а также кислот или щелочей (чистая вода плохо проводит электрический ток). Поэтому и здесь выделяются вредные и ядовитые вещества. Например, нередко используют процесс $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{NaCl} = 2\text{NaOH} + \text{Cl}_2 + \text{H}_2$.

Из разных источников следует, что цена электролизного водорода в 3–9 раз выше, чем произведенного первыми двумя способами. Причем до 85% его цены – это стоимость электроэнергии [12]. Цена водорода, получаемого из воды с помощью ВИЭ, почти на порядок выше стоимости природного газа [5]. Поэтому возникает вопрос: какова энергетическая рентабельность водорода?

В [11] предложена модель расчета коэффициента EROI при различных вариантах производства, хранения, транспортировки водорода. Для электролиза воды рассмотрены ВИЭ, ТЭС и АЭС. Учтены направления энергосбережения при использовании выбрасываемого вторичного тепла в металлургии, нефтепереработке. Показано, что затраты энергии на получение водорода составляют 154–614% от его химической

энергии, что отвечает $EROI = 0.650-0.163$ и характеризует водород как энергетически нерентабельный энергоноситель.

Несмотря на то, что многие проблемы, связанные с водородом, остаются пока еще без эффективного решения, мировое сообщество сегодня возлагает на него надежды как на основной альтернативный источник энергии, способный обеспечить значительное снижение выбросов CO_2 в атмосферу. Многие страны, особенно из числа ратифицировавших Парижское соглашение по климату, разработали национальные водородные стратегии.

Так, Австралия, используя солнечную и ветряную энергию, планирует производство аммиака как способ хранения и транспортировки водорода. Франция планирует развивать водородную энергетику на базе АЭС. Германия предполагает к 2050 г. осуществить полный отказ от использования нефти, газа и угля. Для этого она будет искать поставщиков водорода в лице сегодняшних экспортеров энергоресурсов. В частности, рассматривается вариант конверсии метана на соответствующих предприятиях, которые можно построить неподалеку от выхода на территорию страны трубопроводов природного газа из России. Ранее Германия объявила, как известно, об отказе от АЭС.

Россия не будет форсировать расставание с углеводородами. Одна из первостепенных задач, на которых она планирует сосредоточиться, – разработка конкурентоспособных технологий производства водорода из природного газа (с улавливанием CO_2) и электролизом воды на базе АЭС и ВИЭ [8, 19].

Согласно [20], в 2020 г. в мире использовано 10.6 млрд т углеродного топлива. Водород примерно в 2.5 раза более эффективен, поэтому его потребовалось бы 4.25 млрд т. Если учесть рост спроса на энергию за последние десятилетия, то для 2050 г. эту цифру следует удвоить. С другой стороны, по данным, например, [18], в 2050 г. потребуется 1.37 млрд т водорода для получения половины мировой энергии. Такой прогноз соответствует ситуации, что потребности в энергии к 2050 г. не увеличатся примерно вдвое, а примерно в три раза упадут, что маловероятно. В любом случае встает вопрос, где взять энергию для получения таких количеств водорода (и одновременно, например, для подзарядки АКБ всех типов и назначений)? Ответа пока нет. Поэтому необходимо продолжить поиск эффективных источников энергии, особенно возобновляемых.

Новый импульс в развитии технологий производства водорода могут придать успехи атомной энергетики, которая является углеродно-нейтральной. Реакторы характеризуются сегодня огромным разнообразием по мощности, назначению, типу [6]. Так, атомные энерготехнологические станции (АЭТС) на базе высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (ВТГР), основой которым послужили разработки атомных ракетных двигателей на водороде [4], могут быть использованы для производства последнего, для опреснения воды, обеспечения технологических процессов металлургии, нефтепереработки и т.д. Причем в производстве водорода может использоваться как паровая конверсия метана, так и высокотемпературный электролиз, где большая часть электрической энергии для разложения воды замещается тепловой энергией.

Как новые источники энергии, особого внимания заслуживают реакторы на быстрых нейтронах (РБН). В них возможна организация замкнутых циклов, когда отработанное топливо превращается в новое топливо и возвращается обратно в реактор. Полагают, что такая технология позволит получать энергию в течение столетий или даже тысячелетий. Россия такой технологией не просто обладает, а считается лидером в данной области. РБН вполне можно рассматривать как перспективные в ближайшем будущем дополнительные источники энергии для эффективного производства водорода.

В начале июня 2021 г. госкорпорация “Росатом” приступила к строительству в Томской области опытно-демонстрационного энергетического комплекса нового типа, в состав которого войдет РБН нового поколения “БРЕСТ-ОД-300” (быстрый реактор естественной безопасности) с электрической мощностью 300 МВт. Комплекс будет

включать также завод по сборке топливных элементов и завод по их переработке после использования (облучения в реакторе). Комплекс будет вырабатывать тепло, электричество, а также топливо для самого себя [14].

Генеральный директор МАГАТЭ М. Гросси положительно оценил начало строительства комплекса, особо отметив полную автономность и закрытость топливного цикла, что уменьшит количество ядерных отходов, требующих долгосрочного хранения. Генеральный директор госкорпорации “Росатом” А. Лихачев на церемонии закладки реактора 08.05.2021 заявил, что благодаря переработке ядерного топлива бесконечное количество раз, ресурсная база атомной энергетики становится практически неисчерпаемой, поэтому при успешной реализации проекта такие комплексы будут внедряться по всей стране, а в 2030–2040-х гг. можно будет начать их экспорт. Правда, необходимо отметить, что опыта эксплуатации подобных циклических комплексов пока еще нет. Поэтому их достоинства требуют практической проверки. Время покажет, насколько потенциальные возможности комплексов соответствуют действительности. На это уйдут 2030–2040-е гг., и если все подтвердится, то понадобится еще немало лет, чтобы построить достаточное количество таких объектов.

Отметим также термоядерные электростанции (ТЯЭС), которые считаются потенциальным источником энергии в будущем. В 2007 г., как хорошо известно (см., например, [3]), на юге Франции силами международного консорциума, в который входит и Россия, началось строительство ИТЭР (интернационального термоядерного экспериментального реактора). За основу взят импульсный реактор тороидального типа (токамак), который впервые разработан и построен еще в СССР. На сегодняшний день из всех возможных вариантов реакций термоядерного синтеза легких ядер можно использовать только слияние дейтерия и трития. Реакция происходит при температуре ~150 млн °С, что на порядок выше температуры в центре Солнца. Остальные реакции с участием, например, дейтерия и протия требуют гораздо более высоких температур при этом характеризуются низким энергетическим выходом.

Считается, что термоядерное топливо будет добываться из морской воды, в которой примерно 0.015% дейтерия, если остальное – протий. Дейтерий получают в процессах изотопного обмена, многоступенчатого электролиза воды, ее ректификации и т.д., на что требуется достаточно много энергии и материальных средств. Естественный радиоактивный тритий образуется при действии солнечного ветра на верхние слои атмосферы (т.е. главным образом на ядра атомов азота и кислорода). Тритий имеет период полураспада чуть больше 12 лет, поэтому в природе его крайне мало. Мировое производство и потребление промышленного трития сегодня – это несколько килограммов в год при его стоимости несколько десятков млн долл. за 1 кг. Для годовой работы одной ТЯЭС потребуется около 100 кг трития. В настоящее время его получают в специальных реакторах, где делению подвергают ядра атомов лития, облучая их нейтронами. Иными словами, речь опять идет о литии, запасы которого, как уже отмечалось выше, весьма ограничены. Поэтому тезис о том, что ТЯЭС могут стать неисчерпаемым источником энергии, пока не совсем соответствует действительности.

ИТЭР будет чисто экспериментальным объектом. Иначе говоря, это будет прототип ТЯЭС, поскольку здесь выработка электроэнергии не предполагается, а получаемое тепло будет рассеиваться в окружающую среду. Цель строящегося ИТЭР – выяснение принципиальной возможности промышленного получения энергии на ТЯЭС. Для этого будет оцениваться целый комплекс научно-технических параметров, а также стоимостные характеристики, КПД, EROI и т.д. ИТЭР сможет непрерывно работать только примерно 500 с, выдавая при этом мощность 500 МВт, затем будет следовать перерыв. Отметим также, что для удержания замкнутого шнура водородной плазмы вдали от внутренних стенок токамака будут использованы сильнейшие магнитные поля, создаваемые сверхпроводником (СП) Nb_3Sn . Криогенная система охлаждения СП-электромагнитов очень сложная (содержит в своей спецификации примерно

4500 элементов) и будет состоять из двух контуров – жидкий азот охлаждает гелиевый контур, жидкий гелий охлаждает СП-каатушки. При этом холодильные машины только гелиевого контура будут потреблять почти 16 МВт электрической мощности (столько потребляет небольшой город).

Ввод ИТЭР планировался на 2027 г. В настоящее время многие специалисты считают, что полноценные эксперименты с плазмой дейтерий-тритий начнутся не ранее 2035 г. Данная ситуация связана с тем, что создание термоядерного реактора как источника энергии – совершенно новая сверхсложная задача, в которой многие решения и технологии приходится изменять на ходу или разрабатывать заново. Отметим также, что исследовательских реакторов типа токамак в мире построено довольно много, порядка трехсот. Но, во-первых, токамак ИТЭР будет самым большим и мощным, во-вторых, ни одного прототипа ТЯЭС пока не существует.

В целом перспективы ТЯЭС, на выявление которых направлено строительство ИТЭР, остаются неясными по многим позициям. Так, если не считать проблем утилизации отработавших элементов конструкций с наведенной во время работы реактора радиоактивностью, то это проблемы обеспечения литием, больших затрат энергии и материальных средств на получение термоядерного топлива, обслуживание реактора, всего комплекса. Поэтому складывается впечатление, что оценки КПД и EROI всей ТЯЭС могут оказаться довольно неутешительными. Вместе с этим следует иметь в виду, что технологии постоянно совершенствуются и разрабатываются новые. Кроме того, успехи физики сверхпроводимости вселяют надежду, что рано или поздно будут открыты высокотемпературные или даже комнатотемпературные сверхпроводники, пригодные для различных промышленных применений. Они значительно упростят и удешевят также и ТЯЭС, помогут сэкономить огромное количество электроэнергии, финансовых и материальных ресурсов, положительным образом повлияют на величины КПД и EROI.

И последнее. Говоря о замене ископаемого углеродного топлива на водород, следует иметь в виду, что в результате будет дополнительно связываться кислород, а в атмосферу поступят дополнительные количества водяного пара. Обозначим некоторые возможные проблемы, связанные с последним обстоятельством.

Концентрация газов, составляющих атмосферу, как известно, практически постоянна, за исключением H_2O и CO_2 . По поводу последнего проводится постоянный мониторинг. Так, данные, полученные, например, 8 сентября 2021 г., показали, что концентрация CO_2 достигла величины 413.45 ppm. Год назад, 8 сентября 2020 г., было 411.98 ppm [32]. Иными словами, концентрация CO_2 в атмосфере растет катастрофически быстро (об этом говорят и все предыдущие измерения), и она уже примерно в 1.5 раза превышает доиндустриальный уровень (280 ppm), отсчитываемый от 1850 г. Что касается массы водяных паров в атмосфере, то, по данным из разных источников, она составляет $\sim 10^{13}$ т (масса CO_2 примерно на порядок ниже). Для сравнения отметим, что масса всей атмосферы Земли равна 5.3×10^{15} т. Такую оценку легко получить, зная атмосферное давление у земной поверхности и площадь последней.

Допустим, что к 2050 г. планируемая декарбонизация состоялась, и вместо ископаемого топлива ежегодно сжигается ~ 10 млрд т водорода, что дает дополнительно порядка 10^{11} т H_2O или добавку величиной примерно 1% от общего сегодняшнего количества H_2O в атмосфере. С одной стороны, это не много, а водяной пар не самый сильный парниковый газ, так что последствия могут быть несущественными. С другой стороны, не следует забывать, что именно водяной пар вносит в парниковый эффект наибольший вклад, поскольку в атмосфере его намного больше, чем всех остальных парниковых газов вместе взятых. Рост количества водяного пара может приводить к увеличению облачности, т.е. к уменьшению поступления тепла от Солнца. Вместе с этим данный процесс может усилить и парниковый эффект. Поскольку процессы в

атмосфере очень сложные, зависят от множества взаимосвязанных параметров, постольку даже малые их изменения могут запустить какие-то новые процессы, в том числе нежелательные в долгосрочной перспективе.

Поэтому несмотря на то, что главным источником атмосферного водяного пара служит мировой океан, представляется целесообразным тщательно проанализировать последствия частичной или полной замены атмосферного техногенного газа CO_2 на такой же пар H_2O . Сделать это современные вычислительные мощности позволяют.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе дан анализ сегодняшних достижений и перспективных направлений в борьбе с потеплением климата путем декарбонизации мировой экономики. Показано, что, несмотря на интенсивное строительство в последние десятилетия электростанций на “зеленых” ВИЭ, их вклад в мировое производство энергии остается пока небольшим, невелики и ресурсы современной водородной энергетики. Отмечено, что сохраняется зависимость всех “зеленых” ВИЭ (ГЭС, СЭС и ВЭС) от ископаемых видов топлива, описаны экологические проблемы, связанные с эксплуатацией таких электростанций и переработкой их отслуживших элементов. Так что “зелеными” эти ВИЭ можно назвать лишь условно. Отмечено, что СЭС и ВЭС характеризуются невысокими коэффициентами EROI. Для водорода EROI откровенно низок, а его стоимость остается еще слишком большой, поэтому коммерческие перспективы данного энергоносителя пока не совсем ясны.

В работе также показано, что планируемые действия по декарбонизации мировой экономики не сбалансированы и противоречивы, так что выглядят пока трудно реализуемыми. В частности, непонятно, где и как получать энергию одновременно на производство миллиардов тонн водорода (если считать, что это и есть альтернативный энергоноситель), на переработку отслуживших деталей СЭС, ВЭС и АКБ, которых ожидается многие миллионы тонн ежегодно, на подзарядку АКБ, откуда извлекать необходимое количество лития. В наличии имеются пока желания, декларации, субсидии для производителей и потребителей, несоответствия существующих прогнозов современным реалиям и возможностям ближайшего будущего. Так что наряду с научно-технологическими проблемами необходимо решать и организационные.

Что касается новых разработок атомной энергетики (АЭТС на базе обычных реакторов или ВТГР, комплексов на базе РБН), то они выглядят вполне перспективно, но требуют практической проверки, на что может уйти не одно десятилетие. Перспективы ТЯЭС пока остаются неясными по многим позициям.

Первоочередные задачи на сегодня – это поиск эффективных путей получения электролизного водорода, разработка “зеленых” ВИЭ и АКБ с высоким ресурсом, а также приемлемых путей переработки их отслуживших деталей.

Отмечается также, что несмотря на все трудности, “зеленые” ВИЭ уже начинают исполнять важную экологическую функцию экономии углеродных ресурсов. А поскольку рано или поздно ископаемое топливо иссякнет, постольку поиск, разработку и ввод новых альтернативных источников энергии следует всячески приветствовать, а уже имеющуюся “зеленую” энергетику развивать и совершенствовать.

Поскольку проблем очень много, и они очень сложные, то делается вывод, что углеродное топливо и к 2050 г. останется востребованным, а проблема декарбонизации будет решена в более отдаленной перспективе.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ на 2019–2021 гг. (тема № АААА-А19-119020190099-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Березкин В.И.* Углерод: замкнутые наночастицы, макроструктуры, материалы. СПб.: АРТЭГО, 2013. 450 с.
2. *Березкин В.И.* Введение в физическую адсорбцию и технологию углеродных адсорбентов. СПб.: Виктория плюс, 2013. 409 с.
3. *Березкин В.И.* Экологическая безопасность в контексте новых технологий выработки энергии и достижений фундаментальной науки в области сверхпроводимости // Региональная экология. 2018. № 2(52). С. 103–122. <https://doi.org/10.30694/1026-5600-2018-2-103-122>
4. *Гребенник В.Н., Кухаркин Н.Е., Пономарев-Степной Н.Н.* Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы – инновационное направление развития атомной энергетики. М.: Энергоатомиздат, 2008. 134 с.
5. *Егоров А.* Перепись водорода // Газпром. 2019. № 9. С. 42–43. <https://www.gazprom.ru/f/posts/91/915005/gazprom-magazine-2019-9.pdf>.
6. *Кайнова А.В., Сухарев Ю.П., Власичев Г.Н.* Реакторные установки сверхмалой мощности // Труды Нижегородского Государственного технического университета им. Р.Е.Алексеева. 2018. № 1(120). С. 108–116. <https://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/nauka/izdaniya/trudy/2018/01/2018-01.pdf>
7. *Каперзов А.О., Герасимов В.С., Буяков С.А.* Особенности и риски, связанные с утилизацией литий-ионных батарей. URL: <https://zen.yandex.ru/media/id/5c87839059b73700b00c9f79/osobennosti-i-riski-svzaznnyie-s-utilizaciei-litiiionnyh-batarei-5c93ef1519fa6800b3c9c359> (дата обращения: 12.06.2021).
8. *Новак А.* Водород: энергия “чистого” будущего // Энергетическая политика. 2021. № 4(158). С. 6–11. https://doi.org/10.46920/2409-5516_2021_4158_6
9. *Новак А.* Сообщение вице-преьера правительства РФ на ПМЭФ’21 (SPIEF’21) // Газета СПб. Ведомости. 07.06.2021.
10. *Плющев В.Е., Степин Б.Д.* Химия и технология соединений лития, рубидия и цезия. М.-Л.: Химия, 1970. 407 с.
11. *Петин С.Н.* Энергетическая эффективность производства и потребления водорода // Вестник Московского энергетического института. 2019. № 2. С. 29–36. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2019-2-29-36>
12. Получение водорода электролизом воды. URL: <https://poznayka.org/s67773t1.html> (дата обращения: 12.06.2021).
13. *Пономарев-Степной Н.Н., Столяревский А.Я.* Атомно-водородная энергетика – пути развития // Энергия. 2004. № 1. С. 3–9. https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=216.
14. “Росатом” начал строить уникальный реактор БРЕСТ в Томской области. URL: <https://ria.ru/20210608/energoblok-1736090576.html> (дата обращения: 12.06.2021).
15. *Сафронов А.Ф., Голоскоков А.Н.* EROEI как показатель эффективности добычи и производства энергоресурсов // Бурение и нефть. 2010. № 12/13. <https://burneft.ru/archive/issues/2010-12/13>.
16. *Солодов Н.А., Балашов Л.С., Кременецкий А.А.* Геохимия лития, рубидия и цезия. М.: Недра, 1980. 233 с.
17. Справочник химика (в 3 т.). Под ред. Б.П. Никольского. Л., М.: ГНТИ хим. лит.-ры. Т. 1. 1962. 1071 с.
18. *Филиппов С., Голодницкий А., Кашин А.* Топливные элементы и водородная энергетика // Энергетическая политика. 2020. № 11. С. 28–39. <https://energypolicy.ru>.
19. *Шульгинов Н.Г.* Не надо спешить расставаться с углеводородами, надо наравне с традиционными видами энергетики развивать ВИЭ // Энергетическая политика. 2021. № 5. С. 4–13. https://doi.org/10.46920/2409-5516_2021_5159_4.
20. BP Statistical Review of World Energy 2021. 70th edition. 72 p.
21. BP Statistical Review of World Energy 2020. 69th edition. 68 p.
22. *Hall C.A.S.* Migration and metabolism in a temperate stream ecosystem // Ecology. 1972. V. 53. P. 585–604.
23. *Murphy D.J., Hall C.A.S.* Year in review EROI or energy return on (energy) invested // Ann. N. Y. Acad. Sci. 2010. V. 1185. P. 102–118. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.05282.x>
24. *Rana R. L., Lombardi M., Giungato P., Tricase C.* Trends in Scientific Literature on Energy Return Ratio of Renewable Energy Sources for Supporting Policymakers // Adm. Sci. 2020. 10(2), 21. <https://doi.org/10.3390/admsci10020021>
25. Аккумулятор Tesla Model S. Что внутри? URL: <https://korea1.ru/vybor/akkumulyator-tesla-model-s-cto-vnutri-razbiraem-tyagovye-litii-ionnye-batarei-tesla-cto> (дата обращения: 12.06.2021).

26. Аккумуляторы электромобилей: особенности применения. URL: <https://e-cars.tech/2020/11/04/akkumulyatory-elektromobilej-osobennosti-primeneniya/> (дата обращения: 12.06.2021).
27. В США тоже начали запрещать автомобили с ДВС. URL: https://auto.mail.ru/article/81117-v_ssha_tozhe_nachali_zapreshchat_avtomobili_s_dvs (дата обращения: 12.06.2021).
28. Жертвы экологически чистой энергии: сколько птиц гибнет от ветрогенераторов. URL: <https://www.pornmech.ru/science/news-579664-vuyasnilos-skolko-ptic-gibnet-ot-vetrogenera-torov> (дата обращения: 12.06.2021).
29. Крупнейшие солнечные электростанции в мире. URL: <https://zen.yandex.ru/media/energo-fizik/krupneishie-solnechnye-elektrostantsii-v-mire-5d1769809865f000acee46ab> (дата обращения: 12.06.2021).
30. Крупнейший ветропарк Ганьсу, заменяющий собой десяток АЭС. URL: <https://fishki.net/3448225-krupnejshij-vetropark-ganysu-zamenjajuwij-soboj-desjatok-ajes.html> (дата обращения: 12.06.2021).
31. Переработка аккумуляторов и батареек. URL: <https://nature-time.ru/2013/12/pererabotka-akkumulyatorov-i-bataareek> (дата обращения: 12.06.2021).
32. Последние Daily CO₂. URL: <https://ru.co2.earth/daily-co2> (дата обращения: 08.09.2021).
33. Производство лития в мире. Мировые запасы литиевых ресурсов. URL: <https://reaestate.ru/proizvodstvo-litiya-v-mire-mirovye-zapasy-litievyyh-resursov> (дата обращения: 12.06.2021).
34. Статистика производства новых автомобилей. URL: <https://auto.vercity.ru/statistics/production/2021> (дата обращения: 12.06.2021).
35. Топ-10 крупнейших альтернативных электростанций мира. URL: <https://zen.yandex.ru/media/megastroyki/top10-krupneishih-alternativnyh-elektrostantsii-mira-5cbf5417ae4f3800b29a5c14> (дата обращения: 12.06.2021).
36. Тяговые аккумуляторы для автомобилей. URL: <https://efut.ru/a/135-tjagovye-akkumuljatory-dlja-jelektromobilej.html> (дата обращения: 12.06.2021).
37. Tesla построила крупнейшую в мире литий-ионную батарею в Австралии. URL: <https://www.ridus.ru/news/266068> (дата обращения: 12.06.2021).
38. Three Gorges Dam. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Three_Gorges_Dam (дата обращения: 12.06.2021).
39. What happens to all the old wind turbines? URL: <https://www.bbc.com/news/business-51325101> (дата обращения: 12.06.2021).
40. World Energy Outlook 2020. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020> (дата обращения: 12.06.2021).

Decarbonization as a Means of Combating Climate Warming and the Problems of “Green” Energy

V. I. Berezkin*

*St. Petersburg Scientific Research Center for Ecological Safety of the Russian Academy of Sciences — St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, Russia*

**E-mail: v.berezkin@inbox.ru*

The article analyzes the current efforts to combat climate warming by moving towards the ultimate goal announced by many countries as the complete decarbonization of their economies by 2050. The main trends in reducing harmful effects on the natural environment by replacing fossil fuels with renewable and environmentally friendly (“green”) sources — hydrogen, wind, solar, and water energy are considered. Promising developments of atomic energy in this context are also described. The state of affairs in the field of thermonuclear power plants is noted. It is shown that “green” energy sources, in the strict sense, do not exist today, and the designated ways to achieve zero emission of harmful substances are quite contradictory and therefore look difficult to implement so far. At the same time, it was noted that it is vital to develop “green” energy not only from the point of view of nature protection, but also due to the fact that traditional fossil energy sources will sooner or later be exhausted. It is indicated which problems will need to be solved. It is shown that there are a lot of them and they are very complex. It is concluded that the level of modern technologies and the ideas existing here let to suggest that carbon fuel as a primary energy source will remain in demand by 2050. And since the achievement of decarbonization is also associated with prob-

lems whose solutions have not yet been found or tested in practice, the path in this direction is likely to be longer.

Keywords: climate warming, decarbonization of the world economy, “green” energy sources

REFERENCES

1. Berezkin V.I. Uglerod: zamknutyte nanochastitsy, makrostruktury, materialy. SPb.: ARTEGO, 2013. 450 s.
2. Berezkin V.I. Vvedeniye v fizicheskuyu adsorbtsiyu i tekhnologiyu uglerodnykh adsorbentov. SPb.: Viktoriya plus, 2013. 409 s.
3. Berezkin V.I. Ekologicheskaya bezopastnost' v kontekste novykh tekhnologii vyrabotki energii i dostizhenii fundamental'noi nauki v oblasti sverkhprovodimosti // Regional'naya Ekologiya. 2018. № 2 (52). S. 103–122. Doi: 10.30694/1026-5600-2018-2-103-122.
4. Grebennik V.N., Kukharkin N.E., Ponomarev-Stepnoi N.N. Vysokotemperturnye gazoohlazhdaemye reaktory — innovatsyonnoe napravleniye razvitiya atomnoi energetiki. M.: Energoatomizdat. 2008. 134 s.
5. Egorov A. Perepis' vodoroda. // Gazprom. 2019. № 9. S. 42–43. <https://www.gazprom.ru/f/posts/91/915005/gazprom-magazine-2019-9.pdf>.
6. Kainova A.V., Sukharev Yu.P., Vlasichev G.N. Reaktornye ustanovki sverkhmaloi moshchnosti // Trudy Nizhegorodskogo Gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseyeva // 2018. № 1(120). S. 108–116.
7. Kaperzov A.O., Gerasimov V.S., Buryakov S.A. Osobennosti i riski, svyazannye s utilizatsiei litiionnykh batarei. URL: <https://zen.yandex.ru/media/id/5c87839059b73700b00c9f79/osobennosti-i-riski-svazannye-s-utilizatsiei-litiionnykh-batarei-5c93ef1519fa6800b3c9c359> (data obrashcheniya: 12.06.2021).
8. Novak A. Vodorod: energiya “chistogo” budushchego // Energeticheskaya politika. 2021. № 4(158). S. 6–11. Doi: 10.46920/2409-5516_2021_4158_6.
9. Novak A. Soobshcheniye vitse-prem'era pravitel'stva RF na PMEF'21 (SPIEF'21) // Gazeta SPb. Vedomosti 07.06.2021.
10. Plyushchev V.E., Stepin B.D. Khimiya i tekhnologiya soedinenii litiya, rubidiya i tseziya. M.-L.: Khimiya, 1970. 407 s.
11. Petin S.N. Energeticheskaya effektivnost' proizvodstva i potrebleniya vodoroda // Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta. 2019. № 2. S. 29–36. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2019-2-29-36>.
12. Polucheniye vodoroda elrktrolizom vody. URL: <https://poznayka.org/s67773t1.html> (data obrashcheniya: 12.06.2021).
13. Ponomarev-Stepnoi N.N., Stolyarevskii A.Ya. Atomno-vodorodnaya energetika — puti razvitiya. // Energiya. 2004. № 1. S. 3–9. https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=216.
14. “Rosatom” nachal stroit' unikal'nyi reaktor BREST v Tomskoi oblasti. URL: <https://ria.ru/20210608/energoblok-1736090576.html> (data obrashcheniya: 12.06.2021).
15. Safronov A.F., Goloskokov A.N. EROEI kak pokazatel' effektivnosti dobychi i proizvodstva energoresursov // Bureniye i nef't'. 2010. № 12/13. <https://burneft.ru/archive/issues/2010-12/13>.
16. Solodov N.A., Balashov L.S., Kremenetskii A.A. Geokhimiya litiya, rubidiya i tseziya. M.: Nedra, 1980. 233 s.
17. Spravochnik khimika (v 3 t.). Pod red. B.P. Nikol'skogo. L., M.: GNTI khim. lit-ry. T. 1. 1962. 1071 s.
18. Filippov S., Golodnitskii A., Kashin A. Toplivnye elementy i vodorodnaya energetika // Energeticheskaya politika 2020. № 11. S. 28–39. <https://energypolicy.ru>.
19. Shul'ginov N. G. Ne nado speshit' rasstavat'sya s uglevodorodami, nado naravne s traditsionnymi vidami energetiki razvivat' VIE // Energeticheskaya politika. 2021. № 5. S. 4–13. <https://energypolicy.ru>. Doi: 10.46920/2409-5516_2021_5159_4.
20. BP Statistical Review of World Energy 2021. 70th edition. 72 p.
21. BP Statistical Review of World Energy 2020. 69th edition. 68 p.
22. Hall C.A.S. Migration and metabolism in a temperate stream ecosystem // Ecology. 1972. V. 53. P. 585–604.
23. Murphy D.J., Hall C.A.S. Year in review EROI or energy return on (energy) invested // Ann. N. Y. Acad. Sci. 2010. V. 1185. P. 102–118. Doi: 10.1111/j.1749-6632.2009.05282.x.
24. Rana R.L., Lombardi M., Giungato P., Tricase C. Trends in Scientific Literature on Energy Return Ratio of Renewable Energy Sources for Supporting Policymakers // Adm. Sci. 2020. 10(2), 21. <https://doi.org/10.3390/admsci10020021>.
25. URL: <https://korea1.ru/vybor/akkumulyator-tesla-model-s-chto-vnutri-razbiraem-tyagovye-litii-ionnye-batarei-tesla-chto> (data obrashcheniya: 12.06.2021).
26. URL: <https://e-cars.tech/2020/11/04/akkumulyatory-elektromobilej-osobennosti-primeneniya/> (data obrashcheniya: 12.06.2021).

27. URL: https://auto.mail.ru/article/81117-v_ssha_tozhe_nachali_zapreshchat_avtomobili_s_dvs (data obrashcheniya: 12.06.2021).
28. URL: <https://www.popmech.ru/science/news-579664-vyasnilos-skolko-ptic-gibnet-ot-etro-generatorov> (data obrashcheniya: 12.06.2021).
29. URL: <https://zen.yandex.ru/media/energofiksik/krupneishie-solnechnye-elektrostantsii-v-mire-5d1769809865f000acee46ab> (data obrashcheniya: 12.06.2021).
30. URL: <https://fishki.net/3448225-krupnejshij-vetropark-ganysu-zamenjajuwij-soboj-desjatak-ajes.html> (data obrashcheniya: 12.06.2021).
31. URL: <https://nature-time.ru/2013/12/pererabotka-akkumulyatorov-i-batareek> (data obrashcheniya: 12.06.2021).
32. URL: <https://ru.co2.earth/daily-co2> (data obrashcheniya: 08.09.2021).
33. URL: <https://reaestate.ru/proizvodstvo-litiya-v-mire-mirovye-zapasy-litievyyh-resursov> (data obrashcheniya: 12.06.2021).
34. URL: <https://auto.vercity.ru/statistics/production/2021> (data obrashcheniya: 12.06.2021).
35. URL: <https://zen.yandex.ru/media/megastroyki/top10-krupneishih-alternativnyh-elektrostantsii-mira-5cbf5417ae4f3800b29a5c14> (data obrashcheniya: 12.06.2021).
36. URL: <https://efut.ru/a/135-tjagovye-akkumuljatory-dlja-jelektromobilej.html> (data obrashcheniya: 12.06.2021).
37. Tesla postroila krupneishuyu v mire litii-ionnuyu batareyu v Avstralii. URL: <https://www.ridus.ru/news/266068> (data obrashcheniya: 12.06.2021).
38. Three Gorges Dam. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Three_Gorges_Dam (data obrashcheniya: 12.06.2021).
39. What happens to all the old wind turbines? URL: <https://www.bbc.com/news/business-51325101> (data obrashcheniya: 12.06.2021).
40. World Energy Outlook 2020. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020> (data obrashcheniya: 12.06.2021).

Международному году пещер и карста посвящается

ОЦЕНКА НАУЧНО-ПРИКЛАДНОЙ ЗНАЧИМОСТИ КАРСТОВЫХ ПЕЩЕР ЮЖНОГО УРАЛА И ПРЕДУРАЛЬЯ

© 2021 г. Ю. В. Соколов^{а, *}, А. И. Смирнов^{а, **}

^а *Институт геологии УФИЦ РАН, Уфа, Россия*

^{*} *E-mail: sokolspeleo@mail.ru*

^{**} *E-mail: smalil@mail.ru*

Поступила в редакцию 28.06.2021 г.

После доработки 29.09.2021 г.

Принята к публикации 10.10.2021 г.

Наиболее эффективная мера охраны карстовых пещер – установление для наиболее ценных из них природоохранного статуса, регламентирующего порядок их посещения и использования. В связи с этим важной задачей сохранения пещер и их компонентов выступает определение их ценности на основании единых принципов оценки научно-прикладной значимости, максимально исключающих субъективизм. Представлена методика определения научно-прикладной значимости карстовых пещер, учитывающая частоту обычно и редко встречающихся компонентов пещерной среды в регионе по группам: геологических (карстующиеся породы и пещерные отложения), морфометрических, морфологических и рекреационных параметров, водопроводящих, криогенных и микроклиматических комплексов, биоспелеологических и мемориально-исторических компонентов. На основе балльной оценки ценности пещер может быть ранжирован природоохранный статус карстовых пещер региона: кадастровый учет, государственный памятник природы, заказник, компонент национального парка и заповедник.

Ключевые слова: карстовая пещера, методика балльной оценки, компоненты пещерной среды, природоохранный статус, геологический памятник природы

DOI: 10.31857/S0869607121060082

ВВЕДЕНИЕ

Карстовые пещеры представляют большую ценность как неповторимые памятники неживой природы, уникальные археологические памятники, подземные лаборатории, объекты туризма. Кроме того, с пещерами связано немало легенд, поверий и народных эпосов, дающих богатейший научный материал для этнографов.

Карстовые пещеры весьма уязвимы к внешним воздействиям, большинство их компонентов практически невозобновляемы, а вынос из них пещерных образований, палеонтологических и археологических находок “на память” влечет за собой безвозвратную их потерю. В связи с этим обеспечение сохранности пещер, как и других природных объектов – первостепенная задача, а наиболее действенным механизмом их охраны выступает присвоение наиболее ценным из них природоохранного статуса, регламентирующего порядок посещения пещер.

На 1 января 2021 г. в границах Республики Башкортостан (РБ), которая охватывает основную часть территории Южного Урала и Предуралья, с различной степенью детальности задокументировано 1145 карстовых пещер. Из них 24 пещеры имеют официальный охранный статус в качестве геологических, гидрогеологических или комплексных памятников природы. Около 100 значимых пещер расположено на территориях государственного природного заповедника “Шульган-Таш”, геопарка “Янган-Тай”, национального парка “Башкирия”, природных парков “Мурадымовское ущелье” и “Зилим” и природного заказника “Алтын Солок”.

Природоохранный статус большей части пещер РБ установлен в 1960-е гг. на основе обнаруженных в них палеонтологических и археологических находок, особенностей их морфологии и наличия редких пещерных образований.

За последние 60 лет количество обследованных в регионе карстовых пещер заметно возросло. Если к 1960 г. было известно около 100 пещер, то к 2021 г. их число достигло 1145, а суммарная протяженность обследованных пещерных ходов за это время увеличилась с 15 до 135 км. При этом часть вновь открытых пещер по компонентам пещерной среды и достопримечательностям намного превосходят пещеры, имеющие официальный охранный статус, и требуют охраны.

Наиболее эффективной мерой охраны пещер является установление для них природоохранного статуса, объективное определение которого возможно только на основе оценки ценности компонентов пещер по единым принципам и методике, исключая субъективизм.

Цель работы – оптимизация принципов и методов оценки научно-прикладной значимости карстовых пещер Южного Урала и Предуралья, определяющих их природоохранный статус и регламентирующий режим их посещения.

Исходными данными для исследования послужили собранные авторами сведения о карстовых пещерах рассматриваемого региона из опубликованных, фондовых и архивных источников, а также собственные многолетние исследования авторов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕЩЕР БАШКОРТОСТАНА И СТЕПЕНЬ ИХ ИЗУЧЕННОСТИ

Пещеры на территории Башкортостана известны с древних времен, они упоминаются в башкирском народном эпосе, а первые письменные сведения о них можно встретить в путевых заметках арабских купцов XIII в. Началом изучения пещер РБ считается исследование пещеры Шульган-Таш (Капова) 7 января 1760 г. (по старому стилю) статским советником П.И. Рычковым, которым она охарактеризована в статье “Описание пещеры находящейся в Оренбургской губернии при реке Белой” [12]. Таким образом, история изучения пещер рассматриваемого региона охватывает более 250 лет и ее подробная характеристика требует самостоятельной статьи, поэтому здесь отметим лишь основные этапы изучения пещер Башкортостана, каждый из которых подразделяется на отдельные периоды [16]:

1. Этап зарождения спелеологии (середина XVIII в.—конец 1950-х гг.).

Период академических экспедиций (середина XVIII в.—конец XIX в.). Первые описания пещер и первые попытки объяснения причин их образования.

Период попутных описаний пещер в ходе географо-геологического изучения Урала и Предуралья (конец XIX в.—первая четверть XX в.). Обследуются в основном хорошо известные местному населению пещеры, составляются их планы и разрезы.

Период попутных и специальных исследований пещер при геологическом изучении Башкирии, инженерно-геологических изысканиях, археологических и палеонтологических исследованиях на ее территории (начало 1930-х—конец 1950-х гг.). Выявлены основные условия и факторы образования и развития пещер. Составлены первые их сводные описания – как в целом по региону, так и по отдельным его частям.

2. Этап самостоятельного развития спелеологии (с 1960-х гг.).

Период интенсивного сбора информации по пещерам Башкирии (начало 1960-х—конец 1980-х гг.). Активный поиск и обследование пещер спелеологами-любителями, научными и производственными организациями. Первые аналитические обобщения по особенностям развития и распространению пещер. Специальные (археологические, биоспелеологические, инженерно-геологические др.) исследования в пещерах и систематизация информации по ним. Составление первого наиболее полного перечня пещер РБ.

Период систематизации, обобщения и анализа накопленного материала (с конца 1980-х гг.). Обобщение и анализ базируются на количественных показателях. Выполнены первые систематизированные сводки и обобщения на региональном уровне [8]. Продолжение поиска новых, переобследование и комплексные исследования ранее известных наиболее примечательных пещер.

Изученность пещер Башкортостана различна и каждый аспект пещерной среды заслуживает рассмотрения в отдельной статье. Для достижения поставленной цели кратко отметим лишь степень изученности основных компонентов пещерной среды.

На все известные в РБ пещеры составлены планы и разрезы с различной степенью детальности, имеются описания пещер. Следует особо подчеркнуть, что основная часть пещер региона обследована туристами-спелеологами городов Уфы, Стерлитамака, Салавата, Свердловска, Кунгура, Кумертау, Оренбурга и др., которыми произведена и их топосъемка.

Сведения по естественным пещерным отложениям региона в настоящее время представлены в основном описанием видов, форм и размеров пещерных образований, в 49 пещерах зафиксированы постоянные наледи [17]. В 45 пещерах археологами О.Н. Бадером, А.А. Коноваловым, В.Г. Котовым, И.Ф. Каюмовым и др. были выявлены следы пребывания древнего человека [3, 14].

В хорошо известных пещерах и гротах Южного Урала (Шульган-Таш, Киндерлинской им. 30-летия Победы, Аскынской, Байсланташ, Олимпия, Атыш и др.) В.Л. Яхимович, В.П. Суховым, А.Г. Яковлевым, П.А. Косинцевым, Д.О. Гимрановым и др. исследованы костные останки млекопитающих плейстоцен-голоценового возраста.

Спелеоотрядом ПГО (ОАО) “Башкиргеология” (В.А.Алексеев, С.В. Аввакумов, А.И. Смирнов и др.) в 130 карбонатных пещерах Южного Урала и в 10 гипсовых пещерах Предуралья был исследован радиационный фон и установлено, что в ряде ледяных пещер он достигает 32 мкР/ч при естественном радиационном фоне не более 10 мкР/ч [15].

Сведения о микроклимате пещер Южного Урала и Предуралья на сегодня ограничиваются в основном разовыми замерами температуры воздуха. В пещере Шульган-Таш ведутся мониторинговые наблюдения за микроклиматом пещерной среды с целью сохранения сохранившейся в ней палеолитической живописи. В части пещер (Аскынской, Киндерлинской им. 30-летия Победы и др.) аналогичные работы проводятся с целью определения динамики объема наледей в связи с их экскурсионным использованием [18, 21].

Биоспелеологические исследования в рассматриваемом регионе проводились Башкирским государственным университетом установлено присутствие в ряде пещер эндемичных форм животных – троглобионтных коллембол: *Plutomurus baschkiricus* (Skořikow, 1899) и *Schaefferia baschkirica* Kniss (1985) [5].

В Киндерлинской пещере проводились микробиологические исследования [7, 13] и изучались цианобактерии и водоросли, на которые опробована также и Аскынская пещера [1]. В результате установлено, что видовой состав цианобактерий и водорослей в них являются типичными, а характер распределения микроорганизмов в грунтах определяется особенностями конфигурации пещер и степенью их посещаемости.

Таким образом, из всех компонентов пещер Южного Урала и Предуралья относительно хорошо на сегодня изучены их морфология, морфометрия и горные породы, в которых сформировались подземные полости. Другие же компоненты пещерной среды исследованы лишь в отдельных пещерах региона.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В основу методики оценки научно-прикладной значимости карстовых пещер Южного Урала и Предуралья положены рекомендации по выявлению, учету, оформлению и организации охраны пещер и карстовых объектов в качестве государственных памятников природы [11]. Согласно этим рекомендациям, ценность пещеры предложено определять количественно по сумме баллов, зависящей от ценности каждого из ее компонентов. Обычно встречающиеся компоненты пещерной среды в карстовой стране, провинции, районе оцениваются в 1 балл, типичные, обычно встречающиеся – в 10 баллов, редко встречающиеся и уникальные – в 20 и 100 баллов соответственно. Естественно, чем выше сумма баллов, тем выше значимость пещеры и тем выше должен быть ее охранный статус. Балльная оценка значимости пещер относительно проста и максимально снижает субъективизм оценки ценности пещер конкретного спелеорайона, поскольку редкие спелеокомплексы для одного спелеорайона в другом районе могут быть вполне обычными.

Подобная методика балльной оценки применялась при определении научно-прикладной значимости карстовых пещер Пермского края [9], Самарской области [4], Крыма [2] и ряда других регионов.

Первая оценка ценности карстовых пещер Башкортостана на основе качественных характеристик выполнена в 1960 г. И.К. Кудряшовым для ста известных на то время пещер; из них к наиболее ценным было отнесено 38 пещер [6].

Первая балльная оценка научно-прикладной значимости карстовых пещер РБ по описанной выше методике была произведена авторами при характеристике пещер горной части Башкирии [16]. Из известных на то время (1993 г.) 502 карстовых пещер Южного Урала и Предуралья в границах РБ для 18 пещер был рекомендован режим охраны как компонентов заповедников и национальных парков, а для 23 пещер рекомендован статус геологических памятников природы [10].

В начале 2000-х гг. Ю.В. Соколовым и В.А. Книссом при участии В.Г. Котова и Г.А. Данукаловой произведена оценка научно-прикладной значимости карстовых пещер для пещер зоны затопления Юмагузинского водохранилища по уже апробированной методике, с дополнением перечня достопримечательностей. Установлено, что из около 229 обследованных пещер природоохранного статуса государственного памятника природы и выше заслуживают 32 пещеры [19].

В 2020 г. авторами по аналогичной методике была произведена оценка научно-прикладной значимости карстовых пещер создаваемого в РБ геопарка “Торатау”. В табл. 1 приведен фрагмент, поясняющий методику оценки научно-прикладной значимости карстовых пещер на примере хорошо известной Аскынской пещеры [18, 20] (рис. 1).

Установлено, что из 228 известных на территории геопарка карстовых пещер 32 пещеры заслуживают природоохранного статуса в качестве: геологических памятников природы (23 шт.), государственных памятников природы с заказным режимом или компонентов ландшафтного заказника (4 шт.), компонентов национального парка (4 шт.). Одна пещера – Киндерлинская им. 30-летия Победы – по своим морфометрическим и морфологическим параметрам, а также изученным компонентам пещерной среды соответствует памятнику природы федерального значения [20].

Таблица 1. Фрагмент таблицы балльной оценки научно-прикладной значимости пещер геопарка “Торатау” [20]**Table 1.** Fragment of the table of point rating of scientific and applied significance of the caves of the geopark “Toratau” [20]

Наименование пещеры	Краткая характеристика	№№ групп компонентов пещерной среды и параметров пещер и их значимость в баллах*								Σ баллов	Охранный статус: <u>существ./рекоменд.</u>
		1	2, 3	4	5	6	7	8	9		
Аскынская ледяная	2,0 км к ВЮВ от д. Солонцы. Средняя часть левого склона долины р. Каран-Юрт. Абс. отм. входа 270 м. Превышение – 60 м. L (длина) – 371 м, A (амплитуда) – 34 м, V (объем) – 51100 м ³ . Вмещающие породы – известняки (D ₃ f). Горизонтальная мешкообразная зальная. Пещерные отложения – наледь, глыбы, щебень, глина. Натечные образования – редкие натечно-капельные и натечно-покровные. Водопроявления – капеж, покровный лед, ледяные сталагмиты. Спелеофауна – троглофилы (летучие мыши), троглобионты (Schaefferia baschkirica). Археологические находки. Гос. памятник природы, дата утверждения 17.08.1695. Экскурсионный объект с 2017 г.	10	20	1	20	1	20	10	10	92	<u>Государственный памятник природы/компонент национального парка</u>

Примечание: *1. Группа геологических компонентов: 1.1. Карстующиеся породы; 1.2. Пещерные отложения: 1.2.1. Первичные – остатки карстующихся пород, 1.2.2. Вторичные: водно-механические, водно-хемогенные, органогенные новообразования. 2. Группа морфометрических параметров: протяженность, объем. 3. Группа морфологических компонентов: элементарные полости, пространственное положение элементарных полостей. 4. Группа водопроявлений. 5. Группа криогенных комплексов. 6. Группа микроклиматических комплексов. 7. Группа биоспелеологических компонентов (флора и фауна). 8. Группа рекреационных параметров (посещаемость, трудность прохождения). 9. Группа мемориально-исторических компонентов.

Таким образом, по территории Южного Урала и Предуралья в границах РБ накоплен относительно большой опыт балльной оценки научно-прикладной значимости карстовых пещер, апробированный в различных частях рассматриваемого региона.

На основе общепринятых классификаций компонентов пещерной среды Г.А. Максимовича, Д.С. Соколова, В.Н. Дублянского, В.Н. Андрейчука, Б.А. Вахрушева, Ю.С. Ляхницкого, Б.Р. Мавлюдова и др., а также собранного и систематизированного материала по всем известным на 2021 г. 1145 пещерам Башкортостана актуализирована ранее разработанная авторами методика балльной оценки научно-прикладной значимости карстовых пещер Южного Урала и Предуралья. Оцениваемые компоненты пещерной среды в соответствии со степенью современной их изученности приведены в табл. 2.

Пещеры с суммой баллов менее 10 обычны для рассматриваемого региона и не требуют принятия специальных мер охраны. Такие пещеры необходимо взять на кадастровый учет.

Пещеры с суммой баллов от 11 до 20 рекомендуется взять на особый кадастровый учет, поскольку они перспективны на обнаружение в них новых достопримечательно-

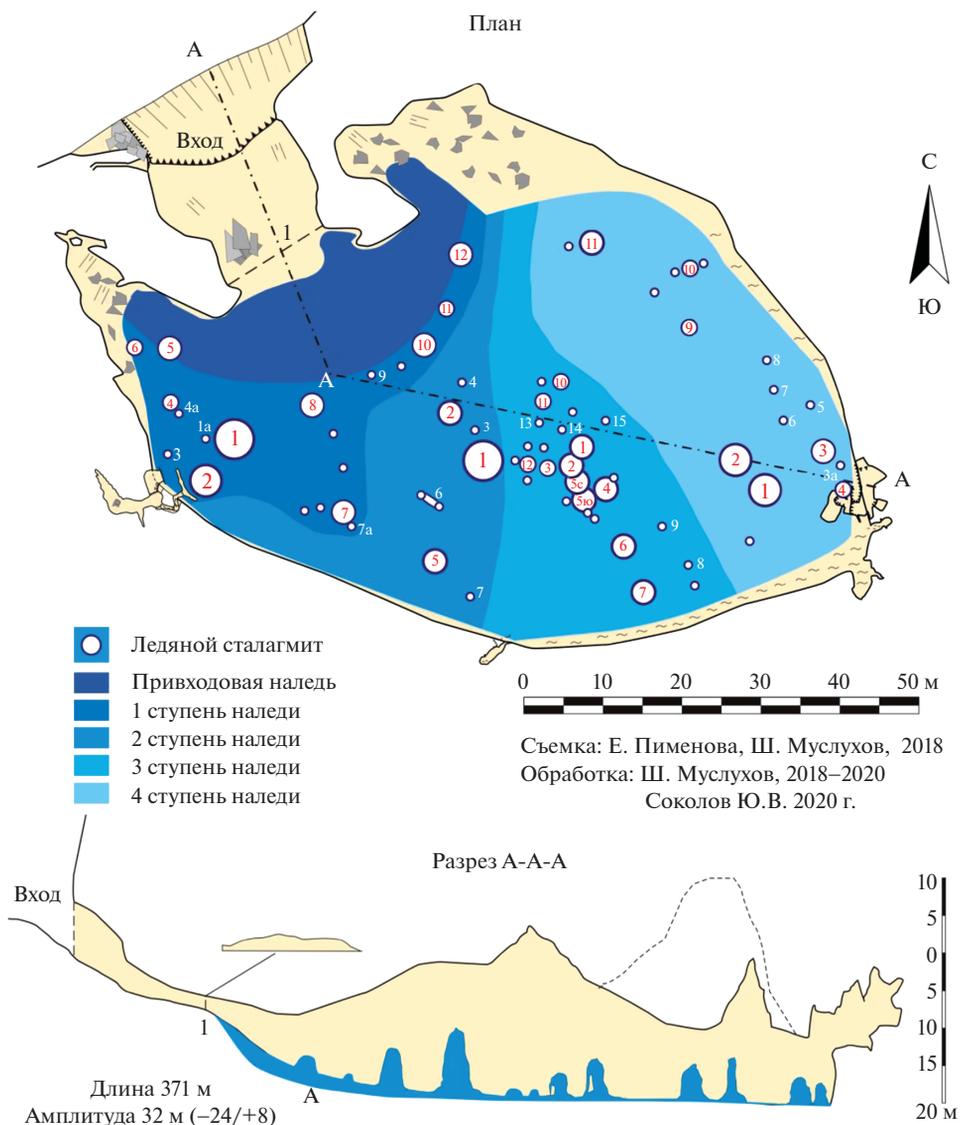


Рис. 1. План, разрез и поперечные сечения Аскынской ледяной пещеры [18].

Fig. 1. Plan, section and cross-sections of the Askyn ice cave [18].

стей, а, следовательно, могут получить более высокую сумму баллов ценности и претендовать в дальнейшем на более высокий природоохранный статус.

Пещеры с суммой баллов более 20 рекомендуется объявить государственными памятниками природы, при сумме баллов более 50 они должны иметь статус заказника, более 80 – статус компонента национального парка, а более 100 – заповедника.

При открытии новых пещер и обнаружении в уже известных пещерах новых редких компонентов необходима организация мероприятий по их обследованию и изучению специалистами соответствующего профиля. Отсюда вполне очевидна периодическая

Таблица 2. Компоненты пещерной среды Южного Урала и Предуралья и частота их встречаемости [по 16, 19, 20 с дополнениями и уточнениями]**Table 2.** Components of the cave environment of the Southern Urals and Cis-Urals and the frequency of their occurrence [16, 19, 20 with additions and corrections]

Группа компонентов и параметров	Повсеместно встречающиеся	Типичные, обычно встречающиеся	Редковстречающиеся	Уникальные (единично встречающиеся)
	Количество баллов			
	1	10	20	100
1. Группа геологических компонентов: 1.1. Карстующиеся породы:	Пещеры в одно-возрастных и литологически однородных карстующихся породах	Пещеры в разновозрастных карстующихся породах	Пещеры в литологически разнородных карстующихся породах	Пещеры в “нетрадиционных” карстующихся породах (мрамор, песчаник, известковый туф)
1.2. Пещерные отложения: 1.2.1. Первичные-остаточные: – нерастворимый остаток карстующихся пород	Глинистые налеты на стенах и в трещинах	Глинисты тонкие покровы на стенах и на полу толщиной до 1 см	Глинисты покровы на стенах и на полу толщиной до 20 см	Толщи остаточных глин мощностью более 20 см
Обвально-осыпные	Термо-гравитационные	Гравитационные	Провально-гравитационные	Сейсмо-гравитационные
1.2.2. Вторичные: – водно-механические	Озерные, сифонные, русловые современные	Сифонно-руслевые раннеголоценово-позднеплейстоценовые	Сифонно-руслевые среднеплейстоценовые	Сифонно-руслевые многослойные голоцен-плейстоценовые
– водно-хемогенные новообразования	Кальцитовая кора, мелкие, малочисленные сталактиты и сталагмиты	Сталактиты и сталагмиты, мелкие малочисленные гуры (кальцитовые плотины пещерных озер)	Сталактиты в гипсовых пещерах, крупные гуры, кораллиты, оолиты, пизолиты, пещерное (лунное) молоко, геликтиты	Гипсовые цветы, гидрогетит, исландский шпат
– органогенные	Отдельные кости млекопитающих.	Костяные брекчии	Покровы помета	Покровы гуано
2. Группа морфометрических параметров: протяженность,	< 100 м	100 – 1000 м	1 – 10 км	> 10 км
Объем	< 1 тыс. м ³	1 – 10 тыс. м ³	10-100 тыс. м ³	> 100 тыс. м ³
3. Группа морфологических компонентов: – элементарные полости	Лазы, ходы, трубы, камеры	Коридоры, колодцы, комнаты, гроты	Галереи, шахты, залы	Пропасти, залы объемом > 100 тыс. м ³
– пространственное положение элементарных полостей	Однонаправленные, извилистые	Ветвистые, сквозные	Решетчатые, сетчатые	Каркасные, ярусные
4. Группа водопроявлений	Слабый капез, конденсат, лужи воды	Интенсивный капез, родники, ручьи, озера	Реки, крупные озера, сифоны	Реки с расходом > 100 л/сек. Минеральные воды

Таблица 2. Окончание

Группа компонентов и параметров	Повсеместно встречающиеся	Типичные, обычно встречающиеся	Редковстречающиеся	Уникальные (единично встречающиеся)
	Количество баллов			
	1	10	20	100
5. Группа криогенных комплексов	Сезонные криогенные отложения	Постоянные криогенные отложения (снег, фирн)	Многолетние наледи	Крупные многолетние наледи
6. Группа микроклиматических комплексов	Статический воздухообмен	Динамический воздухообмен. Температурные аномалии. Акустические, оптические явления	Повышенный природный радиационный фон (>.4–15 мкР/час). Газовые аномалии	Высокий радиационный фон (>.30 мкР/час)
7. Группа биоспелеологических компонентов (флора и фауна)	Единичные троглоксены	Троглоксены, троглофилы. Следы пребывания зверей. Единичные летучие мыши	Троглофилы. Активные лежки и зимовки зверей, колонии летучих мышей	Троглобионты
8. Группа рекреационных параметров (посещаемость, трудность прохождения)	Малопосещаемые, неорганизованный туризм, 1 категория трудности	Часто посещаемые, коммерческий туризм, 2 категория трудности	Организованный спортивный туризм, 3 категория трудности	Туристско-экскурсионный комплекс, дайвинг
9. Группа мемориально-исторических компонентов	Единичные археологические находки. Исследования геологов и спелеологов XX–XXI вв.	Культурные отложения железного века. Исследования выдающихся ученых XIX в.	Культурные отложения бронзового века. Исследования выдающихся ученых XVIII в.	Культурные отложения каменного века. Упоминание и описания в эпических произведениях

переоценка научно-прикладной значимости пещер любого региона, которая находится в прямой зависимости от активности спелеологических исследований. Например, крымские спелеологи считают, что переоценка ценности пещер должна производиться каждые 5 лет [2].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая методика балльной оценки научно-прикладной значимости карстовых пещер Южного Урала и Предуралья доступна любому исследователю пещер и максимально снижает субъективизм в определении их ценности. Окончательную научно-прикладную значимость пещеры и определение ее природоохранного статуса должны производить эксперты, владеющие, с одной стороны, целостными системными знаниями о пещерах региона, с другой — обладающими данными о ценности конкретных (археологических, культурно-исторических, морфометрических и др.) компонентов пещер. В связи с этим, дальнейшие работы по изучению пещер Башкортостана должны быть направлены на их паспортизацию и публикацию в свободном доступе регулярно обновляющихся сведений о встречаемости редких компонентов пещерной среды региона по карстово-спелеологическим странам, провинциям и районам.

Следует особо подчеркнуть, что из всех элементов пещер рассматриваемого региона относительно хорошо изучены на сегодня их морфометрия и морфология; другие компоненты пещерной среды исследованы недостаточно. Дальнейшее изучение пещер региона может повысить ценность некоторых компонентов, что потребует переоценки их научно-прикладной значимости.

Предварительный анализ имеющейся информации по карстовым пещерам Южного Урала и Предуралья показывает, что количество пещер, обладающих высокой научно-практической значимостью, не менее чем в два раза превышает число зарегистрированных в официальном перечне пещер-памятников природы Башкортостана. Наибольшее их количество сосредоточено в Западно-Уральской карстово-спелеологической провинции, в которой не менее 100 пещер по установленной ценности своих компонентов заслуживают присвоения природоохранного статуса.

Исследование выполнено в рамках государственной бюджетной темы № 0246-2019-0118.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абдуллин Ш.Р.* Анализ влияния посещаемости людьми на распределение цианобактерий и водорослей в некоторых пещерах // Биоспелеологические исследования в России и сопредельных государствах: материалы II Всероссийской молодежной конференции/ИПЭЭ РАН им. А.Н. Северцова (г. Москва, 1–2 декабря 2016 г.). Ярославль: Филигрань, 2017. С. 5–9.
2. *Амеличев Г.Н.* Обоснование заповедного статуса карстовых полостей Республики Крым на основе оценки спелеоресурсного потенциала // Вопросы географии. Сб. 147. Спелеология и карстование. 2018. С. 363–387
3. Археологическая карта Башкирии / Отв. ред. О.Н. Бадер. М.: Наука, 1976. 262 с.
4. *Бортников М.П.* Балльная оценка пещер Самарской области // Спелеология Самарской области. Самара: Самарский областной центр детско-юношеского туризма и краеведения. 1998. С. 73–79.
5. *Книсс В.А.* Фауна пещер России и сопредельных стран. Уфа: Башкирский гос. университет, 2001. 238 с.
6. *Кудряшов И.К.* Карстовые пещеры Башкирии – ценные памятники неживой природы // Состояние и задачи охраны природы в Башкирии. Уфа: БФ АН СССР. 1960. С. 159–165.
7. *Кузьмина Л.Ю., Галимзянова Н.Ф., Абдуллин Ш.Р., Рябова А.С.* Микробиота пещеры Киндерлинская (Южный Урал) // Микробиология. 2012. Т. 81. № 2. С. 273–281.
8. *Мартин В.И., Смирнов А.И., Соколов Ю.В.* Пещеры Башкирии // Пещеры, итоги исследований. Пермь, 1993. С. 30–59.
9. *Пономарев А.Б.* Балльная оценка пещер Пермской области / Изучение Уральских пещер: докл. 2-й и 3-й конф. спелеологов Урала. Пермь, 1992. С. 14–16.
10. Реестр особо охраняемых природных территорий республиканского значения. Изд. 4, перераб. Уфа, 2020. 404 с
11. Рекомендации по выявлению, учету, оформлению и организации охраны пещер и карстовых объектов в качестве государственных памятников природы / В.М. Голод, Б.Р. Мавлюдов. М.: ВООП, 1984. 50 с.
12. *Рычков П.И.* Описание пещеры, находящейся в Оренбургской губернии при реке Белой // Ежемесячные сочинения и переводы к пользе и увеселению служащих. Т. 1, март. Оренбург, 1760. С. 195–220.
13. *Рябова А.С., Кузьмина Л.Ю., Галимзянова Н.Ф.* Микробиота грунта пещеры Аскынской (Южный Урал) // Изучение и использование естественных и искусственных подземных пространств и закарстованных территорий. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. 2018. С. 133–136.
14. Свод археологических памятников Республики Башкортостан выявленных в 1987–2000 гг. / Авт.-сост. Н.С. Савельев. Уфа: Информреклама, 2004. 184 с.
15. *Смирнов А.И.* Радиационная обстановка в пещерах Башкортостана. Государственная политика в сфере охраны окружающей среды. // Мат-лы науч.-практ. конф. Уфа, 2011. С. 234–236.
16. *Смирнов А.И., Соколов Ю.В.* Пещеры горной части Башкирии (Южный Урал). Уфа: Препр. БНЦ УрО РАН, 1993. 54 с.
17. *Соколов Ю.В.* Лед в пещерах Башкортостана // Биологическое разнообразие, спелеологические объекты и историко-культурное наследие охраняемых природных территорий Республики Башкортостан. Сборник научных трудов. Вып. 3. Уфа: Информреклама, 2008. С. 184–196.

18. Соколов Ю.В. Наледь в Аскынской ледяной пещере // Геологический вестник. 2020. № 3. С. 13–151.
19. Соколов Ю.В., Книси В.А. Пещеры зоны затопления Юмагузинского водохранилища // Экологические аспекты Юмагузинского водохранилища. Уфа: Гилем, 2002. С. 58–81.
20. Соколов Ю.В., Смирнов А.И. Оценка научно-прикладной значимости карстовых пещер геопарка “Торатау” (принципы и методы определения ценности) // Геологический вестник. 2020. № 1. С. 133–155.
21. Трофимова Е.В., Соколов Ю.В., Трофимов А.А. Лед в пещерах Аскинская и Киндерлинская: сравнительная характеристика // Изв. Русского геогр. о-ва. 2020. Т. 152. № 2. С. 70–74.

Assessment of scientific and applied significance of karst caves of Southern Urals and Cis-Urals

Yu. V. Sokolov¹, * and A.I. Smirnov¹, **

¹Institute of Geology UFRS RAS, Ufa, Russia

*E-mail: sokolspeleo@mail.ru

**E-mail: smalil@mail.ru

The most effective measure for the protection of karst caves is to establish a conservation status for the most valuable of them, which regulates the order of visits to caves and their use. In this regard, an important task of preserving caves and their components is to determine their value on the basis of uniform principles for assessing the scientific and applied significance, as much as possible excluding subjectivity. A method for determining the scientific and applied significance of karst caves is presented, taking into account the frequency of commonly and rarely found components of the cave environment in the region by groups: geological (karst rocks and cave deposits), morphometric, morphological and recreational parameters, water manifestations, cryogenic and microclimatic complexes, biotic and memorial-historical components. On the basis of a point rating of the value of the caves, the conservation status of the region's karst caves can be ranked: cadastral registration, a state natural monument, a nature sanctuary [*zakaznik*], a component of a national park and reserve.

Keywords: karst cave, point rating, components of the cave environment, nature conservation status, geological monument of nature

REFERENCES

1. Abdullin Sh.R. Analiz vliyaniya poseshhaemosti lyud'mi na raspredelenie cianobakterij i vodoroslej v nekotoryh peshherah // Biospeleologicheskie issledovaniya v Rossii i sopredel'nyh gosudarstvah: materialy II Vserossijskoj molodezhnoj konferencii/IPE'E' RAN im. A.N. Severczova (g. Moskva, 1–2 dekabrya 2016 g.). Yaroslavl': Filigran', 2017. S. 5–9.
2. Amelichev G.N. Obosnovanie zapovednogo statusa karstovyhpolostej Respubliki Krym na osnove ocenki speleoresursnogo potentsiala // Voprosy geografii. Sb. 147. Speleologiya i karstovedenie. 2018. S. 363–387
3. Arxeologicheskaya karta Bashkirii / Otv. red. O.N. Bader. M.: Nauka, 1976. 262 s.
4. Bortnikov M.P. Ball'naya ocenka peshher Samarskoj oblasti // Speleologiya Samarskoj oblasti. Samara: Samarskij oblastnoj centr detsko-yunosheskogo turizma i kraevedeniya. 1998. S. 73–79.
5. Kniss V.A. Fauna peshher Rossii i sopredel'nyh stran. Ufa: Bashkirskij gos. universitet, 2001. 238 s.
6. Kudryashov I.K. Karstovye peshhery Bashkirii – cennye pamyatniki nezhivoj prirody // Sostoyanie i zadachi ohrany prirody v Bashkirii. Ufa: BF AN SSSR. 1960. S. 159–165.
7. Kuz'mina L. Yu., Galimzyanova N. F., Abdullin Sh. R., Ryabova A. S. Mikrobiota peshhery Kinderlinskaya (Yuzhnyj Ural) // Mikrobiologiya. 2012. T. 81. № 2. S. 273–281.
8. Martin V.I., Smirnov A.I., Sokolov Yu.V. Peshhery Bashkirii // Peshhery, itogi issledovaniy. Perm', 1993. S. 30–59.
9. Ponomarev A.B. Ball'naya ocenka peshher Permskoj oblasti / Izuchenie Ural'skih peshher: dokl. 2-j i 3-j konf. speleologov Urala. Perm', 1992. S. 14–16.
10. Reestr osobo ohranyaemyh prirodnyh territorij respublikanskogo znacheniya. Izd. 4, pererab. Ufa, 2020. 404 s
11. Rekomendacii po vyyavleniyu, uchetu, oformleniyu i organizacii ohrany peshher i karstovyh ob'ektov v kachestve gosudarstvennyh pamyatnikov prirody / V.M. Golod, B.R. Mavlyudov. M.: VOOP, 1984. 50 s.

12. Rychkov P.I. Opisanie peshhery, nahodyashhejsya v Orenburgskoj gubernii pri reke Beloj // *Ezhemesyachnye sochineniya i perevody k pol'ze i uveseleniyu sluzhashhih*. T.1, mart. Orenburg, 1760. S. 195–220.
13. Ryabova A.S., Kuz'mina L.Yu., Galimzyanova N.F. Mikrobiota grunta peshhery Askynskaya (Yuzhnyj Ural) // *Izuchenie i ispol'zovanie estestvennyh i iskusstvennyh podzemnyh prostranstv i zakarstovannyh territorij*. Materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii. 2018. S. 133–136.
14. Svod arheologicheskikh pamyatnikov Respubliki Bashkortostan vyyavlennyh v 1987–2000 gg. / Avt.-sost. N.S. Savel'ev. Ufa: Informreklama, 2004. 184 s.
15. Smirnov A.I. Radiacionnaya obstanovka v peshherah Bashkortostana. Gosudarstvennaya politika v sfere ohrany okruzhayushhej sredy // *Mat-ly nauch.-prakt. konf.* Ufa, 2011. S. 234–236.
16. Smirnov A.I., Sokolov Yu.V. Peshhery gornoj chasti Bashkirii (Yuzhnyj Ural). Ufa: Prepr. BNCz UrO RAN, 1993. 54 s.
17. Sokolov Yu.V. Led v peshherah Bashkortostana // *Biologicheskoe raznoobrazie, speleologicheskie ob'ekty i istoriko-kul'turnoe nasledie ohranyaemyh prirodnyh territorij Respubliki Bashkortostan*. Sbornik nauchnyh trudov. Vyp. 3. Ufa: Informreklama, 2008. S. 184–196.
18. Sokolov Yu.V. Naled' v Askynskoj ledyanoj peshhere // *Geologicheskij vestnik*. 2020. № 3. S. 13–151.
19. Sokolov Yu.V., Kniss V.A. Peshhery zony zatopeniya Yumaguzinskogo vodohranilishha // *Ekologicheskie aspekty Yumaguzinskogo vodohranilishha*. Ufa: Gilem, 2002. S. 58–81.
20. Sokolov Yu.V., Smirnov A.I. Ocenka nauchno-prikladnoj znachimosti karstovyh peshher geoparka "Toratau" (principy i metody opredeleniya cennosti) // *Geologicheskij vestnik*. 2020. № 1. S. 133–155.
21. Trofimova E.V., Sokolov Yu.V., Trofimov A.A. Led v peshherah Askinskaya i Kinderlinskaya: sravnitel'naya harakteristika // *Izvestiya Russkogo geogr. o-va*. 2020. V. 152. № 2. S. 70–74.

НАТАЛЬЯ НАУМОВНА ДАВЫДОВА (К 90-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)

© 2021 г. Т. В. Сапелко^{a, *}, А. В. Лудикова^{a, **}, Д. А. Субетто^{b, ***}

^a Институт озёроведения РАН – СПб ФИЦ РАН, Санкт-Петербург, Россия

^b Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: tsapelko@mail.ru

**E-mail: ellerbeckia@yandex.ru

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

Поступила в редакцию 27.05.2021 г.

После доработки 26.06.2021 г.

Принята к публикации 29.06.2021 г.

Статья посвящена выдающемуся российскому палеолимнологу и диатомисту Наталье Наумовне Давыдовой (6.07.1931–23.07.2014) и открывает серию публикаций, подготовленных к ее 90-летию юбилею. Н.Н. Давыдова всю свою жизнь посвятила изучению истории озер. География озер, исследованных ею, включает регионы от Кольского полуострова до Средней Азии и от Балтики до Западной Сибири. Однако основными объектами ее исследований всегда оставались крупнейшие озера Европы – Ладожское, Онежское, Псковско-Чудское. Н.Н. Давыдова стояла у истоков Комплексной Ладожской экспедиции Лаборатории озероведения, основанной С.В. Калесником. Ею разработаны методы реконструкций этапов развития малых и больших озер на основе диатомового анализа, а также оценки природных и антропогенных факторов развития озер, определяющих скорость и направленность эволюции озерных экосистем.

Ключевые слова: Наталья Наумовна Давыдова, история озер, диатомовый анализ, донные отложения, антропогенные факторы, большие озера, малые озера, Ладога

DOI: 10.31857/S0869607121060069

В 2021 г. выдающемуся палеолимнологу, палеогеографу и альгологу Наталье Наумовне Давыдовой исполнилось бы 90 лет. Наталья Наумовна – крупнейший специалист в области диатомового анализа озерных отложений и реконструкций озерных экосистем в России и за ее пределами. Она была участником многочисленных российских и международных научных проектов, членом редколлегии ведущего международного журнала в области палеолимнологии “Journal of Paleolimnology”. При ее активном участии проводились международные конференции по истории озер. Н.Н. Давыдова проводила научные исследования и читала лекции в университетах Парижа, Лунда, Стокгольма и Лондона. Вся 50-летняя научная деятельность Натальи Наумовны связана с Институтом озероведения (ныне Российской академии наук). Она разработала методы реконструкций основных этапов развития озер и оценки природных и антропогенных факторов, определяющих скорость и направленность эволюции озерных экосистем на основе диатомового анализа; метод геоэкологического мониторинга озер и оценки антропогенного воздействия по интегральным индексам сапробности диатомовых комплексов. Наталья Наумовна – автор свыше 300 научных работ на русском

и английском языках. Монография Н.Н. Давыдовой “Диатомовые водоросли — индикаторы природных условий водоемов в голоцене” (1985) [9] — одна из самых значимых в области диатомового анализа, палеолимнологии и палеоэкологии.

Наталья Наумовна родилась 6 июля 1931 г. в Ленинграде в семье военнослужащего. Отец — моряк, капитан I ранга, мать — учительница. 16 июля 1941 г. ученицей 2 класса с матерью и братом Н.Н. была эвакуирована в Калининскую область, а затем — в г. Ульяновск, где продолжила учебу в школе. После снятия блокады в июне 1944 г. семья вернулась в Ленинград, где Н.Н. в 1949 г. окончила среднюю школу № 89 с серебряной медалью и поступила в Ленинградский государственный университет на географический факультет, который окончила в 1954 г. с отличием по специальности ботаническая география. Лекции по диатомовому анализу в студенческие годы она слушала у Валентины Сергеевны Шешуковой-Порецкой — одной из основательниц диатомологической школы в нашей стране. О своих студенческих годах (рис. 1), незабываемых полевых практиках и начале своего трудового пути сама Наталья Наумовна рассказывает в книге воспоминаний выпускников 1954 г. географического факультета ЛГУ, где ее рассказ опубликован под девичьей фамилией Дмитриева [15]. С озероведением Н.Н. Давыдова свою судьбу связала в 1954 г., когда она в качестве лаборанта приняла участие в экспедиции Лаборатории озероведения АН СССР. Это была ботаническая группа Аральской экспедиции по исследованию водной растительности дельты р. Амударьи под руководством В.М. Катанской. После этого Наталья Наумовна поступила в аспирантуру, где она начала специализироваться в области диатомового анализа донных отложений озер, а в октябре 1955 г. Н.Н. Давыдова становится сотрудником Лаборатории озероведения АН СССР. Наталья Наумовна работала в Лаборатории озероведения Академии наук СССР, позже трансформированной в Институт озероведения АН СССР, всю свою жизнь, начиная с должности старшего лаборанта и до ведущего научного сотрудника. Палеолимнологическое направление начало развиваться в Лаборатории озероведения, когда туда пришла работать Наталья Наумовна, а после преобразования Лаборатории в Институт озероведения в 1971 г. был организован Сектор палеолимнологии, который возглавил Герберт Генрихович Мартинсон [19]. Старшим научным сотрудником сектора со дня его образования стала Н.Н. Давыдова. В 1997 г. году, после смерти Г.Г. Мартинсона, научным руководителем группы палеолимнологии становится Наталья Наумовна. В эти годы она возглавляла палеолимнологические темы Института озероведения РАН, была руководителем и участником многочисленных научных проектов, в том числе международных.

В 1963 г. Н.Н. Давыдова успешно защитила кандидатскую диссертацию по теме “Диатомовые комплексы в современных осадках Ладожского озера”, в 1974 г. ей присвоено звание старшего научного сотрудника, а в 1985 г. она защитила докторскую диссертацию “Диатомовые водоросли донных отложений озер как показатель изменений озерных экосистем в поздне- и послеледниковое время”.

Н.Н. Давыдова стояла у истоков первых комплексных экспедиций на Ладожском озере. Работая в 1957–1962 гг. под руководством Николая Ивановича Семеновича в группе по изучению донных отложений Ладожского озера, Натальей Наумовной совместно с С.А. Абрамовой впервые была предпринята попытка биостратиграфического расчленения донных отложений Ладожского озера по данным спорово-пыльцевого и диатомового анализов [1, 3]. На основании 19 колонок донных отложений, изученных микропалеоботаническими методами, впервые было проведено описание диатомовых водорослей, доминирующих в позднеледниковье и в каждом из периодов голоцена. Кроме того, была выполнена фитогеографическая характеристика диатомовых водорослей донных отложений Ладожского озера. Выделены космополиты, североальпийские, бореальные и аркто-бореальные типы водорослей [4]. Изучением Ладожского



Рис. 1. Наталья Наумовна Давыдова в студенческие годы (1951 г.) [15].

Fig. 1. Natalya Naumovna Davydova in her student years (1951) [15].

озера Наталья Наумовна занималась и в последующие годы на протяжении всей своей научной деятельности. На основе исследования диатомовых комплексов донных отложений она изучала динамику экологического состояния озера. Для характеристики степени загрязнения и эвтрофирования различных участков акватории Ладожского озера Н.Н. Давыдовой впервые были применены интегральные индексы сапробности диатомовых комплексов в донных отложениях озера [7, 9, 12, 14]. В 1990-е гг. Н.Н. Давыдова участвует в совместных исследованиях Института озероведения РАН с университетом Йюэнсуу (Финляндия) и Институтом водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (Петрозаводск), целью которых была разработка методической основы мониторинговых исследований, в том числе и палеогеомониторинга [23]. На основе разработанных методик в рамках Ладожской комплексной экспедиции Института озероведения РАН стали проводить геоэкологический мониторинг по палеоолимонологическим данным [11], который продолжается и по сей день. Наталья Наумовна лично принимала участие в Ладожских экспедициях вплоть до 2000 г. (рис. 2), продолжая и в дальнейшем обрабатывать результаты и работать с материалами из Ладоги [12]. К 2006 г. под руководством Н.Н. Давыдовой подготовлен первый вариант коллективной монографии “Палеоолимонология Ладожского озера”, которая, как мы очень надеемся, все-таки будет издана.



Рис. 2. Н.Н. Давыдова и Д.А. Субетто на НИС “Талан” в экспедиции на Ладожском озере, 2000 г. Фото Т.В. Сапелко.

Fig. 2. N.N. Davydova and D.A. Subetto on board a research vessel “Talan” during an expedition on the Lake Ladoga in 2000. Photo by T.V. Sapelko.

Помимо Ладожского озера объектами исследований Н.Н. Давыдовой стали и другие крупнейшие озера гумидной зоны – Онежское и Псковско-Чудское, а также многочисленные малые озера Вологодско-Архангельского региона, Прибалтики, Кольского полуострова, Южного Урала, Западной Сибири. На Онежском озере она начинает работать в экспедиции Лаборатории озероведения в 1964–1967 гг. (рис. 3). С 1975 г. в рамках сотрудничества с эстонскими коллегами Наталья Наумовна работает на Псковско-Чудском озере [6, 10, 22, 24]. В составе Вологодско-Архангельской экспедиции Наталья Наумовна изучала диатомовые водоросли в донных отложениях озер Кубенское, Воже, Лача, Белое.

Важнейшими публикациями в области диатомового анализа и палеолимнологии до сих пор остаются написанные Н.Н. Давыдовой главы в монографиях “Большие озера Кольского полуострова” [2], “Онежское озеро. Экологические проблемы” [17] и др. Она была автором и редактором монографии “Палеолимнология Онежского озера” [18] и серии монографий “История озер” [16]. В 1991 и 1999 гг. за серию монографий “История озер” Н.Н. Давыдова была награждена дипломами Русского географического общества.

Приходилось Наталье Наумовне работать и на озерах аридной зоны – Балхаше, Зайсане, Иссык-Куле, озерах Казахстана (Боровое, Карасье, Щучье и Майбалык). Именно на Аральском море в 1954 г. состоялась первая экспедиция Давыдовой, после которой она была принята на работу в Лабораторию озероведения АН СССР. Впоследствии Наталья Наумовна была участником и организатором многочисленных палеолимнологических экспедиций. Она впервые выполнила диатомовый анализ колонок донных отложений Балтийского моря, озер Ладожского, Онежского, Балхаш и Иссык-Куль.

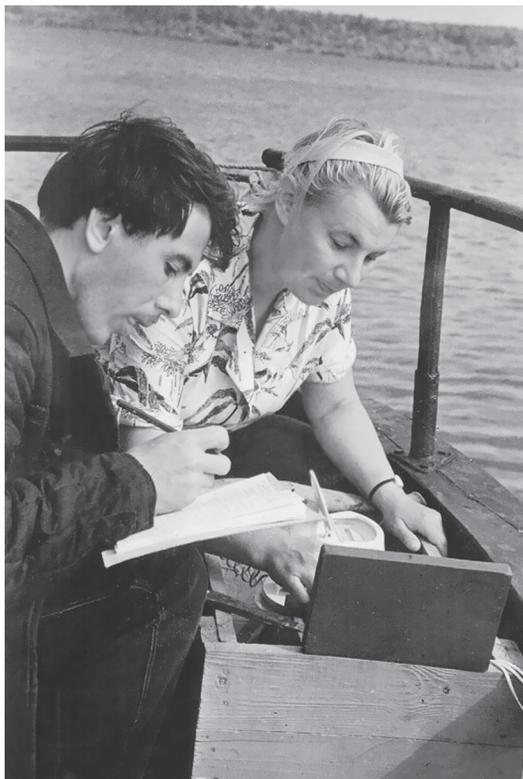


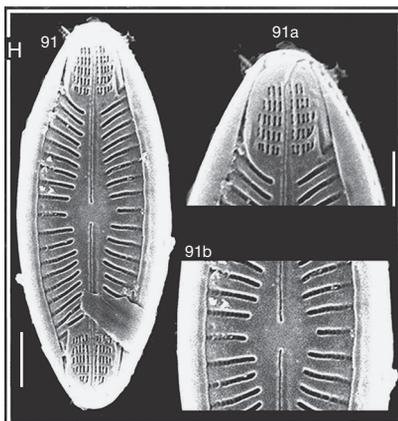
Рис. 3. Н.Н. Давыдова и Л.К. Егоров определяют элементы солнечного радиационного баланса на актинометрической установке на НИС “Академик Курнаков” в экспедиции на Онежском озере в 1966 г. Фото из семейного архива.

Fig. 3. N.N. Davydova and L.K. Egorov measure the elements of the solar radiation balance by the actinometric device on board a research vessel “Akademik Kurnakov” during an expedition on the Lake Onega in 1966. Photo from the family archive.

Весомая часть исследований Н.Н. Давыдовой посвящена проблемам антропогенного воздействия на озерные экосистемы. Натальей Наумовной разработаны методы изучения процессов эвтрофирования и антропогенного воздействия на крупные водоемы (Ладожское и Онежское озера) по материалам диатомового анализа донных отложений озер [5, 20, 8].

Под руководством Н.Н. Давыдовой защищены 4 кандидатские диссертации: Б.П. Власова, Т.С. Шелеховой, Л.А. Пестряковой и А.В. Лудиковой. Все эти исследователи успешно работают в области палеолимнологии и диатомового анализа.

Наталья Наумовна была активным членом Русского географического общества, много лет возглавляла Палеолимнологическую комиссию РГО. Палеолимнологическая комиссия была организована на основании решения IV Всесоюзного симпозиума по истории озер, проведенного Институтом озероведения АН СССР и Географическим обществом в 1975 г. Большой интерес к комиссии проявили специалисты разных научных направлений. Первым председателем комиссии стал Г.Г. Мартинсон. Позже, с 1997 по 2004 г. комиссию возглавляла Н.Н. Давыдова. В 1971 г. она принимала актив-



***Grachevia davydovae* Bukht. et Pomazk. sp. nov.**

(L.N.Bukhtiyarova and G.V.Pomazkina 2013. Bacillariophyta of lake Baikal. Vol. 1)

Рис. 4. Новый вид диатомовых водорослей *Grachevia davydovae*, названный в честь Н.Н. Давыдовой [21].

Fig. 4. The novel species of diatom *Grachevia davydovae* named after N.N. Davydova [21].

ное участие в подготовке и проведении XVIII Международного Лимнологического конгресса в Ленинграде под руководством директора Института озероведения АН СССР академика С.В. Калесника.

В 2013 г. диатомисты Л.Н. Бухтиярова из Киева и Г.В. Помазкина из Лимнологического института РАН (Иркутск) описали новый вид диатомовых водорослей *Grachevia davydovae* [21] и назвали его в честь Натальи Наумовны Давыдовой (рис. 4).

Наталья Наумовна осталась навсегда в нашей памяти не только прекрасным специалистом, научившим нас очень многим профессиональным навыкам и знаниям, но и душевным отзывчивым человеком. Группа палеолимнологии Института озероведения РАН и сейчас продолжает исследования, начатые нашим учителем Н.Н. Давыдовой.

БИБЛИОГРАФИЯ ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ Н.Н. ДАВЫДОВОЙ

1. Давыдова Н.Н. Опыт районирования поверхностных донных осадков Ладожского озера по составу диатомового комплекса // Изв. ВГО. 1961. Т. 93. Вып. 3. С. 221–228.
2. Давыдова Н.Н. К характеристике диатомовых водорослей донных отложений Ладожского озера // Ботанический журн. 1961. Т. XLVI. С. 722–726.
3. Абрамова С.А., Давыдова Н.Н. К палеолимнологии Ладожского озера // Изв. ВГО. 1966. Т. 98. Вып. 1. С. 19–25.
4. Абрамова С.А., Давыдова Н.Н., Квасов Д.Д. История Ладожского озера в голоцене по данным спорово-пыльцевого и диатомового анализов // История озер Северо-Запада. Материалы I Симпозиума по истории озер северо-запада СССР Л.: Геогр. об-во СССР, 1967. С. 113–132.
5. Абрамова С.А., Давыдова Н.Н., Квасов Д.Д. О восточных пределах распространения пребореального Иольдиева моря // Baltica. 1967. V. 3. P. 11–20.
6. Вишневецкая Е.М., Давыдова Н.Н. История озера Красного (Карельский перешеек) по данным диатомового анализа // История озер Северо-Запада. Материалы I

Симпозиума по истории озер северо-запада СССР. Л.: Геогр. об-во СССР, 1967. С. 161–185.

7. Давыдова Н.Н., Петрова Н.А. Опыт исследования водорослей планктона и донных отложений Ладожского озера с применением люминесцентного анализа // Ботанический журн. 1967. Т. 52. № 1. С. 86–91.

8. Давыдова Н.Н. Диатомовая флора голоценовых отложений Ладожского озера // Ископаемые диатомовые водоросли СССР. М.: Наука, 1968. С. 97–102.

9. Давыдова Н.Н. Состав и условия формирования диатомовых комплексов в поверхностном слое донных отложений Ладожского озера // Растительные ресурсы Ладожского озера. Л.: Наука, 1968. С. 131–174.

10. Квасов Д.Д., Кабанова И.П., Давыдова Н.Н. Основные вопросы позднеледниковой истории восточной Балтики // Baltica. 1970. V. 4. P. 65–90.

11. Давыдова Н.Н. Диатомовые водоросли в поверхностном слое донных отложений Онежского озера // Растительный мир Онежского озера. Л.: Наука, 1971. С. 140–166.

12. Давыдова Н.Н. Диатомеи позднего плейстоцена и голоцена: озерные диатомеи // Диатомовые водоросли СССР. Ископаемые и современные. Т. 1. Л.: Наука, 1974. С. 259–268.

13. Давыдова Н.Н. Диатомовая флора голоценовых отложений Онежского озера // Проблемы исследования древних озер Евразии. Л.: Наука, 1974. С. 98–124.

14. Блажчишин А.И., Давыдова Н.Н., Квасов Д.Д., Хомутова В.И. Спорово-пыльцевой и диатомовый анализ четырех колонок донных отложений южной и центральной Балтики // Baltica. 1974. V. 5. P. 119–126.

15. Давыдова Н.Н. Диатомеи в донных отложениях (Сейдозеро) // Большие озера Кольского полуострова. Л.: Наука, 1975. С. 250–254.

16. Давыдова Н.Н. Комплексы диатомей в донных отложениях Онежского озера // Палеолимнология Онежского озера. Л.: Наука, 1976. С. 130–191.

17. Давыдова Н.Н. Процессы седиментации диатомей и формирование диатомовых комплексов в донных отложениях озера Кубенского // Озеро Кубенское. Л.: Наука, 1977. Ч. 2. С. 151–191.

18. Давыдова Н.Н. Формирование диатомовых комплексов в донных отложениях озер Воже и Лача // Гидробиология озер Воже и Лача. Л.: Наука, 1978. С. 221–235.

19. Давыдова Н.Н. Диатомовые водоросли в донных отложениях озер. // Ландшафтный фактор в формировании гидрологии озер Южного Урала. Л.: Наука, 1978. С. 228–237

20. Давыдова Н.Н. О новом аспекте в палеолимнологии // Исследования озер СССР. Иркутск, 1979. С. 9–12.

21. Давыдова Н.Н., Трифонова И.С. Диатомеи планктона и донных отложений и содержание хлорофилла в осадках двух разнотипных озер Карельского перешейка // Ботанический журн. 1979. Т. 64. № 8. С. 1174–1183.

22. Давыдова Н.Н., Трифонова И.С. Диатомовые водоросли в планктоне и донных отложениях как показатель эвтрофирования // Эвтрофирование мезотрофного озера. Л.: Наука, 1980. С. 115–122.

23. Давыдова Н.Н. Диатомовые водоросли в донных отложениях // Антропогенное влияние на крупные озера Северо-Запада СССР. Ч. 2. Гидробиология и донные отложения озера Белого. Л.: Наука, 1981. С. 162–175.

24. Давыдова Н.Н., Курочкина А.А. Сравнительная характеристика донных отложений и диатомовых комплексов в осадках крупных озер Вологодско-Архангельского региона // Антропогенное влияние на крупные озера Северо-Запада СССР. Л., 1981. С. 176–185.

25. Давыдова Н.Н. Диатомовые водоросли в поверхностном слое донных отложений Псковско-Чудского озера // Донные отложения Псковско-Чудского озера. Таллин, 1981. С. 56–73.

26. Давыдова Н.Н. Диатомеи в голоценовых отложениях одного из озер юго-восточной Латвии // Систематика, эволюция, экология водорослей и их значение в практике геологических исследований. Киев, 1981. С. 111–113.

27. Давыдова Н.Н., Курочкина А.А., Стравинская Е.А., Трифонова И.С. Процессы эвтрофирования в Ладожском озере по материалам изучения донных отложений // Палеоолимологический подход к изучению антропогенного воздействия на озера. Л., 1981. С. 5–13.

28. Трифонова И.С., Давыдова Н.Н. Изучение поверхностного слоя донных отложений оз. Красного как метод выявления процессов эвтрофирования // Палеоолимологический подход к изучению антропогенного воздействия на озера. Л.: ГО СССР, 1981. С. 15–20.

29. Давыдова Н.Н. Изучение процесса эвтрофирования по показателям сапробности, вычисленным для диатомовых комплексов поверхностного слоя донных отложений // Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера. Л.: Наука, 1982. С. 206–209.

30. Давыдова Н.Н. Диатомовые водоросли из колонки донных осадков Сестрорецкого Разлива // Сохранение природной экосистемы водоема в урбанизированном ландшафте / Под ред. Е.А. Стравинской. Л.: Наука, 1984. С. 107–112.

31. Давыдова Н.Н. Диатомовые водоросли – индикаторы природных условий водоемов голоцена. Л.: Наука: Ленингр. отд-ние, 1985. 224 с.

32. Власов Б.П., Давыдова Н.Н., Дружинин Г.В., Субетто Д.А. Отбор образцов донных отложений // История озер СССР. Общие закономерности возникновения и развития озер. Методы изучения истории озер. Л.: Наука, 1986. С. 73–84.

33. Давыдова Н.Н., Квасов Д.Д., Краснов И.И. Изучение микрослоистости осадков // История озер СССР. Общие закономерности возникновения и развития озер. Методы изучения истории озер. Л.: Наука, 1986. С. 104–106.

34. Давыдова Н.Н. Диатомовые водоросли // История озер СССР. Общие закономерности возникновения и развития озер. Методы изучения истории озер. Л.: Наука, 1986. С. 135–143.

35. Давыдова Н.Н., Якушко О.Ф. Донные отложения озер как показатель антропогенного воздействия // История озер СССР. Общие закономерности возникновения и развития озер. Методы изучения истории озер. Л.: Наука, 1986. С. 205–212.

36. Давыдова Н.Н. Изменения экологических условий в озере по данным диатомового анализа (Ладожское озеро) // История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки. Л.: Наука, 1990. С. 53–61.

37. Давыдова Н.Н. Изменения экологических условий в озере по данным диатомового анализа (Онежское озеро) // История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки. Л.: Наука, 1990. С. 96–106.

38. Давыдова Н.Н. Эволюция диатомовой флоры (Псковско-Чудское озеро) // История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки. Л.: Наука, 1990. С. 148–150.

39. Давыдова Н.Н. Озеро Иссык-Куль. Диатомовые водоросли в донных отложениях озера // История озер СССР. История озер Севан, Иссык-Куль, Балхаш, Зайсан и Арал. Л.: Наука, 1991. С. 103–108.

40. Давыдова Н.Н. Озеро Балхаш. Диатомовые водоросли в донных отложениях. // История озер СССР. История озер Севан, Иссык-Куль, Балхаш, Зайсан и Арал. Л.: Наука, 1991. С. 145–152.

41. Давыдова Н.Н. Озеро Зайсан. Диатомовые водоросли в донных отложениях. // История озер СССР. История озер Севан, Иссык-Куль, Балхаш, Зайсан и Арал. Л.: Наука, 1991. С. 208–212.
42. Субетто Д.А., Давыдова Н.Н., Хомутова В.И. Палеолимнология озер Вишневского и Мичуринского (Карельский перешеек) // Антропогенные изменения экосистем малых озер. Кн. 2. Л.: Гидрометеиздат, 1991. С. 195–198.
43. Давыдова Н.Н., Квасов Д.Д., Раукас А.В., Сарсе Л.А. Проблемы палеолимнологического районирования Восточно-Европейской равнины // История озер Восточно-Европейской равнины. СПб.: Наука, 1992. С. 12–19.
44. Давыдова Н.Н., Субетто Д.А., Хомутова В.И. Озеро Ильмень // История озер Восточно-Европейской равнины. СПб.: Наука, 1992. С. 101–117.
45. Давыдова Н.Н., Делюсина И.В., Рыбалко А.Е., Спиридонов М.А., Субетто Д.А., Хомутова В.И. Донные отложения Ладожского озера и его эволюция в позднем плейстоцене – голоцене // Эволюция природных обстановок и современное состояние геосистемы Ладожского озера / Под Н.Н. Давыдовой, Б.И. Кошечкина. СПб.: РАН. РГО, 1993. С. 14–24.
46. Хомутова В.И., Андреева М.А., Давыдова Н.Н., Неуструева И.Ю., Пушенко М.Я., Радаева В.Ю., Субетто Д.А. Южный Урал. Озеро Увильды // История озер. История озер севера Азии. СПб.: Наука, 1995. С. 22–40.
47. Субетто Д.А., Арсланов Х.А., Давыдова Н.Н., Пушенко М.Я., Хомутова В.И. Озеро Ямылимуягант долины р. Пура // История озер. История озер севера Азии. СПб.: Наука, 1995. С. 46–51.
48. Давыдова Н.Н., Бердовская Г.Н., Неуструева И.Ю., Пушенко М.Я., Субетто Д.А. Озера заповедника “Боровое” // История озер. История озер севера Азии. СПб.: Наука, 1995. С. 143–175.
49. Арсланов Х.А., Гей Н.А., Давыдова Н.Н., Джиноридзе Р.Н., Кошечкин Б.И., Пушенко М.Я., Рыбалко А.Е., Спиридонов М.А., Субетто Д.А., Хомутова В.И. Новые данные по позднеплейстоценовой и голоценовой истории Ладожского озера // Изв. РГО. 1996. Т. 128. Вып. 2. С. 12–21.
50. Давыдова Н.Н., Субетто Д.А., Кукконен М., Симола Х. Антропогенное воздействие на геосистему Ладожского озера по материалам многолетнего мониторинга донных отложений // Изв. РГО. 1997. Т. 129. Вып. 6. С. 48–58.
51. Давыдова Н.Н., Рыбалко А.Е. Позднеледниковый этап развития Балтийского моря // История плейстоценовых озер Восточно-Европейской равнины. СПб.: Наука, 1998. С. 121–129.
52. Давыдова Н.Н., Рыбалко А.Е., Субетто Д.А., Хомутова В.И. Позднеплейстоценовая история Ладожского озера // История плейстоценовых озер Восточно-Европейской равнины. СПб.: Наука, 1998. С. 134–140.
53. Давыдова Н.Н., Хомутова В.И., Демидов И.Н. Позднеплейстоценовая история Онежского озера // История плейстоценовых озер Восточно-Европейской равнины. СПб.: Наука, 1998. С. 147–162.
54. Давыдова Н.Н. Характер и этапы формирования Онежской котловины // Онежское озеро. Экологические проблемы. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. С. 109–120.
55. Давыдова Н.Н., Субетто Д.А. Геоэкологический мониторинг Ладожского озера по палеолимнологическим данным // Ладожское озеро. Петрозаводск, 2000. С. 66–75.
56. Субетто Д.А., Давыдова Н.Н., Вастергорд, Б. Вольфарт, Т.В. Сапелко. Первые находки вулканического пепла (12000 кал. л. н.) в озерных отложениях Карельского перешейка, СЗ России // Изв. РГО. 2001. Т. 133, вып. 3. С. 69–76.

57. Давыдова Н.Н. Развитие экосистемы озера в позднее- и послеледниковье по составу диатомовых комплексов донных отложений // Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее. СПб.: Наука, 2002. С. 157–164.
58. Давыдова Н.Н. Зоны загрязнения озера по составу диатомовых водорослей // Атлас “Ладожское озеро” / Под ред. В. А. Румянцева. СПб., 2002. С. 122–123.
59. Давыдова Н.Н., Хомутова В.И. Геоэкологическая индикация природных и антропогенных процессов в эволюции Ладожского озера и озер его бассейна // Прикладная лимнология. Лимнологическое и геоморфологическое обеспечение рационального природопользования. Сб. науч. статей. Минск, 2002. Вып. 3. С. 117–123.
60. Субетто Д.А., Давыдова Н.Н., Сапелко Т.В., Вольфарт Б., Вастегорд С. Палеоклимат на Карельском перешейке на рубеже позднего плейстоцена и голоцена по данным изучения донных отложений оз. Медведского // Изв. РГО. 2002. Т. 134. Вып. 1. С. 47–64.
61. Субетто Д.А., Давыдова Н.Н., Сапелко Т.В., Вольфарт Б., Вастегорд С., Кузнецов Д.Д. Климат северо-запада России на рубеже плейстоцена и голоцена // Изв. РАН. Сер. географическая. 2003. № 5. С. 80–91.
62. Лудикова А.В., Субетто Д.А., Давыдова Н.Н., Сапелко Т.В., Арсланов Х.А. Колебания уровня Ладожского озера в голоцене (на основе палеолимнологических исследований оз. Святого Сергия на о. Путсаари) // Изв. РГО. 2005. Т. 137. Вып. 6. С. 34–41.
63. Павлова Е.Ю., Дорожкина М.В., Давыдова Н.Н. История развития озерного водоема верхнепонойской депрессии (Кольский полуостров) в среднем-позднем голоцене // Экологическое состояние континентальных водоемов северных территорий. Труды межд. конференции. СПб.: Наука, 2005. С. 169–178.
64. Сапелко Т.В., Субетто Д.А., Давыдова Н.Н., Севастьянов Д.В. Эволюция экосистемы оз. Кенозера на протяжении голоцена // Экологическое состояние континентальных водоемов северных территорий. Труды межд. конференции. СПб.: Наука, 2005. С. 193–199.
65. Субетто Д.А., Сапелко Т.В., Севастьянов Д.В., Давыдова Н.Н. Изменение природных условий на рубеже плейстоцена и голоцена – скачкообразное или эволюционное? // Труды XII съезда Русского географического общества. СПб., 2005. Т. 2. С. 156–161.
66. Александровский А.Л., Арсланов Х.А., Давыдова Н.Н., Долуханов П.М., Зайцева Г.И., Кирпичников А.Н., Кузнецов Д.Д., Лавенто М., Лудикова А.В., Носов Е.Н., Савельева Л.А., Сапелко Т.В., Субетто Д.А. Новые данные относительно трансгрессии Ладожского озера, образования реки Невы и земледельческого освоения Северо-Запада России // Доклады Академии наук. 2009. Т. 424. № 5. С. 682–687.
67. Давыдова Н.Н., Субетто Д.А., Сапелко Т.В. Зоны загрязнения озера по суммарным индексам сапробности комплексов диатомовых водорослей в донных отложениях озера // Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас. СПб., 2015. С. 141.
68. Davydova N.N. Postglacial history of lakes Ladoga and Onega according to diatom analysis of bottom sediments // Mitteilung. Internationalen Vereinigung Limnologie. 1969. V. 17. P. 371–378.
69. Davydova N.N., Kurochkina A.A. Late-glacial and Postglacial paleolimnology of Lake Onega // Paleolimnology of Lake Biva and the Japanese Pleistocene. 1975. V. 3. P. 409–415.
70. Davydova N.N., Kurochkina A.A., Trifonova I. S. Recent history of Lake Ladoga // Hydrobiologia. 1983. V. 103. P. 261–263.
71. Davydova N.N., Subetto D.A. Sediment sequence of Lake Ladoga // Palaeohydrology of the temperate zone. V. 2. Tallinn: Valgus, 1987. P. 62–71.

72. Davydova N.N. Ladoga Lake ecosystem during Late Glacial and Holocene and its present state (according to botanical data) // Itä Suomen. Saimaan tutkimus. Joensuu, 1990. P. 85–94.
73. Davydova N.N., Kalmykov M., Sandman O., Ollikainen M., Simola H. Recent paleolimnology of Kondopoga Bay, Lake Onega, reflecting pollution by a large pulp mill // Verhandlungen des Internationalen Vereinigung Limnologie. 1993. V. 25. P. 1086–1090.
74. Davydova N., Simola H., Subetto D. Pushenko M., Vasiljeva E., Krylenkova N., Scherbak V. Bottom sediments and diatoms as indicators of the present state of the Lake Ladoga ecosystem // Publications of Karelian Institute. 1994. V. 111. P. 144–156.
75. Davydova N.N., Servant–Vildary S. Late Pleistocene and Holocene history of the lakes in the Kola Peninsula, Karelia and the North-Western part of the East European Plain // Quaternary Science Reviews. 1996. V. 15. P. 997–1012.
76. Davydova N.N., Arslanov Kh.A., Khomutova V.I., Krasnov I.I., Malakhovky D.B., Saarnisto M., Saksä A.I., Subetto D.A. Late and postglacial history of lakes of the Karelian Isthmus // Hydrobiologia. 1996. V. 322. P. 199–204.
77. Davydova N.N., Subetto D.A., Khomutova V.I., Pushenko M.Ya. Palaeohydrological and palaeoclimatic changes recorded at lakes Krasnoye and Mentilampi, Karelian Isthmus, Russia // Palaeohydrology as reflected in lake level changes as climatic evidence for Holocene times. Palaeoclimate research. 1998. V. 25, Issue 17. P. 19–35.
78. Subetto D., Davydova N., Rybalko A. Contribution to the lithostratigraphy and history of Lake Ladoga // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 1998. V. 140. P. 113–119.
79. Davydova N. Flora in the surficial layer. Diatoms // Lake Peipsi. Geology / Ed. by A. Miidel, A. Raukas. Tallinn: Sulemees, 1999. P. 67–79.
80. Davydova N.N., Kukkonen M., Simola H., Subetto D. Human impact on Lake Ladoga as indicated by long-term changes of sedimentary diatom assemblages // Boreal Environmental Research. 1999. V. 4. P. 269–275.
81. Davydova N., Subetto D., Belkina N., Simola H., Kukkonen M. Palaeolimnology and sediments of Lake Ladoga: monitoring programme proposal // Environmental monitoring in Lake Ladoga. Proposal for a monitoring programme. Karelian Institute. Working Papers. 2000. P. 68–75.
82. Davydova N.N., Subetto D.A., Khomutova V.I., Sapelko T.V. Late Pleistocene-Holocene paleolimnology of three North-Western Russian lakes // J. Paleolimnology. 2001. V. 26. № 1. P. 37–51.
83. Subetto D.A., Wohlarth B., Davydova N.N., Sapelko T.V., Bjorkman L., Solovieva N., Wastegord S., Possnert G., Khomutova V. Climate and environment on the Karelian Isthmus, northwestern Russia, 13000–9000 cal yrs BP // Boreas. 2002. V. 31. P. 1–19.
84. Sandgren P., Subetto D.A., Berglund B.E., Davydova N.N., Savelieva L.A. Mid-Holocene Littorina Sea transgressions based on stratigraphic studies in coastal lakes of NW Russia. GFF. 2004. V. 126. P. 363–380.
85. Punning J.M., Kapanen G., Hang, T., Davydova N., Kangur M. Changes in the water level of Lake Peipsi and their reflection in a sediment core // Hydrobiologia. 2008. V. 599. P. 97–104.
86. Dolukhanov P.M., Subetto D.A., Arslanov Kh.A., Davydova N.N., Zaitseva G.I., Djinoridze E.N., Kuznetsov D.D., Ludikova A.V., Sapelko T.V., Savelieva L.A. The Baltic Sea and Ladoga Lake transgressions and early human migrations in North-western Russia // Quaternary International. 2009. V. 203. Iss. 1–2. P. 33–51.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамова С.А., Давыдова Н.Н.* К палеолимнологии Ладожского озера // Изв. ВГО. 1966. Т. 98. Вып. 1. С. 19–25.
2. Большие озера Кольского полуострова. Л.: Наука, 1975. С. 250–254.
3. *Давыдова Н.Н.* Опыт районирования поверхностных донных осадков Ладожского озера по составу диатомового комплекса // Изв. ВГО. 1961. Т. 93. Вып. 3. С. 221–228.
4. *Давыдова Н.Н.* Диатомовая флора голоценовых отложений Ладожского озера // Ископаемые диатомовые водоросли СССР. М.: Наука, 1968. С. 97–102.
5. *Давыдова Н.Н., Трифонова И.С.* Диатомовые водоросли в планктоне и донных отложениях как показатель эвтрофирования // Эвтрофирование мезотрофного озера. Л.: Наука, 1980. С. 115–122.
6. *Давыдова Н.Н.* Диатомовые водоросли в поверхностном слое донных отложений Псковско-Чудского озера // Донные отложения Псковско-Чудского озера. Таллин, 1981. С. 56–73.
7. *Давыдова Н.Н.* Изучение процесса эвтрофирования по показателям сапробности, вычисленным для диатомовых комплексов поверхностного слоя донных отложений // Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера. Л.: Наука, 1982. С. 206–209.
8. *Давыдова Н.Н.* Диатомовые водоросли из колонки донных осадков Сестрорецкого Разлива // Сохранение природной экосистемы водоема в урбанизированном ландшафте. Л.: Наука, 1984. С. 107–112.
9. *Давыдова Н.Н.* Диатомовые водоросли – индикаторы природных условий водоемов голоцена. Л.: Наука: Ленингр. отд-ние, 1985. 224 с.
10. *Давыдова Н.Н.* Эволюция диатомовой флоры (Псковско-Чудское озеро) // История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки. Л.: Наука, 1990. С. 148–150.
11. *Давыдова Н.Н., Субетто Д.А.* Геоэкологический мониторинг Ладожского озера по палеолимнологическим данным // Ладожское озеро. Петрозаводск, 2000. С. 66–75.
12. *Давыдова Н.Н.* Зоны загрязнения озера по составу диатомовых водорослей // Атлас “Ладожское озеро” / Под ред. В.А. Румянцева. СПб., 2002. С. 122–123.
13. *Давыдова Н.Н.* Развитие экосистемы озера в поздне- и послеледниковье по составу диатомовых комплексов донных отложений // Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее. СПб.: Наука, 2002. С. 157–164.
14. *Давыдова Н.Н., Субетто Д.А., Сапелко Т.В.* Зоны загрязнения озера по суммарным индексам сапробности комплексов диатомовых водорослей в донных отложениях озер // Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас. СПб., 2015. С. 141.
15. *Дмитриева Н.Н.* Выпускники геофака 1954 г. в Институте озероведения // Где бы географ не был... Воспоминания выпускников географического факультета ЛГУ 1954 г. / Отв. ред. Н.В. Каледин, И.Л. Тихонов. СПб., 2008. С. 98–127.
16. *Неуструева И.Ю., Сапелко Т.В.* Палеолимнологическое направление исследований // 70 лет Институту озероведения РАН. СПб.: Свое издательство, 2017. С. 135–141.
17. Онежское озеро. Экологические проблемы / Под ред. Н.Н. Филатова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. С. 109–120.
18. Палеолимнология Онежского озера / Ред. Г.Г. Мартинсон, Н.Н. Давыдова. Л.: Наука, 1976. 202 с.
19. *Сапелко Т.В., Субетто Д.А.* 60 лет российской палеолимнологии // Изв. РГО. Т. 152. Вып. 1. 2020. С. 76–80.
<https://doi.org/10.31857/S086960712001005X>
20. *Трифопова И.С., Давыдова Н.Н.* Изучение поверхностного слоя донных отложений оз. Красного как метод выявления процессов эвтрофирования // Палеолимнологический подход к изучению антропогенного воздействия на озера. Л.: ГО СССР, 1981. С. 15–20.
21. *Bukhtiyarova L.N., Pomazkina G.V.* Bacillariophyta of Lake Baikal. Vol. 1. Genera Baikalia, Slavia, Navigeia, Placogeia, Grachevia, Goldfishia, Nadiya, Cymbelgeia. Lviv, 2013.
22. *Davydova N.* Flora in the surfical layer. Diatoms // Lake Peipsi. Geology / Ed. by A. Miidel, A. Raukas. Tallinn: Sulemees, 1999. P. 67–79.
23. *Davydova N., Subetto D., Belkina N., Simola H., Kukkonen M.* Palaeolimnology and sediments of Lake Ladoga: monitoring programme proposal // Environmental monitoring in Lake Ladoga. Proposal for a monitoring programme. Karelian Institute. Working Papers. 2000. P. 68–75.
24. *Punning J.M., Kapanen G., Hang, T., Davydova N., Kangur M.* Changes in the water level of Lake Peipsi and their reflection in a sediment core // Hydrobiologia. 2008. V. 599. P. 97–104.

Natalia Naumovna Davydova (to the 90th anniversary of birth)

T. V. Sapelko^{1, *}, A. V. Ludikova^{1, **} and , and D. A. Subetto^{2, *}**

¹*Institute of Limnology, Russian Academy of Science, St. Petersburg, Russia*

²*Herzen State Pedagogical University of Russia, St. Petersburg, Russia*

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

***E-mail: ellerbeckia@yandex.ru*

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

The article is dedicated to the famous Russian paleolimnologist and diatomist Natalya Naumovna Davydova (6.07.1931–23.07.2014) and opens a series of publications prepared for her 90th birthday. N. N. Davydova devoted her life to studying the lakes history. The geography of the lakes she has studied is wide: from the Kola Peninsula to Central Asia and from the Baltic Sea to Western Siberia. However, the main objects of her research have always been the largest lakes in Europe: Ladoga, Onega, Peipsi. N.N. Davydova stood at the origins of the Ladoga Expedition of the Laboratory of Limnology, founded by S.V. Kalesnik. She has developed methods for reconstructing the stages of small and large lakes evolution based on diatom analysis, as well as assessing the natural and human factors, which determine the rate and direction of lake ecosystems evolution.

Keywords: Natalia Naumovna Davydova, history of lakes, diatom analysis, lake sediments, human impact, large lakes, small lakes, Lake Ladoga

REFERENCES

1. Abramova S.A., Davydova N.N. K paleolimnologii Ladozhskogo ozera // *Izv. VGO*. 1966. T. 98. Vyp. 1. S. 19–25.
2. Bol'shie ozera Kol'skogo poluoostrova. L.: Nauka, 1975. S. 250–254.
3. Davydova N.N. Opyt rajonirovaniya poverhnostnyh donnyh osadkov Ladozhskogo ozera po sostavu diatomovogo kompleksa // *Izv. VGO*. 1961. V. 93. Vyp 3. S. 221–228.
4. Davydova N.N. Diatomovaya flora golocenovyh otlozhenij Ladozhskogo ozera // *Iskopaemye diatomovye vodorosli SSSR*. M.: Nauka, 1968. S. 97–102.
5. Davydova N.N., Trifonova I.S. Diatomovye vodorosli v planktone i donnyh otlozheniyah kak pokazatel' evtrofirovaniya // *Evtrofirovanie mezotrofnogo ozera*. L.: Nauka, 1980. S. 115–122.
6. Davydova N.N. Diatomovye vodorosli v poverhnostnom sloe donnyh otlozhenij Pskovsko-Chudskogo ozera // *Donnye otlozheniya Pskovsko-Chudskogo ozera*. Tallin, 1981. S. 56–73.
7. Davydova N.N. Izuchenie processa evtrofirovaniya po pokazatelyam saprobnosti, vychislennym dlya diatomovyh kompleksov poverhnostnogo sloya donnyh otlozhenij // *Antropogennoe e'vtrofirovanie Ladozhskogo ozera*. L.: Nauka, 1982. S. 206–209.
8. Davydova N.N. Diatomovye vodorosli iz kolonki donnyh osadkov Sestroreczkogo Razliva // *Sohranenie prirodnoj ekosistemy vodoema v urbanizirovannom landshafte*. L.: Nauka, 1984. S. 107–112.
9. Davydova N.N. Diatomovye vodorosli – indikatory prirodnyh uslovij vodoemov golocena. L.: Nauka: Leningr. otd-nie, 1985. 224 s.
10. Davydova N.N. Evolyuciya diatomovoj flory (Pskovsko-Chudskoe zero) // *Istoriya Ladozhskogo, Onezhskogo, Pskovsko-Chudskogo ozer, Bajkala i Hanki*. L.: Nauka, 1990. S. 148–150.
11. Davydova N.N., Subetto D.A. Geoekologicheskij monitoring Ladozhskogo ozera po paleolimnologicheskim dannym // *Ladozhskoe zero*. Petrozavodsk, 2000. S. 66–75.
12. Davydova N.N. Zony zagryazneniya ozera po sostavu diatomovyh vodoroslej // *Atlas "Ladozhskoe zero"* / Pod red. V.A. Rummyanceva. SPb., 2002. S. 122–123.
13. Davydova N.N. Razvitie ekosistemy ozera v pozdnee- i poslednikov'e po sostavu diatomovyh kompleksov donnyh otlozhenij // *Ladozhskoe zero – proshloe, nastoyashhee, budushhee*. SPb.: Nauka, 2002. S. 157–164.
14. Davydova N.N., Subetto D.A., Sapelko T.V. Zony zagryazneniya ozera po summarnym indeksam saprobnosti kompleksov diatomovyh vodoroslej v donnyh otlozheniyah ozer // *Ladozhskoe zero i dostoprimechatel'nosti ego poberezh'ya*. Atlas. SPb., 2015. S. 141.
15. Dmitrieva N.N. Vypuskniki geofaka 1954 g. v Institute ozerovedeniy a// *Gde by geograf ne byl...* Vospominaniya vypusknikov geograficheskogo fakul'tety LGU 1954 g./Otv. red. N.V. Kaledin, I.L. Tihonov. SPb., 2008. S. 98–127.

16. Neustrueva I.Yu., Sapelko T.V. Paleolimnologicheskoe napravlenie issledovaniy // 70 let Institutu ozerovedeniya RAN. SPb.: Svoe izdatel'stvo, 2017. S. 135–141.
17. Onezhskoe ozero. Ekologicheskie problemy / Pod red. N.N. Filatova. Petrozavodsk: KarNCz RAN, 1999. S. 109–120.
18. Paleolimnologiya Onezhskogo ozera / Red. G.G. Martinson, N.N. Davy'dova. L.: Nauka, 1976. 202 s.
19. Sapelko T.V., Subetto D.A. 60 let rossijskoj paleolimnologii // Izv. RGO. V. 152. Vy'p. 1. 2020. S. 76–80. <https://doi.org/10.31857/S086960712001005X>
20. Trifonova I.S., Davydova N.N. Izuchenie poverhnostnogo sloya donny'h otlozhenij oz. Krasnogo kak metod vyyavleniya processov evtrofirovaniya // Paleolimnologicheskij podhod k izucheniyu antropogennogo vozdejstviya na ozera. L.: GO SSSR, 1981. S. 15–20.
21. Bukhtiyarova L.N., Pomazkina G.V. Bacillariophyta of Lake Baikal. Vol. 1. Genera Baikalia, Slavia, Navigeia, Placogeia, Grachevia, Goldfishia, Nadiya, Cymbelgeia. Lviv, 2013.
22. Davydova N. Flora in the surfical layer. Diatoms // Lake Peipsi. Geology / Ed. by A. Miidel, A. Raukas. Tallinn: Sulemees, 1999. P. 67–79.
23. Davydova N., Subetto D., Belkina N., Simola H., Kukkonen M. Palaeolimnology and sediments of Lake Ladoga: monitoring programme proposal // Environmental monitoring in Lake Ladoga. Proposal for a monitoring programme. Karelian Institute. Working Papers. 2000. P. 68–75.
24. Punning J.M., Kapanen G., Hang, T., Davydova N., Kangur M. Changes in the water level of Lake Peipsi and their reflection in a sediment core // Hydrobiologia. 2008. V. 599. P. 97–104.

К 90-летию Н.Н. Давыдовой

**КРЕМНИСТЫЕ МИКРОВОДОРОСЛИ В ДОННЫХ
ОТЛОЖЕНИЯХ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА И ИХ РОЛЬ
В ПАЛЕОЛИМНОЛОГИЧЕСКИХ РЕКОНСТРУКЦИЯХ**

© 2021 г. А. В. Лудикова^{а, *}, Д. Д. Кузнецов^{а, **}

^аИнститут озёроведения РАН – СПб ФИЦ РАН, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: ellerbeckia@yandex.ru

**E-mail: dd_kuznetsov@mail.ru

Поступила в редакцию 01.06.2021 г.

После доработки 03.09.2021 г.

Принята к публикации 09.10.2021 г.

Основным методом изучения развития экосистемы Ладожского озера в поздне- и послеледниковое время традиционно выступает диатомовый анализ. Диатомовые водоросли обладают кремнистыми панцирями, хорошо сохраняющимися в донных осадках, что позволяет изучать видовой состав диатомовых комплексов и его изменения во времени. Цисты золотистых водорослей (хризифитов) представляют вторую по численности группу кремнистых микрофоссилий в отложениях Ладожского озера, до недавнего времени, однако, не использовавшуюся в палеореконструкциях. В настоящей работе выполнено сопоставление результатов диатомового анализа с данными об абсолютном и относительном содержании цист золотистых водорослей в колонке донных отложений из центральной части Ладожского озера. Цель исследования – реконструкция условий среды в Ладожском озере в голоцене, а также уточнение индикаторной роли цист хризифитов в изучении истории Ладожского озера. Предпринята попытка интерпретации данных о видовом составе диатомовых комплексов и содержании кремнистых микроводорослей в донных осадках в контексте изменений продолжительности гидрологических и гидробиологических сезонов, обусловленных изменениями уровня Ладожского озера и климатическими факторами.

Ключевые слова: диатомовые водоросли, золотистые водоросли, цисты хризифитов, Ладожское озеро, эволюция озерной экосистемы, голоцен, палеореконструкции

DOI: 10.31857/S0869607121060033

ВВЕДЕНИЕ

Донные отложения озер представляют собой важнейший “архив” информации о развитии озерных экосистем. Изучение различных компонентов водной биоты, в частности, фитопланктона и фитобентоса, позволяет охарактеризовать современное состояние озерной экосистемы. Однако далеко не все группы этих организмов могут быть использованы при изучении условий водной среды в прошлом, поскольку большинство из них после отмирания не сохраняется в донных осадках. Преимущество в сохранности имеют микроорганизмы, обладающие устойчивыми к биологической и химической деструкции тканями и оболочками. Среди микроводорослей к таким организмам относятся, в частности, диатомовые водоросли (*Bacillariophyta*), клетка ко-

торых заключена в кремнистый панцирь, и золотистые водоросли (*Chrysophyta*, хризофиты). Отдельные представители последних имеют кремнистые чешуйки и щетинки, кроме того все хризофиты формируют окремненные (стомато-)цисты, разделяющиеся на половые и цисты покоя, используемые ими для переживания неблагоприятных условий [3]. Именно цисты, в основном, и встречаются в донных отложениях озер.

В палеолимнологических исследованиях диатомовые водоросли традиционно находят гораздо более широкое применение по сравнению с золотистыми [7, 48]. Преимущества диатомового анализа состоят в том, что: 1) диатомовые водоросли имеют более широкое географическое распространение и встречаются в более широком диапазоне экологических условий; 2) систематика диатомовых водорослей детально разработана; 3) для большинства видов диатомей установлены четкие экологические предпочтения и специфические требования к условиям среды. Таким образом, диатомей являются надежными индикаторами изменений параметров водной среды, что позволяет реконструировать основные этапы эволюции озерных экосистем, судить о скорости и направленности происходящих в них процессов.

Золотистые водоросли также имеют достаточно широкое распространение в континентальных водоемах, при этом, как правило, предпочитая богатые гуминами озера умеренных широт со слабокислой или нейтральной реакцией среды и невысоким содержанием биогенных элементов. Так, в олиготрофных озерах хризофиты составляют 10–75% биомассы фитопланктона [3]. Однако отдельные виды способны массово развиваться в кислых или щелочных условиях, а также в эвтрофных водах [39]. Поскольку развитие хризофитов контролируется такими факторами среды, как рН, трофность, удельная электропроводность, соленость, температура воды, содержание гуминовых веществ и т.д. [3], индикационный потенциал этой группы микрофоссилий для палеореконовструкций представляется достаточно значимым. Однако их широкое применение ограничивается недостаточно разработанной систематикой цист. Лишь немногие морфотипы цист связаны с видами, их продуцирующими. Кроме того, возможно формирование сходных морфотипов цист разными видами хризофитов [27]. Поскольку золотистые водоросли, помимо прочих биогенных элементов (P, N) остро конкурируют с диатомовыми за растворенный кремнезем, в палеолимнологических исследованиях традиционно используется соотношение “цисты : диатомей”, рассчитанное как отношение числа цист хризофитов к сумме цист и диатомей, выраженное в процентах [45]. Это соотношение позволяет оценить вклад хризофитов в сообщества кремнистых микроводорослей. Изменение доли золотистых водорослей во времени указывает на изменения условий водной среды (трофности, рН и т.д.), в результате которых хризофиты получали конкурентное преимущество по сравнению с диатомеями, или, наоборот, оказывались менее конкурентоспособными.

Основной вклад в изучение эволюции экосистемы Ладожского озера под воздействием природных и антропогенных факторов с использованием диатомового анализа внесли исследования Н.Н. Давыдовой (Лаборатория озероведения АН СССР, с 1971 г. – Институт озероведения), проводившиеся начиная с конца 1950-х гг. Выявленные особенности видового состава диатомовых комплексов и закономерности его изменения позволили охарактеризовать основные этапы развития Ладожского озера, начиная с позднеледниковья.

В настоящей работе выполнено сопоставление результатов диатомового анализа с данными об абсолютном и относительном содержании цист золотистых водорослей в колонке донных отложений из центральной части Ладожского озера. Целью такого сопоставления является детальная реконструкция условий среды в Ладожском озере в голоцене, а также уточнение индикаторной значимости цист хризофитов для изучения истории Ладожского озера. Поскольку идентификация видовой принадлежности цист не всегда представляется возможной на уровне световой микроскопии, в данном исследовании цисты использовались как единая группа кремнистых микрофоссилий.

В качестве независимого показателя продуктивности озерной экосистемы использовалось содержание органического вещества, оцененное через потери при прокаливании.

СОВРЕМЕННЫЕ ЛИМНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Ладожское озеро ($59^{\circ}54' - 61^{\circ}47'$ с.ш. и $29^{\circ}47' - 32^{\circ}58'$ в.д.) – второе по величине пресноводное озеро в России (площадь водной поверхности 17.765 км^2 , средняя глубина 48.3 м , максимальная глубина 230 м , объем воды $\sim 848 \text{ км}^3$). Его обширная водосборная площадь ($>258.600 \text{ км}^2$) охватывает северо-запад Европейской части России и восточную часть Финляндии и включает такие крупные озера, как Онежское, Ильмень и Сайма. Вытекающая из Ладожского озера р. Нева впадает в Финский залив Балтийского моря [14] (рис. 1).

Ладожское озеро характеризуется неравномерным распределением глубин. Вдоль южного берега тянется пологая мелководная зона шириной до 62 км , ограниченная 18-метровая изобатой [19]. В центральной части бассейна глубины постепенно увеличиваются к северу от -50 до -100 м (рис. 1б). Южная и центральная части котловины характеризуются достаточно сглаженным рельефом, тогда как в северной части отмечаются резкие перепады глубин, обусловленные чередованием впадин глубиной до 200 м и более, и хребтообразных возвышенностей различных размеров [47].

Тепловой режим и связанная с ним динамика водных масс являются основными факторами, контролирующими процессы, происходящие в экосистеме Ладожского озера. Ладожское озеро – димиктический водоем с полным вертикальным перемешиванием водной толщи два раза в год, весной и осенью. В результате различия глубин по акватории прогрев и охлаждение водной массы происходят неравномерно. Термическая неоднородность приводит к формированию весенней и осенней термической фронтальной зоны. С мая до середины июля весенняя термическая фронтальная зона (термобар) разделяет озеро на прибрежную теплоактивную область и центральную, глубоководную теплоинертную область, и препятствует водообмену между ними. По мере аккумуляции тепла водной массой термобар перемещается в зону больших глубин, где происходит смыкание фронтальных зон, в результате чего все озеро становится полностью стратифицированным [14]. Биогенные элементы, поступающие в озеро с речным притоком и в ходе весеннего снеготаяния, концентрируются в мелководной зоне озера из-за отсутствия горизонтального перемешивания водных масс, разделенных термобаром, что способствует развитию здесь весеннего фитопланктона [21].

Вегетация планктонных диатомовых водорослей в Ладожском озере начинается уже ранней весной, благодаря проникновению солнечной радиации сквозь ледовый покров [21]. Однако массовое развитие планктонных диатомей происходит после схода льда, который начинается в мелководной зоне озера, т.е. на юге и в прибрежной зоне северного архипелага в конце апреля–начале мая. Низкие температуры воды и интенсивное перемешивание благоприятствуют диатомовым водорослям рода *Aulacoseira*, в частности *A. islandica*, которая доминирует в весеннем фитопланктоне. С разрушением термобара и установлением термической стратификации в Ладожском озере наступает летний биологический сезон, и *Aulacoseira* spp. сменяются в диатомовом планктоне *Asterionella formosa* и другими, менее массовыми летними видами диатомей [21].

До начала антропогенного эвтрофирования (конец 1960-х гг.) диатомовые водоросли доминировали в составе ладожского фитопланктона в течение всего сезона вегетации, при этом с наступлением биологического лета (2-я половина июля–август) большую роль в составе планктонных сообществ играли также сине-зеленые и зеленые водоросли [21]. В настоящее время максимальное развитие диатомей приходится на период биологической весны (май–1-я половина июля), тогда как в сезон биологиче-

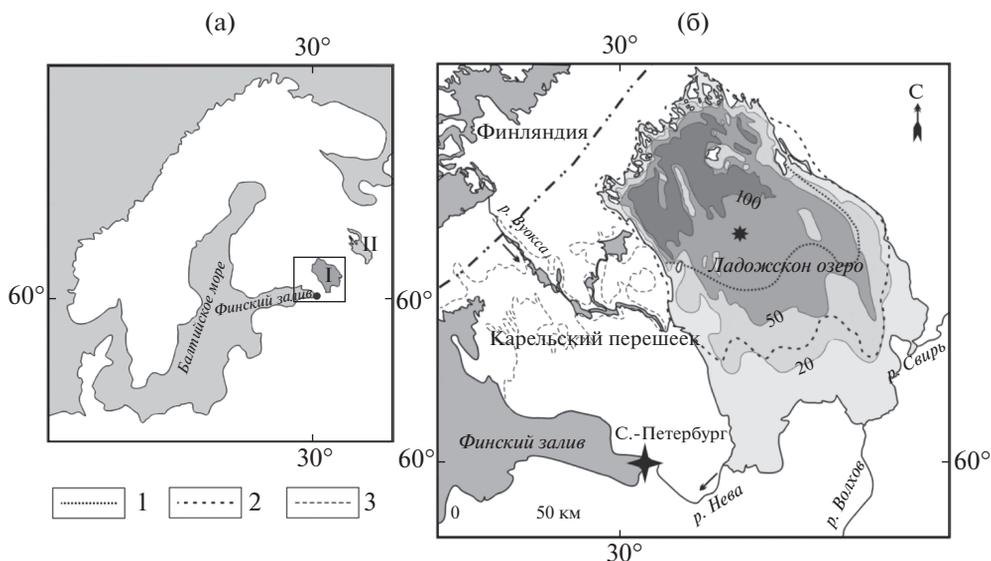


Рис. 1. Местоположение Ладожского озера и изученного разреза донных отложений. 1а. Местоположение Ладожского озера (I – Ладожское озеро, II – Онежское озеро); 1б. Генерализованная схема глубин Ладожского озера и место пробоотбора колонки донных отложений (станция № 82 обозначена звездочкой); условные обозначения: 1 – южная часть береговой линии Ладожского озера в стадию Иольдиева моря, 2 – береговая линия Ладожского озера в стадию Анцилового озера, 3 – предполагаемое соединение Ладожского озера с Балтийским морем в раннем голоцене [25].

Fig. 1. Location of Lake Ladoga and the coring site. 1a. Location of Lake Ladoga (I – Lake Ladoga, II – Lake Onega); 1b. Generalized bathymetry of Lake Ladoga and location of the coring site, station No. 82 (indicated by an asterisk); symbols: 1 – southern part of the shoreline of the Lake Ladoga during the Yoldia Sea stage, 2 – Lake Ladoga shoreline during the Ancylus Lake stage, 3 – presumable connection between Lake Ladoga and the Baltic Sea in the Early Holocene [25].

ского лета в составе фитопланктонных сообществ доминируют синезеленые и криптофитовые водоросли [15]. Золотистые водоросли развиваются преимущественно в летнем фитопланктоне [3, 21]. Несмотря на то, что в глубоководных районах озера биомасса хризофитов может достигать 35% от общей биомассы фитопланктона [34], золотистые водоросли в целом не играют важной роли в составе планктонных сообществ Ладожского озера.

ПОЗДНЕ- И ПОСЛЕЛЕДНИКОВАЯ ИСТОРИЯ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

После завершения Валдайского оледенения, Ладожское озеро было восточным заливом Балтийского ледникового озера (БЛО) [11, 12, 26], питаемого талыми водами отступавшего скандинавского ледника и занимавшего большую часть котловины современного Балтийского моря. Около 11700–11600 кал. л. н. произошел спуск вод БЛО в Мировой океан и падение его уровня [30]. В результате Ладожское озеро изолировалось от Балтики, при этом его уровень и площадь оказались намного меньше современных [25]. Возникновение в балтийской котловине трансгрессирующего Анцилового озера (~10700–10200 кал. л. н.) привело к возникновению соединения с Ладогой через пролив в северной части Карельского перешейка [12]. Согласно другой точке зрения, анциловая трансгрессия на Балтике привела к подпруживанию стока из Ладожского озера, осуществлявшегося через северную часть Карельского перешейка.

Это привело к подъему уровня воды в озере и подтоплению южных мелководий Ладожского озера до современных изобат порядка 20 м в период максимума анциловой трансгрессии [25].

Регрессия Анцилового озера привела к изоляции Ладожского озера от Балтики и понижению его уровня ниже современных отметок. В среднеголоценовое время имела место третья трансгрессивная фаза, известная как “ладожская трансгрессия”, которая была обусловлена воздействием комплекса гляциоизостатических, гидрологических и климатических факторов [22, 25]. В ходе трансгрессии уровень Ладожского озера не только поднялся до современной отметки (5 м над уровнем моря), но и превысил ее, что привело к затоплению значительных территорий прибрежных низменностей, особенно в южном Приладожье. Трансгрессия завершилась образованием стока из Ладоги в Финский залив через р. Неву около 3400 кал. л. н., в результате чего уровень Ладожского озера понизился до современной отметки [42, 49].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Колонка донных отложений была отобрана в центральной части Ладожского озера с глубины 68 м в районе станции № 82 мониторинговой сетки Института озероведения РАН (рис. 16), в рамках Ладожской экспедиции ИНОЗ РАН в 2016 г. [44]. Определение возраста 5 проб донных отложений методом ускорительной масс-спектрометрии (AMS) было выполнено в Лаборатории радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии Института географии РАН (г. Москва) и Центре прикладных изотопных исследований Университета Джорджии (США). Подробное описание лабораторных и аналитических процедур и обсуждение результатов датирования опубликовано в [44].

Пробы для диатомового анализа предварительно высушивались при комнатной температуре для последующего расчета концентраций кремнистых микрофоссилий в 1 г сухого осадка [7]. Пробоподготовка для диатомового анализа выполнена по стандартной методике [10] с использованием пирофосфата натрия ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) для дезинтеграции осадка и выделения створок диатомей. Удаление глинистой фракции осуществлялось методом повторяющейся декантации. Для выявления роли отдельных видов в составе диатомовых комплексов использовалось подразделение на: “единичные” (<1%), “обычные” (1–5%), субдоминанты (5–10%) и доминанты (>10%) [7]. Индекс флористического разнообразия рассчитан как отношение числа видов, определенных в пробе, к сумме подсчитанных в пробе створок [29]. Выделение группы видов диатомей, характерных для Анцилового озера, основано на работах [9, 33]. Цисты хризифитов подсчитывались параллельно со створками диатомей. Соотношение “цисты : диатомей” рассчитано как отношение количества цист хризифитов, подсчитанных в пробе, к сумме цист и панцирей диатомей (1 панцирь = 2 створки), выраженное в процентах [45]. Диатомовая диаграмма (рис. 2) построена с использованием программы для визуализации палеоэкологических данных C2 Version 1.5 [36]. Возрастная шкала (рис. 2) построена путем интерполяции полученных ранее датировок [44]. Анализ потерь при прокаливании (ППП) выполнен по стандартной методике [13].

Рис. 2. Относительное (%) и абсолютное (в 1 г сухого осадка) содержание кремнистых микроводорослей в колонке донных отложений станции № 82, индекс флористического разнообразия (ИФР), содержание органического вещества (ППП) и периоды органонакопления. Литология отложений описана в тексте.

Fig. 2. Relative (%) and absolute (per 1 g of dry sediment) abundances of the siliceous microalgae in the sediment core from the station No. 82, floristic diversity index, organic matter content (LOI) and periods of organic accumulation. Lithology of the sediments is characterized in the text.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Вскрытые отложения представлены (снизу вверх): серыми глинами (127–107 см), плавно переходящими в коричневый полосчатый гиттиевый алеврит (107–16 см), и далее – в слоистый гиттиевый алеврит с железистыми корками (16–0 см) [44]. Полученные радиоуглеродные датировки и глубинно-возрастная модель опубликованы в [44].

Изменения содержания органического вещества, выраженные через ППП, позволили выделить 5 периодов органогенного осадконакопления (табл. 1, рис. 2) [13].

По данным диатомового анализа было выделено 5 диатомовых зон (ДЗ) (рис. 2). Для интервала 0–108 см подробное описание видового состава диатомовых комплексов было ранее приведено в [44], поэтому в настоящей работе мы ограничимся краткой характеристикой.

Диатомовая зона ДЗ-1 (127–117 см) характеризуется крайне низким содержанием кремнистых микроводорослей (3 тыс.–35 тыс. створок диатомей и 7 тыс.–51 тыс. цист хризофитов, соответственно). Отмечены створки пресноводных планктонных *Aulacoseira islandica*, *A. subarctica*, *Stephanodiscus* spp. и бентосных *Fragilaria* spp. и *Navicula* spp.. Единично встречены морские диатомеи, представленные преимущественно спорами *Chaetoceros* spp. (рис. 2).

Для диатомовой зоны ДЗ-2 (117–102 см) характерно значительное увеличение содержания створок диатомей (до 3.2 млн) и цист хризофитов (до 1.5 млн). В составе диатомовых комплексов доминирует *Aulacoseira islandica* (57–87%), однако, в интервале 115–111 см численности со-доминанта достигает *Aulacoseira subarctica* (19–31%). В нижней части ДЗ-2 (117–109 см) отмечено максимальное (до 5.3%) суммарное содержание “анциловых” видов (*Opephora martyi*, *Navicula jentzschii*, *N. scutelloides*, *Diploneis domblittensis*, *Symbella sinuata*). Преобладают диатомеи планктона (76–89%). В интервале 115–107 см численность бентосных видов возрастает до 18–24%, преимущественно за счет обрастателей *Fragilariaceae*. ДЗ-2 характеризуется максимальными значениями соотношения “цисты : диатомеи” (48–62%). ИФР варьирует от 0.03 до 0.05 (рис. 2).

В диатомовой зоне ДЗ-3 (102–47 см) происходит дальнейшее возрастание концентраций кремнистых микрофоссилий (3.2 млн–40 млн створок диатомей и 1.2 млн–8 млн цист хризофитов; рис. 2). Характерны монодоминантные диатомовые комплексы, в которых 78–95% от общего числа створок приходится на долю планктонной *Aulacoseira islandica*. Численность *Aulacoseira subarctica* снижается с 5–6 до 2%. В отдельных горизонтах отмечено сравнительно высокое суммарное содержание планктонных *Cyclotella* spp. (5–8%). Доля “анциловых” видов не превышает 1%. Для ДЗ-3 характерна максимальная численность диатомей планктона (88–99%). Соотношение “цисты : диатомеи” снижается (23–43%). ИФР изменяется в диапазоне от 0.02 до 0.04.

Диатомовая зона ДЗ-4 (47–15 см) подразделена на две подзоны. В подзоне ДЗ-4а (47–36 см) отмечено увеличение содержания створок диатомей (до 44–47 млн) и цист золотистых водорослей (до 5–7 млн), и последующее резкое их снижение (до 9 млн и 1.6 млн, соответственно) у верхней границы подзоны (рис. 2). В интервале 42–38 см резко уменьшается доля *Aulacoseira islandica* (до 43–53%) при одновременном возрастании численности *A. subarctica* до значений со-доминанта (19.5–22%). Суммарное содержание *Cyclotella* spp. достигает 8%, а *Stephanodiscus* spp. – 11%. Доля планктонных

Таблица 1. Периоды органогенного осадконакопления и диапазон значений ППП (%) в донных отложениях станции № 82 [13]

Table 1. Periods of organic accumulation and ranges of the LOI values (%) in the sediment core from the station No. 82 [13]

Период органонакопления	А	В	С	Д	Е
Диапазон значений ППП, %	2.8–3.0	3.3–7.7	7.2–8.9	6.0–8.0	6.9–12.1

диатомей остается высокой (88–97%). Численности “обычного” вида достигает обрастатель *Tabellaria fenestrata*. Отмечается дальнейшее снижение значений соотношения “цисты : диатомей” до 18–26%. В свою очередь ИФР несколько возрастает (0.03–0.06). На границе подзон ДЗ-4а и ДЗ-4б доля *A. islandica* резко возрастает до 90%. Одновременно происходит сокращение численности *A. subarctica*, *Cyclotella* spp. и *Stephanodiscus* spp.

В подзоне ДЗ-4б (36–15 см) концентрации створок диатомей изменяются в широком диапазоне (от 11 млн до >90 млн). Максимальное содержание створок в осадках отмечено в интервале 28–18 см (63–94 млн). Концентрации цист сравнительно невысоки (1.5–6.7 млн). Содержание планктонной *Aulacoseira islandica* вверх по разрезу снижается (71–35%). *Aulacoseira subarctica* достигает численности со-доминанта (17–31%), а в интервале 26–21 см становится доминантом (33–38%), превосходя по численности *A. islandica* (рис. 2). Доли планктонных *Cyclotella* spp. и *Stephanodiscus* spp. составляют 2–8 и 1–13%, соответственно. Возрастает доля диатомей бентоса в составе диатомовых комплексов (до 15%). С численностью “обычного” вида постоянно отмечается обрастатель *Tabellaria fenestrata*, содержание обрастателей *Fragilariaceae* составляет 1–6%. Соотношение “цисты : диатомей” в нижней части подзоны в целом выше, чем в верхней (10–22 и 5–14% соответственно). Значения ИФР возрастают до 0.04–0.07.

Диатомовая зона ДЗ-5 (15–0 см) характеризуется снижением концентраций створок диатомей (21–53 млн). Содержание цист хризифитов также несколько сокращается (до 1.2–4.4 млн). Доминантом в составе диатомовых комплексов вновь становится *A. islandica*, содержание которой достигает 79% в средней части ДЗ (рис. 2). Численность *A. subarctica* снижается до значений субдоминанта, а затем “обычного” вида (<5%). Исключение составляет самый верхний интервал (0–0.5 см), представленный пробой из наилка, где доля *Aulacoseira subarctica* снова возрастает до значений со-доминанта (25%). Содержание бентосных диатомей несколько снижается (в основном <10%). Соотношение “цисты : диатомей” варьирует от 6 до 18%. Значения ИФР составляют 0.04–0.06.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты диатомового анализа позволяют охарактеризовать основные этапы развития Ладожского озера и флоры кремнистых микроводорослей, в целом сопоставимые с периодами органогенного осадконакопления.

На наиболее раннем этапе I (ДЗ-1, период органонакопления А, до ~10700 кал. л. н.) низкое содержание обеих групп кремнистых микроводорослей указывает на неблагоприятные условия для развития диатомовых и золотистых водорослей. Традиционно принято считать, что такие условия существовали в Ладожском озере в позднеледниковое время, когда в ходе дегляциации, имевшей место в интервале ~14000–12500 кал. л. н. [43], его котловина заполнилась водами гигантского приледникового бассейна, БЛО. Для отложений БЛО в ладожской котловине характерно наименьшее содержание створок диатомей [1, 5, 7, 8, 11].

По данным спорово-пыльцевого анализа рассматриваемый этап был отнесен к позднеледниковью – раннему голоцену [44]. Низкое содержание органического вещества (значения ППП не превышают 3%; табл. 1, рис. 2) характерно как для позднеплейстоценовых ленточных глин, так и раннеголоценовых гомогенных глин в котловине Ладожского озера [13, 26]. Отсутствие характерной ленточной слоистости, формировавшейся в донных отложениях в приледниковом бассейне, позволяет предположить, что данная пачка формировалась в условиях перехода от озерно-ледниковых к озерным условиям [11, 47], т.е. на рубеже позднеледниковья–голоцена, после регрессии БЛО. Это время соответствует регрессивной стадии Балтики – стадии Иольдиева моря (рис. 16). Поскольку поступление обломочного материала с водосбора озера сократилось, фор-

мирование отложений происходило преимущественно за счет взвешенных глинистых частиц в водной толще [26]. В глубоководной части ладожской котловины накопление гомогенных глин происходило в интервале ~11380–9500 кал. л. н. [32].

Природные обстановки начала голоцена, очевидно, во многом были сходными с позднеледниковыми. Несмотря на начавшееся потепление климата, они по-прежнему не благоприятствовали развитию альгофлоры, о чем свидетельствует низкое содержание створок диатомей в пребореальных отложениях, отмечаемое в рассматриваемом разрезе, и других разрезах донных отложений Ладожского озера [8]. По-видимому, в этот период в озере существовали ультраолиготрофные условия, лимитировавшие развитие как диатомовых, так и золотистых водорослей. Кроме того, фактором, ограничивавшим развитие хризофитов на данном этапе, возможно, была также низкая температура воды. Известно, что в настоящее время хризофиты массово развиваются в Ладожском озере в летний период при температуре воды $>10^{\circ}\text{C}$ [3]. По-видимому, присутствие тонких минеральных частиц в водной толще препятствовало достаточно-му прогреву водной массы даже в условиях высокой летней инсоляции раннего голоцена [2].

Присутствие фрагментов и единичных целых створок морских диатомей в отложениях позднеледниковья и раннего голоцена [7, 11, 16, 17] обусловлено их переотложением из активно размываемых осадков морских Микулинского межледниковья, разрезы которых хорошо известны на территории Приладожья [18].

Этап II (ДЗ-2, первая половина периода органонакопления В, ~10700–9400 кал. л. н.) характеризуется заметным увеличением (на 2 порядка) концентраций створок диатомей и цист хризофитов (рис. 2), что указывает на установление обстановок, более благоприятных для развития альгофлоры, чем на предыдущем этапе. Потепление климата раннего голоцена способствовало формированию почв и сомкнутого растительного покрова на водосборе, а также развитию продукционных процессов в озере [8]. Это нашло отражение в устойчивом росте содержания органического вещества (рис. 2). Снижение доли дочетвертичных палиноморф в отложениях глубоководной части озера к времени 9500 кал. л. н. также указывает на постепенную стабилизацию почвенного покрова за счет развития растительности [32].

Высокий процент диатомей бентоса, вероятно, отражает уменьшение глубины водоема после регрессии БЛО. Резкое увеличение численности планктонной *Aulacoseira subarctica* на фоне повышенного содержания бентосных видов также отмечалось в раннеголоценовых отложениях глубоководной части Ладожского озера, в разрезе, расположенном к западу от изученной нами станции [38]. Наряду с увеличением содержания изотопа O^{18} , данный сигнал был интерпретирован как понижение уровня озера и увеличение испарения с водной поверхности.

На данном этапе отмечено повышенное содержание видов диатомей, характерных для Анцилового озера (рис. 2) – крупного пресноводного бассейна, существовавшего в раннем голоцене (10700–10200 кал. л. н.) в котловине Балтики. Присутствие этих олиготрофных, холодолюбивых видов, очевидно, отражает специфику условий среды в ладожской котловине. Ранее “анциловые” виды отмечались в составе диатомовых комплексов раннего голоцена в Ладожском озере [7, 11], а также в осадках малых озер северной части Карельского перешейка, расположенных на трассе предполагаемого пролива, соединявшего ладожский и анциловый бассейны [28, 40].

Отложения данного этапа характеризуются также наиболее высокими значениями соотношения “цисты : диатомей” (рис. 2), что отражает высокий вклад золотистых водорослей в состав фитопланктонных сообществ раннего голоцена. Вероятно, это было обусловлено практически полным отсутствием конкуренции со стороны летних видов диатомей и других микроводорослей. В настоящее время хризофиты массово развиваются в летнем фитопланктоне Ладожского озера, т.е. в период существования устойчивой термической стратификации. Большинство видов хризофитов наиболее успеш-

но конкурируют с диатомеями в олиготрофных условиях. Так, для ряда канадских озер была установлена обратная зависимость между биомассой фитопланктона и относительным содержанием золотистых водорослей, как результат различного содержания в их водах общего фосфора [45]. Таким образом, наиболее высокая доля цист хризофитов в отложениях данного периода, по-видимому, указывает на сравнительно низкую обеспеченность биогенными элементами и олиготрофный статус экосистемы.

Однако высокие значения соотношения “цисты : диатомеи”, возможно, свидетельствуют также о различной продолжительности гидрологических и гидробиологических сезонов в раннем голоцене по сравнению с современностью. Так, сроки и продолжительность весенней циркуляции и термической стратификации в Ладожском озере должны были отличаться от современных в условиях более континентального климата раннего голоцена, характеризовавшегося суровыми зимами и более сухим и теплым летом [23]. Кроме того, в ходе эволюции балтийских палеобассейнов в позднеледниковье – раннем голоцене (регрессия БЛО, трансгрессия и регрессия Анцилового озера) площадь и глубина водоемов, существовавших в ладожской котловине, претерпевали существенные изменения. Согласно одной из точек зрения, южная часть современной ладожской котловины в раннем голоцене полностью осушалась (рис. 16) [11]. Предполагается, что даже на этапе анциловой трансгрессии подтопление южных мелководий имело место лишь до ~20-метровой изобаты [25, 26]. Таким образом, климатические особенности, конфигурация ладожского бассейна, распределение глубин, и связанная с ним площадь теплоактивной области определяли термический режим водоема в раннем голоцене, а, следовательно, и особенности сезонного развития фитопланктона.

Примечательно, что максимальные значения соотношения “цисты : диатомеи” были также отмечены вместе с комплексом “анциловых” диатомей в раннеголоценовых отложениях малых озер Карельского перешейка, расположенных в районе предполагаемого соединения между ладожским и анциловым бассейнами [28, 40]. Это свидетельствует в пользу существования сходных условий в ладожской котловине и северной части Карельского перешейка в раннем голоцене, и может являться косвенным подтверждением существования здесь единого водного бассейна со сходными гидрохимическими и гидробиологическими условиями.

Этап III (ДЗ-3, периоды органонакопления В и С, ~9400–4500 кал. л. н.) характеризуется дальнейшим увеличением концентрации створок диатомей и цист хризофитов в донных осадках, что свидетельствует о продолжающемся росте продуктивности сообществ кремнистых микроводорослей. Это также подтверждается увеличением содержания биогенного кремнезема в ладожских отложениях раннего – среднего голоцена [26, 38]. Продолжающийся рост значений ППП (период В) и достижение их стабильно высоких значений (период С; табл. 1, рис. 2) указывают на повышение продуктивности экосистемы озера в целом [13]. Увеличение содержания органического вещества в рассматриваемом интервале голоцена отмечалось также в других разрезах донных отложений Ладожского озера [13, 26, 32]. Очевидно, данный интервал соответствует эпохе климатического оптимума. Согласно результатам палеоклиматических реконструкций, в интервале 8000–4500 кал. л. н. на северо-западе России летние температуры были на 2.0–2.5°C выше современных, а среднегодовое количество осадков превышало современное на 100–150 мм/год [31].

Монодоминирование в составе диатомовых комплексов ранневесенней планктонной *Aulacoseira islandica* (рис. 2) свидетельствует о том, что условия, существовавшие в ладожской котловине в сезон биологической весны, отличались от современных. В настоящее время цветение *A. islandica* в Ладожском озере начинается еще ранней весной, подо льдом, и продолжается после таяния ледового покрова в условиях отсутствия конкуренции со стороны других представителей фитопланктона [21]. С установлением термической стратификации диатомеи *Aulacoseira* spp. исчезают из состава фи-

топланктона. Таким образом, в условиях продолжающегося потепления климата среднего голоцена массовому развитию *A. islandica* могло способствовать более раннее начало ее подледной вегетации и/или более ранний сход льда. Кроме того, период весенней циркуляции мог также быть менее продолжительным, а сроки установления термической стратификации – также более ранними. Таким образом, развитие других представителей рода *Aulacoseira*, в первую очередь, *A. subarctica*, массово развивающейся во второй половине биологической весны, было ограничено более ранним завершением весеннего перемешивания.

Помимо климатической обстановки, на состав и продуктивность диатомовых сообществ, очевидно, должен был оказывать влияние и низкий уровень Ладожского озера, береговая линия которого к началу атлантического периода в южной части котловины располагалась в районе современной 30-метровой изобаты [23]. Таким образом, южный мелководный район (0–18 м), где в настоящее время происходит массовое развитие весеннего фитопланктона, был осушен (рис. 1б). Формирование весенней теплоактивной области начиналось в районе, характеризующемся большим уклоном дна и более резким перепадом глубин [19], по сравнению с современной литоральной зоной Ладожского озера. Следовательно, характер весенней циркуляции, очевидно, должен был отличаться от современного, что, в свою очередь, влияло на сезонную динамику фитопланктона.

Наибольшее для данного этапа содержание створок диатомей и цист хризодитов отмечено в интервале ~6800–5700 кал. л. н. (рис. 2). Важно отметить, однако, что концентрации створок диатомей не достигают максимальных значений в эпоху климатического оптимума. Напротив, еще более высокое их содержание отмечается в отложениях второй половины голоцена. Таким образом, климатический оптимум голоцена не был самым благоприятным периодом для развития диатомовой флоры в Ладожском озере. То же характерно для Онежского озера, где наибольшие концентрации створок характерны для отложений суббореального и субатлантического периодов [6].

Содержание цист золотистых водорослей в эпоху климатического оптимума, напротив, достигает максимальных значений. Можно предположить, что температурные условия и обеспеченность биогенными элементами (фосфором и растворенным кремнеземом) в период биологического лета – времени массового развития хризодитов – были наиболее благоприятными для этой группы водорослей. Так, в настоящее время высокое разнообразие и обилие золотистых водорослей в Ладожском озере наблюдается при температуре 10–17°C [3]. В то же время значения соотношения “цисты : диатомеи” снижаются по сравнению с предыдущим этапом. Возможно, это объясняется появлением конкуренции со стороны летних видов диатомей (*Cyclotella* spp., *Stephanodiscus* spp.), доля которых также возрастает в этот период.

Прорыв р. Вуоксы ~5650–5900 кал. л. н., внесший заметный вклад в ладожскую трансгрессию и приведший к повышению уровня Ладожского озера на 1–2 м [42], не нашел явного отражения в составе диатомовых комплексов. Сокращение концентрации створок диатомей, начиная с ~5900 кал. л. н. (рис. 2), возможно, является следствием постепенного ухудшения климатических условий.

Этап IV (ДЗ-4, ДЗ-5 периоды органоакпления D и E, ~4500–0 кал. л. н.) характеризуется наиболее контрастными изменениями состава диатомовых комплексов и содержания кремнистых микроводорослей. Появление планктонной *Aulacoseira subarctica* в качестве со-доминанта *Aulacoseira islandica*, очевидно, явилось следствием суббореального похолодания, начавшегося около 4500 кал. л. н. [31]. Отсутствие упоминаний об *A. subarctica* в предшествующих исследованиях [1, 5, 7, 8, 11] объясняется тем, что разные ее морфотипы, различающиеся соотношениями высоты и диаметра створки, ранее идентифицировались как три различных таксона, а именно *Aulacoseira italica*, *A. italica* ssp. *subarctica* и *A. (distans* var.) *alpigena* [4, 41]. Ранее резкое увеличение содержания *A. alpigena* и *A. italica* (в современном понимании – *A. subarctica*) в

отложениях суббореального – субатлантического периодов объяснялось похолоданием климата [1, 7, 8].

Об ухудшении климатических условий свидетельствует и снижение значений ППП в отложениях данного этапа (табл. 1, рис. 2), отмечаемое также в других колонках ладожских отложений [13]. Уменьшение содержания органического вещества, вероятно, отражает снижение продуктивности экосистемы в результате суббореального похолодания, а также увеличение поступления в озерную котловину тонких минеральных частиц [13].

Увеличение доли бентосных видов, по-видимому, указывает на увеличение площади литоральной зоны в результате повышения уровня Ладожского озера. Возможно, затопление прибрежных низменностей в ходе ладожской трансгрессии также привело к обогащению озерной экосистемы биогенными элементами [8]. Оба этих фактора, в свою очередь, способствовали увеличению видового разнообразия и, несмотря на похолодание, дальнейшему росту концентраций диатомей в осадках (рис. 2). Обогащение видового состава диатомовых комплексов в суббореальное время зафиксировано также по данным изучения других ладожских колонок [7, 11].

Около 3500 кал. л. н. отмечается резкое сокращение концентраций створок диатомей и цист хризодитов, сопровождающееся столь же резкими изменениями видового состава диатомовых комплексов (монодоминирование *Aulacoseira islandica*, снижение численности *A. subarctica* до значений субдоминанта, сокращение доли планктонных *Cyclotella* spp. и *Stephanodiscus* spp.; рис. 2). Эти изменения могут быть соотнесены с максимальной фазой ладожской трансгрессии, завершившейся около 3400 кал. л. н. прорывом р. Невы и падением уровня Ладожского озера до современных отметок [42, 49]. Однако имеющихся в настоящее время данных недостаточно для того, чтобы сделать однозначное заключение о том, каким образом ладожская трансгрессия и последующая регрессия отразились в составе диатомовых комплексов глубоководной части Ладожского озера. Ранее было высказано предположение о том, что ладожская трансгрессия завершилась еще 4400–4000 кал. л. н., результатом чего стало увеличение доли *A. subarctica* в составе диатомовых комплексов и резкое повышение содержания изотопа O^{18} [38].

Отсутствие заметных изменений в значениях ППП (рис. 2) не позволяет выделить интервал, соответствующий завершению трансгрессии. Вероятно, это событие не нашло заметного отражения в содержании органического вещества в донных осадках вследствие значительной удаленности района исследования от берегов. Тем не менее, предыдущими исследованиями было зафиксировано резкое падение значений содержания органического вещества в отложениях заливов северной части Ладожского озера, а также некоторое снижение значений ППП и увеличение доли песчаной фракции в осадках центральной части озера (глубина около 60 м) в связи с завершением ладожской трансгрессии [26]. В то же время в отложениях глубоководной зоны (>100 м) регрессия Ладожского озера также не привела к каким-либо заметным изменениям в соотношении органического и минерального вещества и других геохимических показателей [32].

После 3500–3400 кал. л. н. *Aulacoseira subarctica* вновь занимает положение содоминанта в составе диатомовых комплексов, а в интервале ~2500–2000 кал. л. н. даже превосходит по численности *Aulacoseira islandica* (рис. 2). По всей видимости, массовое развитие этого вида является следствием продолжающегося похолодания и увлажнения климата в субатлантический период. Известно, что *A. subarctica* появляется в составе массовых видов ладожского фитопланктона позже *A. islandica* – по мере усиления конвективного перемешивания и прогрева водных масс. В южном мелководном районе это происходит в разгар биологической весны (начало июня), тогда как в остальных прибрежных районах – в период поздней биологической весны (середина июня) [21]. *A. subarctica* хорошо переносит условия низкой освещенности, возникаю-

щие в ходе перемешивании водной толщи, а обогащение поверхностных слоев биогенными элементами из придонных слоев благоприятствуют ее развитию в период весенней циркуляции. Таким образом, массовое развитие *A. subarctica* в суббореальном – первой половине субатлантического периода, вероятно, свидетельствует о большей продолжительности периода весенней циркуляции в результате более медленного прогрева водных масс. Возвращение доминирующей роли *A. islandica* в последние ~1500 кал. л. н., возможно, отражает увеличение продолжительности ледостава на Ладожском озера, и, соответственно, удлинение периода подледного развития этого вида. Повышение значений ППП в этот период (табл. 1, рис. 2), вероятно, обусловлено неполной деструкцией органического вещества в ходе диагенетических преобразований молодых осадков.

Несмотря на ухудшение климатических условий, вторая половина голоцена (в особенности суббореальный и первая половина субатлантического периодов) оказались наиболее благоприятными для развития диатомовой флоры в Ладожском озере, о чем свидетельствуют высокие концентрации створок в осадках, превышающие значения эпохи климатического оптимума. Можно предположить, что в условиях похолодания диатомовые водоросли оказались наиболее конкурентоспособными по сравнению с другими массовыми представителями ладожского фитопланктона (зелеными и синезелеными водорослями).

Что касается золотистых водорослей, то условия, установившиеся в ладожской котловине в результате изменения природно-климатических обстановок суббореального и субатлантического времени, очевидно, оказались менее благоприятными для их развития. Это нашло отражение как в некотором снижении их концентраций, так в уменьшении их доли в сообществе кремнистых микроводорослей (рис. 2). Последнее, по-видимому, свидетельствует об изменившемся термическом режиме озера (сроки установления термической стратификации, температура максимального прогрева и пр.). Возможно также усиление конкуренции со стороны представителей летнего диатомового планктона *Cyclotella* spp., *Stephanodiscus* spp., доля которых в составе диатомовых комплексов в этот период устойчиво высока.

В настоящее время (интервал, соответствующий пробе из поверхностного слоя донных отложений) *Aulacoseira subarctica* вновь достигает численности со-доминанта (рис. 2), а в некоторых районах Ладожского озера даже превосходит по численности *A. islandica* [41]. Вероятно, это является следствием более мягких зим последних ~30 лет, способствовавших менее суровым ледовым условиям и уменьшению частоты появления ледового покрова на Ладожском озере [37]. Начиная с 1980 г., отмечается повышение температуры воздуха в марте, апреле и мае [20]. Соответственно, сроки схода льда также сдвигаются на более ранние даты (М.А. Наumenko, личное сообщение), что дает возможность предполагать удлинение периода весенней циркуляции. Перемешивание водной толщи благоприятствует развитию *A. subarctica*, которая способна переносить дефицит освещенности, возникающий в таких условиях. Поэтому ее высокая численность в составе диатомовых комплексов современного этапа, по всей видимости, указывает на более длительный период весенней циркуляции после коротких и мягких зим, что также было показано результатами других исследований [35, 40, 46]. Сравнительно низкая доля цист хризифитов отражает их роль в составе современных фитопланктонных сообществ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты изучения кремнистых микроводорослей в донных отложениях Ладожского озера позволили проследить основные этапы эволюции его экосистемы, обусловленные изменениями природно-климатических обстановок голоцена.

Условия начала голоцена, несмотря на потепление климата, были наименее благоприятными для развития диатомовых и золотистых водорослей. Основными лимитирующими факторами на данном этапе были дефицит биогенных элементов, низкая прозрачность водной толщи, а для хризофитов, по-видимому, еще и низкая температура воды.

Отмечаемый в раннем и среднем голоцене постоянный рост продуктивности сообществ кремнистых микроводорослей указывает на обогащение экосистемы биогенными элементами вследствие продолжающегося потепления климата и развития почвенно-растительного покрова. Повышенное содержание “анциловых” видов диатомей, а также максимальные значения соотношения “цисты : диатомей”, отмеченные как в ладожских отложениях, так в и отложениях малых озер северной части Карельского перешейка, позволяют предположить существование здесь в раннем голоцене единого водного бассейна со сходными гидрохимическими и гидробиологическими обстановками.

В эпоху климатического оптимума голоцена режим биогенных элементов и температурные условия были наиболее благоприятными для развития золотистых водорослей. С этого же времени они вступают в конкурентные отношения с диатомеями, развивающимися в летнем планктоне.

Помимо климатических обстановок, термический режим водоема, а, следовательно, и особенности сезонного развития фитопланктона, определялись в раннем и среднем голоцене также конфигурацией ладожского бассейна, распределением глубин, и связанной с ним сезонной динамикой водных масс.

В ходе похолодания второй половины голоцена диатомовые водоросли, по-видимому, оказались более конкурентоспособными по сравнению с другими представителями ладожского фитопланктона. Несмотря на ухудшение климатических условий, это время (в особенности суббореальный и первая половина субатлантического периодов) оказалось наиболее благоприятными для развития диатомовой флоры, что нашло отражение как в увеличении видового разнообразия, так и в максимальных концентрациях створок в осадках. Изменения термического режима озера и усиление конкуренции со стороны представителей летнего диатомового планктона негативно сказались на развитии золотистых водорослей.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую признательность коллегам из Института озероведения РАН и всем участникам ладожских экспедиций, а также команде НИС “Эколог”. Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН по теме № 0154-2019-0001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арсланов Х.А., Гей Н.А., Давыдова Н.Н., Джиноридзе Р.Н., Кошечкин Б.И., Пушенко М.Я., Рыбалко А.Е., Спиридонов М.А., Субетто Д.А., Хомутова В.И. Новые данные по позднеплейстоценовой и голоценовой истории Ладожского озера // Изв. РГО. 1996. Т. 128. Вып. 2. С. 12–21.
2. Борисова О.К. Ландшафтно-климатические изменения в голоцене // Изв. РАН. Сер. географическая. 2014. № 2. С. 5–20.
3. Волошко Л.Н. Золотистые водоросли водоемов Севера России. СПб: Реноме, 2017. 378 с.
4. Генкал С.И. О морфологической изменчивости диатомовой водоросли *Aulacoseira subarctica* (O. Müller) Haworth // Эколого-физиологические исследования водорослей и их значение для оценки состояния природных вод. Ярославль, 1996. С. 19–20.
5. Давыдова Н.Н. Состав и условия формирования диатомовых комплексов в поверхностном слое донных отложений Ладожского озера // Растительные ресурсы Ладожского озера. Л.: Наука, 1968. С. 131–174.
6. Давыдова Н.Н. Комплексы диатомей в донных отложениях Онежского озера // Палеолимнология Онежского озера. Л.: Наука, 1976. С. 130–191.
7. Давыдова Н.Н. Диатомовые водоросли – индикаторы природных условий водоемов в голоцене. Л.: Наука, 1985. 244 с.

8. Давыдова Н.Н. Развитие экосистемы озера в поздне- и послеледниковые по составу диатомовых комплексов в донных отложениях // Ладожское озеро. Прошлое, настоящее, будущее. СПб.: Наука, 2002. С. 157–164.
9. Жузе А.П. Диатомовые водоросли в морских и континентальных отложениях голоценового возраста // Вопросы голоцена. Вильнюс, 1961. С. 115–139.
10. Жузе А.П., Прошкина-Лавренко А.И., Шешукова-Порецкая В.С. Методы исследования // Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Л.: Наука, 1974. С. 50–79.
11. История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки / Под ред. Д.Д. Квасова, Г.Г. Мартинсона, А.В. Раукаса. Л.: Наука, 1990. 280 с.
12. Квасов Д.Д. Позднечетвертичная история крупных озер и внутренних морей Восточной Европы. Л., 1975. 278 с.
13. Кузнецов Д.Д., Субетто Д.А. Голоценовое накопление органического вещества в донных отложениях Ладожского озера // Геоморфология. 2021. Т. 52. № 2. С. 63–71.
14. Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас / Под ред. В.А. Румянцев. СПб.: Нестор-История, 2015. 200 с.
15. Летаанская Г.И., Протопопова Е.В. Современное состояние фитопланктона Ладожского озера (2005–2009 гг.) // Биология внутренних вод. 2012. № 4. С. 17–24.
16. Лудикова А.В. Диатомовые водоросли отложений восточной части Балтийского ледникового озера // Геология в школе и в вузе: Геология и цивилизация: Мат. IX Международной конф. СПб: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2015. С. 208–212.
17. Лудикова А.В. Диатомовые водоросли позднеледниковых отложений Ладожского озера // Актуальные проблемы современной палинологии: Мат. XIV Всероссийской палинологической конф. М., 2017. С. 163–165.
18. Малаховский Д.Б., Знаменская О.М., Рухина Е.В. Мгинская морская межледниковая толща Северо-Запада РСФСР // Палеогеография озерных и морских бассейнов Северо-Запада СССР в плейстоцене. Л., 1989. С. 44–60.
19. Науменко М.А., Каретников С.Г. Морфометрия и особенности гидрологического режима Ладожского озера // Ладожское озеро. Прошлое, настоящее, будущее. СПб.: Наука, 2002. С. 16–49.
20. Науменко М.А., Каретников С.Г. Особенности многолетних изменений температуры воздуха в северной части Ладожского озера // Успехи современного естествознания. 2017. № 5. С. 114–122.
21. Петрова Н.А. Фитопланктон Ладожского озера // Растительные ресурсы Ладожского озера. Л.: Наука, 1968. С. 73–130.
22. Севастьянов Д.В., Субетто Д.А., Сикацкая Е.Д., Степочкина О.Е. Особенности эволюции озерно-речной сети в бассейне Ладожского озера в голоцене // Вестник СПбГУ. 2001. Сер. 7. Вып. 1. № 7. С. 88–100.
23. Субетто Д.А. Строение, особенности и история формирования донных отложений // Ладожское озеро. Прошлое, настоящее, будущее. СПб.: Наука, 2002. С. 122–136.
24. Субетто Д.А., Давыдова Н.Н., Сапелько Т.В., Вольфарт Б., Вастегорд С., Лосснерт Г. Палеоклимат на Карельском перешейке на рубеже позднего плейстоцена и голоцена по данным изучения донных отложений оз. Медведевского // Изв. РГО. 2002. Т. 134. Вып. 1. С. 47–64.
25. Субетто Д.А. История формирования Ладожского озера и его соединения с Балтийским морем // Terra Humana. 2007. № 1(2). С. 111–120.
26. Субетто Д.А. Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции. СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2009. 343 с.
27. Фирсова А.Д., Лихошвай Е.В. Атлас цист хризофитовых водорослей озера Байкал / Под ред. Г.И. Поповской. Новосибирск: Наука, 2006. 146 с.
28. Alenius T., Gerasimov D., Sapelko T., Ludikova A., Kuznetsov D., Golyeva A., Nordqvist K. Human-environment interaction during the Holocene along the shoreline of the Ancient Lake Ladoga: A case study based on palaeoecological and archaeological material from the Karelian Isthmus, Russia // The Holocene. 2020. V. 30. P. 1622–1636. <https://doi.org/10.1177%2F0959683620941071>
29. Bennion H. Surface-sediment diatom assemblages in shallow, artificial, enriched ponds, and implication for reconstructing trophic status // Diatom Research. 1995. V. 10. P. 1–19.
30. Björck S. A review of the history of the Baltic Sea 13.0–8.0 ka BP // Quaternary International. 1995. V. 27. P. 19–40.
31. Borzenkova I., Zorita E., Borisova O., Kalnina L., Kisielienė D., Koff T., Kuznetsov D., Lemdahl G., Sapelko T., Stančikaitė M., Subetto D. Climate changes during the Holocene // (Past 12000 Years). In: The BACC II Author Team (Ed.). Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin (25–49). Switzerland: Springer. (Regional Climate Studies). https://doi.org/10.1007/978-3-319-16006-1_2.
32. Gromig R., Wagner B., Wennrich V., Fedorov G., Savelieva L., Lebas E., Krastel S., Brill D., Andreev A., Subetto D., Melles M. Deglaciation history of Lake Ladoga (northwestern Russia) based on varved sediments // Boreas. 2019. V. 48. P. 330–348. <https://doi.org/10.1111/bor.12379>

33. *Hedenström A., Risberg J.* Early Holocene shore-displacement in southern central Sweden as recorded in elevated isolated basins // *Boreas*. 1999. V. 28. P. 490–504.
34. *Holopainen A.-L., Letanskaya G.I.* Effects of nutrient load on species composition and productivity of phytoplankton in Lake Ladoga // *Boreal Environmental Research*. 1999. V. 4. P. 215–227.
35. *Horn H., Paul L., Horn W., Petzoldt Th.* Long-term trends in the diatom composition of the spring bloom of a German reservoir: is *Aulacoseira subarctica* favoured by warm winters? *Freshwater Biology*. 2011. V. 56. P. 2483–2499.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2011.02674.x>
36. *Juggins S.* C2 Version 1.5 User guide. Software for ecological and palaeoecological data analysis and visualisation. Newcastle University, Newcastle upon Tyne, 2007. 73 p.
37. *Karetnikov S., Leppäranta M., Montonen A.* A time series of over 100 years of ice seasons on Lake Ladoga // *Journal of Great Lakes Research*. 2017. V. 43. Is. 6. P. 979–988.
<https://doi.org/10.1016/j.jglr.2017.08.010>
38. *Kostrova S.S., Meyer H., Bailey H.L., Ludikova A.V., Gromig R., Kuhn G., Shibaev Yu.A., Kozachek A.V., Ekaykin A.A., Chapligin B.* Holocene hydrological variability of Lake Ladoga as inferred from diatom oxygen isotopes. 2019. *Boreas*. V. 48. P. 361–376.
<https://doi.org/10.1111/bor.12385>
39. *Kristiansen J., Škaloud P.* (2016) Chrysophyta. In: Archibald J. et al. (eds) *Handbook of the Protists*. Springer, Cham. P. 1–38.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-32669-6_43-1
40. *Ludikova A.V., Shatalova A.E., Subetto D.A., Kublitskiy Yu.A., Rosentau A., Hang T.* Diatom-inferred palaeolimnological changes in a small lake in the context of the Holocene Baltic Sea transgressions: a case study of Lake Goluboye, Karelian Isthmus (NW Russia) // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2020. V. 438. Article number: 012014.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/438/1/012014>
41. *Ludikova A.V.* Long-term studies of surface-sediment diatom assemblages in assessing the ecological state of Lake Ladoga, the largest European lake // *Geography, Environment, Sustainability*. 2021. V. 14. № 1. P. 251–262.
<https://doi.org/10.24057/2071-9388-2020-174>
42. *Saarnisto M., Grönlund T.* Shoreline displacement of Lake Ladoga – new data from Kilpolansaari // *Hydrobiologia*. 1996. V. 322. P. 205–215.
43. *Saarnisto M., Saarinen T.* Deglaciation chronology of the Scandinavian Ice Sheet from the Lake Onega Basin to the Salpausselkä End Moraines // *Global and Planetary Change*. 2001. V. 31. P. 387–405.
44. *Sapelko T., Pozdnyakov S., Kuznetsov D., Ludikova A., Ivanova E., Guseva M., Zazovskaya E.* Holocene sedimentation in the central part of Lake Ladoga // *Quaternary International*. 2019. V. 524. P. 67–75.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.05.028>
45. *Smol J.P.* The ratio of diatom frustules to chrysophycean statospores: a useful paleolimnological index // *Hydrobiologia*. 1985. V. 123. P. 199–208.
46. *Sochuliaková L., Sienkiewicz E., Hamerlík L., Svitok M., Fidlerová D., Bitušík P.* Reconstructing the trophic history of an alpine lake (High Tatra Mts.) using subfossil diatoms: disentangling the effects of climate and human influence. *Water, Air and Soil Pollution*. 2018. V. 229. Article number: 289.
<https://doi.org/10.1007/s11270-018-3940-9>
47. *Subetto D.A., Davydova N.N., Rybalko A.E.* Contribution to the lithostratigraphy and history of lake Ladoga. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* // 1998. V. 140. P. 113–119.
48. *The Diatoms: Applications for the Environmental and Earth Sciences*. 2nd ed. / Ed. by J.P. Smol, E.F. Stoermer. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 667 p.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511763175>
49. *Virtasalo J.J., Ryabchuk D., Kotilainen A.T., Zhamoida V., Grigoriev A., Sivkov V., Dorokhova E.* Middle Holocene to present sedimentary environment in the easternmost Gulf of Finland (Baltic Sea) and the birth of the Neva River // *Marine Geology*. 2014. V. 350. P. 84–96.
<https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.02.003>

Siliceous Microalgae in the Lake Ladoga Sediments and their Significance in Paleolimnological Reconstructions

A. V. Ludikova¹, * and D.D. Kuznetsov¹, **

¹*Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia*

*E-mail: ellerbeckia@yandex.ru

**E-mail: dd_kuznetsov@mail.ru

Diatoms are traditionally applied in studies of the evolution of the Lake Ladoga ecosystem in the late- and postglacial times. The diatoms possess siliceous frustules that are well-preserved in sediments, which enables studying the sedimentary diatom assemblages composition and its variations in time. Cysts of the golden algae (chrysophytes) constitute the second most abundant group of siliceous microfossils in the Ladoga sediments. However, they have not been used in paleoreconstructions until recently. In the present study, we compare the diatom record in the sediment core obtained from the central part of the Lake Ladoga with the absolute and relative abundances of chrysophyte cysts. The study is aimed at reconstruction of the Holocene paleoenvironments in the Lake Ladoga and assessment of the indicative value of the chrysophyte cysts in the studies of the Lake Ladoga evolution. We also made an effort to interpret the information of the diatom assemblages composition and abundances of the siliceous microalgae in terms of the changing duration of hydrological and hydrobiological seasons resulted from the Lake Ladoga level changes and climatic shifts in the past.

Keywords: diatoms, golden algae, chrysophyte cysts, Lake Ladoga, evolution of lake ecosystem, Holocene, paleoreconstructions

REFERENCES

- Arslanov H.A., Gej N.A., Davydova N.N., Dzhinoridze R.N., Koshechkin B.I., Pushenko M.Ya., Rybalko A.E., Spiridonov M.A., Subetto D.A., Homutova V.I. Novye dannye po pozднеplejstocеновой i golocеновой istorii Ladozhского озера // *Izv. RGO*. 1996. V. 128. No. 2. S. 12–21.
- Borisova O.K. Landshaftno-klimaticheskie izmeneniya v golocene // *Izv. RAN. Ser. geograficheskaya*. 2014. № 2. S. 5–20.
- Voloshko L.N. Zolotistye vodorosli vodoemov Severa Rossii. SPb: Renome, 2017. 378 s.
- Genkal S.I. O morfologicheskoy izmenchivosti diatomovoy vodorosli *Aulacoseira subarctica* (O. Müller) Haworth // *Ekologo-fiziologicheskie issledovaniya vodoroslej i ih znachenie dlya ocenki sostoyaniya prirodnyh vod. Yaroslavl'*, 1996. S. 19–20.
- Davydova N.N. Sostav i usloviya formirovaniya diatomovykh kompleksov v poverhnostnom sloe donnyh otlozhenij Ladozhского озера // *Rastitel'nye resursy Ladozhского озера*. L.: Nauka, 1968. S. 131–174.
- Davydova N.N. Kompleksy diatomej v donnyh otlozheniyah Onezhского озера // *Paleolimnologiya Onezhского озера*. L.: Nauka, 1976. S. 130–191.
- Davydova N.N. Diatomovye vodorosli – indikatorы prirodnyh uslovij vodoemov v golocene. L.: Nauka, 1985. 244 s.
- Davydova N.N. Razvitiye ekosistemy озера v pozдне- i poslednikov'e po sostavu diatomovykh kompleksov v donnyh otlozheniyah // *Ladozhskoe ozero. Proshloe, nastoyashhee, budushhee*. SPb.: Nauka, 2002. S. 157–164.
- Zhuze A.P. Diatomovye vodorosli v morskikh i kontinental'nyh otlozheniyah golocенового vozrasta // *Voprosy golocena. Vil'nyus*, 1961. S. 115–139.
- Zhuze A.P., Proshkina-Lavrenko A.I., Sheshukova-Poreczkaya V.S. Metody issledovaniya // *Diatomovye vodorosli SSSR (iskopaemye i sovremennye)*. L.: Nauka, 1974. S. 50–79.
- Istoriya Ladozhского, Onezhского, Pskovsko-Chudского озер, Bajkala i Hanki / Pod red. D.D. Kvasova, G.G. Martinsona, A.V. Raukasa. L.: Nauka, 1990. 280 s.
- Kvasov D.D. Pozднеchetvertichnaya istoriya krupnyh озер i vnutrennih morej Vostochnoj Evropy. L., 1975. 278 s.
- Kuznecov D.D., Subetto D.A. Golocеновое nakoplenie organicheskogo veshhestva v donnyh otlozheniyah Ladozhского озера // *Geomorfologiya*. 2021. V. 52. No. 2. S. 63–71.
- Ladozhskoe ozero i dostoprimechatel'nosti ego poberezh'ya. Atlas / Pod red. V.A. Rumyanцева. SPb.: Nestor-Istoriya, 2015. 200 s.
- Letanskaya G.I., Protopopova E.V. Sovremennoe sostoyanie fitoplanktona Ladozhского озера (2005–2009 gg.) // *Biologiya vnutrennih vod*. 2012. № 4. S. 17–24.
- Ludikova A.V. Diatomovye vodorosli otlozhenij vostochnoj chasti Baltijsкого lednikovogo озера // *Geologiya v shkole i v vuzе: Geologiya i civilizaciya: Mat. IX Mezhdunarodnoj konf. SPb: Izd-vo RGPU im. A.I. Gercena*, 2015. C. 208–212.
- Ludikova A.V. Diatomovye vodorosli pozднеlednikovyx otlozhenij Ladozhского озера // *Aktual'nye problemy sovremennoj palinologii: Mat. XIV Vserossijskoj palinologicheskoy konf. M.*, 2017. S. 163–165.
- Malahovskij D.B., Znamenskaya O.M., Ruhina E.V. Mginginskaya morskaya mezhlednikovaya tolsha Severo-Zapada RSFSR // *Paleogeografiya ozernyx i morskikh bassejnov Severo-Zapada SSSR v plejstocene*. L., 1989. S. 44–60.

19. Naumenko M.A., Karetnikov S.G. Morfometriya i osobennosti gidrologicheskogo rezhima Ladozhskogo ozera // Ladozhskoe ozero. Proshloe, nastoyashhee, budushhee. SPb.: Nauka, 2002. S. 16–49.
20. Naumenko M.A., Karetnikov S.G. Osobennosti mnogoletnih izmenenij temperatury vozduha v severnoy chasti Ladozhskogo ozera // Uspehi sovremennogo estestvoznaniya. 2017. No. 5. S. 114–122.
21. Petrova N.A. Fitoplankton Ladozhskogo ozera // Rastitel'nye resursy Ladozhskogo ozera. L.: Nauka, 1968. S. 73–130.
22. Sevast'yanov D.V., Subetto D.A., Sikaczkaya E.D., Stepochkina O.E. Osobennosti evolyucii ozer-no-rechnoj seti v bassejne Ladozhskogo ozera v golocene // Vestnik SPbGU. 2001. Ser. 7. No. 1 (№ 7). S. 88–100.
23. Subetto D.A. Stroenie, osobennosti i istoriya formirovaniya donnyh otlozhenij // Ladozhskoe ozero. Proshloe, nastoyashhee, budushhee. SPb.: Nauka, 2002. S. 122–136.
24. Subetto D.A., Davydova N.N., Sapelko T.V., Vol'fart B., Vastegord S., Possnert G. Paleoklimat na Karel'skom pereshejke na rubezhe pozdnego plejstocena i golocena po dannym izucheniya donnyh otlozhenij oz. Medvedevskogo // Izv. RGO. 2002. V. 134. No. 1. S. 47–64.
25. Subetto D.A. Istoriya formirovaniya Ladozhskogo ozera i ego soedineniya s Baltijskim morem // Terra Humana. 2007. № 1(2). S. 111–120.
26. Subetto D.A. Donnye otlozheniya ozer: paleolimnologicheskie rekonstrukcii. SPb.: Izd-vo RGPU im. A.I. Gercena, 2009. 343 s.
27. Firsova A.D., Lihoshvay E.V. Atlas cist hrizofitovyh vodoroslej ozera Bajkal / Pod. red. G.I. Popovskoj. Novosibirsk: Nauka, 2006. 146 s.
28. Alenius T., Gerasimov D., Sapelko T., Ludikova A., Kuznetsov D., Golyeva A., Nordqvist K. Human-environment interaction during the Holocene along the shoreline of the Ancient Lake Ladoga: A case study based on palaeoecological and archaeological material from the Karelian Isthmus, Russia // The Holocene. 2020. V. 30. P. 1622–1636. <https://doi.org/10.1177%2F0959683620941071>
29. Bennion H. Surface-sediment diatom assemblages in shallow, artificial, enriched ponds, and implication for reconstructing trophic status // Diatom Research. 1995. V. 10. P. 1–19.
30. Björck S. A review of the history of the Baltic Sea 13.0–8.0 ka BP // Quaternary International. 1995. V. 27. P. 19–40.
31. Borzenkova I., Zorita E., Borisova O., Kalnina L., Kisielienė D., Koff T., Kuznetsov D., Lemdahl G., Sapelko T., Stančikaitė M., Subetto D. Climate changes during the Holocene // (Past 12,000 Years). In: The BACC II Author Team (Ed.). Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin (25–49). Switzerland: Springer. (Regional Climate Studies). https://doi.org/10.1007/978-3-319-16006-1_2.
32. Gromig R., Wagner B., Wennrich V., Fedorov G., Savelieva L., Lebas E., Krastel S., Brill D., Andreev A., Subetto D., Melles M. Deglaciation history of Lake Ladoga (northwestern Russia) based on varved sediments // Boreas. 2019. V. 48. P. 330–348. <https://doi.org/10.1111/bor.12379>
33. Hedenström A., Risberg J. Early Holocene shore-displacement in southern central Sweden as recorded in elevated isolated basins // Boreas. 1999. V. 28. R. 490–504.
34. Holopainen A.-L., Letanskaya G.I. Effects of nutrient load on species composition and productivity of phytoplankton in Lake Ladoga // Boreal Environmental Research. 1999. V. 4. P. 215–227.
35. Horn H., Paul L., Horn W., Petzoldt Th. Long-term trends in the diatom composition of the spring bloom of a German reservoir: is *Aulacoseira subarctica* favoured by warm winters? Freshwater Biology. 2011. V. 56. P. 2483–2499. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2011.02674.x>
36. Juggins S. C2 Version 1.5 User guide. Software for ecological and palaeoecological data analysis and visualisation. Newcastle University, Newcastle upon Tyne, 2007. 73 p.
37. Karetnikov S., Leppäranta M., Montonen A. A time series of over 100 years of ice seasons on Lake Ladoga // Journal of Great Lakes Research. 2017. V. 43. Is. 6. P. 979–988. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2017.08.010>
38. Kostrova S.S., Meyer H., Bailey H.L., Ludikova A.V., Gromig R., Kuhn G., Shibaev Yu.A., Kozachek A.V., Ekaykin A.A., Chaplgin B. Holocene hydrological variability of Lake Ladoga as inferred from diatom oxygen isotopes. 2019. Boreas. V. 48. P. 361–376. <https://doi.org/10.1111/bor.12385>
39. Kristiansen J., Škaloud P. (2016) Chrysophyta. In: Archibald J. et al. (eds) Handbook of the Protists. Springer, Cham. P. 1–38. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32669-6_43-1
40. Ludikova A.V., Shatalova A.E., Subetto D.A., Kublitskiy Yu.A., Rosentau A., Hang T. Diatom-inferred palaeolimnological changes in a small lake in the context of the Holocene Baltic Sea transgressions: a case study of Lake Goluboye, Karelian Isthmus (NW Russia) // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2020. V. 438. Article number: 012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/438/1/012014>.
41. Ludikova A.V. Long-term studies of surface-sediment diatom assemblages in assessing the ecological state of Lake Ladoga, the largest European lake // Geography, Environment, Sustainability. 2021. V. 14. No. 1. P. 251–262. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2020-174>

42. Saarnisto M., Grönlund T. Shoreline displacement of Lake Ladoga – new data from Kilpolansaari // *Hydrobiologia*. 1996. V. 322. P. 205–215.
43. Saarnisto M., Saarinen T. Deglaciation chronology of the Scandinavian Ice Sheet from the Lake Onega Basin to the Salpausselkä End Moraines // *Global and Planetary Change*. 2001. V. 31. P. 387–405.
44. Sapelko T., Pozdnyakov S., Kuznetsov D., Ludikova A., Ivanova E., Guseva M., Zazovskaya E. Holocene sedimentation in the central part of Lake Ladoga // *Quaternary International*. 2019. V. 524. P. 67–75. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.05.028>
45. Smol J.P. The ratio of diatom frustules to chrysophycean statospores: a useful paleolimnological index // *Hydrobiologia*. 1985. V. 123. P. 199–208.
46. Sochuliaková L., Sienkiewicz E., Hamerlík L., Svitok M., Fidlerová D. and Bitušík P. Reconstructing the trophic history of an alpine lake (High Tatra Mts.) using subfossil diatoms: disentangling the effects of climate and human influence. *Water, Air and Soil Pollution*. 2018. V. 229. Article number: 289. <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3940-9>
47. Subetto D.A., Davydova N.N. and Rybalko A.E. Contribution to the lithostratigraphy and history of lake Ladoga. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* // 1998. V. 140. P. 113–119.
48. *The Diatoms: Applications for the Environmental and Earth Sciences*. 2nd ed. / Ed. by J.P. Smol, E.F. Stoermer. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 667 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511763175>
49. Virtasalo J.J., Ryabchuk D., Kotilainen A.T., Zhamoida V., Grigoriev A., Sivkov V., Dorokhova E. Middle Holocene to present sedimentary environment in the easternmost Gulf of Finland (Baltic Sea) and the birth of the Neva River // *Marine Geology*. 2014. V. 350. P. 84–96. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.02.003>

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 палеореконструкции наиболее перспективны. Установлены участки акватории, в которых интерпретация полученных результатов затруднена, а палеореконструкции 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 палеореконструкциях 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,

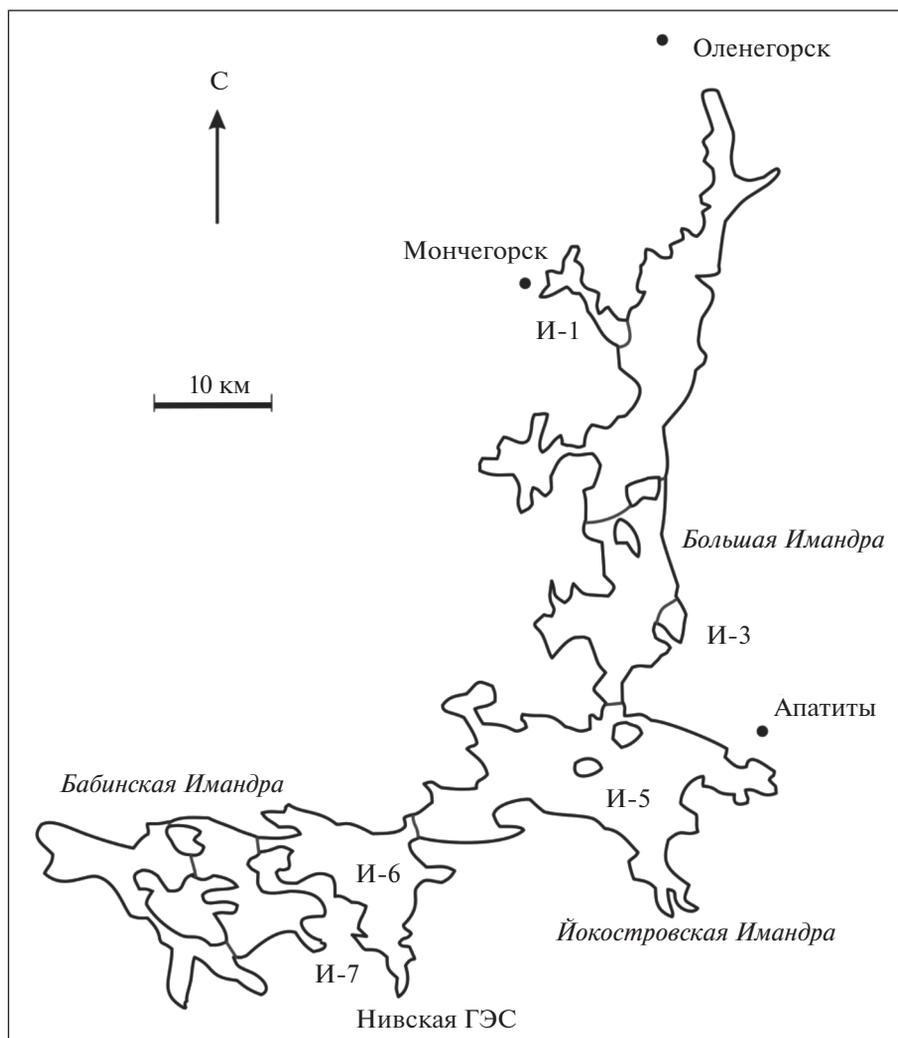


Рис. 1. Карта-схема районирования оз. Имандра [12]. Пояснения в тексте.

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-

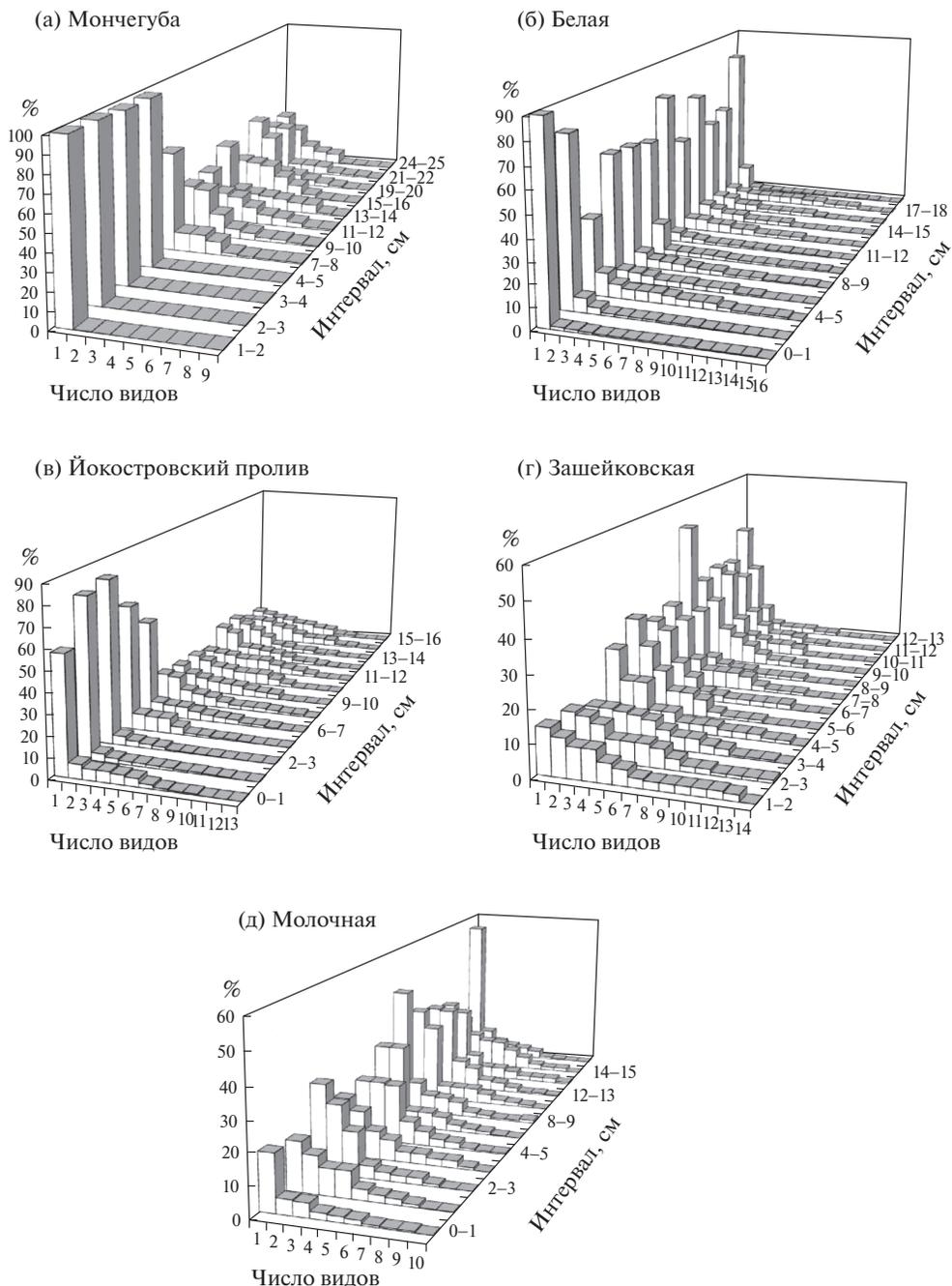


Рис. 2. Гистограммы таксономических пропорций в диатомовых комплексах из колонок донных отложений оз. Имандра.

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 палеореконокструкций 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 палеореконокструкции 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.: Гидрометеиздат, 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., Даувальтер 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.: Гостехтеориздат, 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 Murmanskoj oblasti. M.: GUGK pri Sovete Ministrov SSSR, 1971. 33 s.
2. Bardan S.I. Dinamika obmennyh processov v planktonnom soobshhestve v svete teorii ekologicheskikh modifikacij // *Ekologicheskie modifikacii 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 – indikatorы prirodnyh uslovij vodoemov v golocene. L.: Nauka, 1985. 243 s.
4. Denisov D.B. Izmenenie gidrohimicheskogo sostava i diatomovoj flory donnyh otlozhenij v zone vozdejstviya gornorudnogo proizvodstva // *Vodnye resursy*. 2007. V. 34. No. 6. S. 719–730.
5. Kagan L.Ya. Izmenenie soobshhestv diatomovyh vodoroslej pri antropogennom preobrazovanii ekosistemy oz. Imandra // *Vodnye resursy*. 2001. T. 28. № 3. S. 329–338.
6. Kagan L.Ya. Rekonstrukciya istoricheskogo proshlogo po diatomovym kompleksam iz donnyh otlozhenij // *Antropogennye modifikacii ekosistemy ozera Imandra*. M.: Nauka, 2002. S. 227–256.
7. Kryuchkov V.V., Moiseenko T.I., Yakovlev V.A. Ekologiya vodoemov-ohladiatelyh v usloviyah 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 antropogennyh nagruzok na vodoemy Subarktiki. Apatity: KNCz RAN, 1997. 261 s.
10. Moiseenko T.I., Gashkina N.A. Formirovanie himicheskogo sostava vod ozer v usloviyah izmeneniya okruzhayushhej sredy. M.: Nauka, 2010. 276 s.
11. Moiseenko T.I., Dauval'ter V.A., Lukin A.A., Kudryavceva L.P. i dr. Antropogennye modifikacii ekosistemy ozera Imandra. M.: Nauka, 2002. 403 s.
12. Moiseenko T.I., Sandimirov S.S. Antropogennaya nagruzka // *Antropogennye modifikacii ekosistemy ozera Imandra*. M.: Nauka, 2002. S. 24–31.
13. Razumovskij L.V., Moiseenko T.I. Ocenka prostranstvenno-vremennyh transformacij ozernyh ekosistem metodom diatomovogo analiza // *Doklady Akademii nauk*. 2009. V. 429. No. 3. S. 274–277.
14. Razumovskij L.V., Razumovskij V.L., Chudaev D.A., Gololobova M.A. Diatomovye vodorosli iz donnyh otlozhenij ozera Karakel' (Central'nyj Kavkaz) i rekonstrukciya regional'nyh 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.

К 90-летию Н.Н. Давыдовой

**РЕКОНСТРУКЦИЯ ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ
ПОЗДНЕЛЕДНИКОВЬЯ-ГОЛОЦЕНА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ КАРЕЛИИ
(НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА ОЗЕРНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ
ОЗЕРА ЮЖНОЕ ХАУГИЛАМПИ)**

© 2021 г. Т. С. Шелехова^{a, *}, Н. Б. Лаврова^{a, **}, Д. А. Субетто^{b, ***}

^aИнститут геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия

^bРоссийский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена,
Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: shelekh@krc.karelia.ru

**E-mail: lavrova@krc.karelia.ru

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

Поступила в редакцию 21.05.2021 г.

После доработки 30.05.2021 г.

Принята к публикации 30.06.2021 г.

Результаты диатомового, палинологического, радиоуглеродного анализов позволили установить, что накопление толщи донных отложений озера Южное Хаугилампи происходило на протяжении последних 13–12 тыс. календарных лет. В позднеледниковье в водоеме формировались терригенные осадки (пески, глины), а начиная с пребореала – органогенные (гиттия). Реконструкции динамики растительности охватывают временной интервал от позднего дриаса до настоящего времени. После отступления ледника последнего валдайского оледенения на территории исследования распространилась перигляциальная (*Artemisia*-*Chenopodiaceae*) растительность, тундровые и лесотундровые березовые сообщества. В пребореале тундровая и лесотундровая растительность сменилась березовыми редкостойными лесами. Позже, в бореальное время сосновые среднетаежные леса достигли максимального развития. В атлантическое время среднетаежные леса сменяются южнотаежными сосновыми и еловыми лесами с участием термофильных пород. Среднетаежный облик леса начали приобретать в позднем голоцене. В позднеледниковье в водоеме диатомовая флора практически не развивалась. В осадках этого времени выявлены лишь единичные, возможно переотложенные створки морских диатомей, а также незначительное количество пионерных видов – обрастателей и донных. В пребореальном периоде в озере развивается довольно скудный по численности и разнообразию диатомовый комплекс, представленный пионерными формами, характерными для многих северных водоемов: *Ellebeckia arenaria*, *Pseudostaurosira brevistriata* и др. Массовая вегетация диатомовых водорослей начинается с бореального периода. Прослежена динамика развития озера с позднего дриаса до суббореального времени.

Ключевые слова: позднеледниковье, голоцен, донные отложения, спорово-пыльцевой анализ, диатомовый анализ, озеро Южное Хаугилампи, Центральная Карелия

DOI: 10.31857/S0869607121060070

ВВЕДЕНИЕ

Изучение динамики природной среды в позднем неоплейстоцене-голоцене (позднеледниковье-последледниковье) необходимо для понимания современного ее состояния и прогноза развития экосистем в условиях глобальных климатических изменений. Донные отложения озер представляют собой детальную непрерывную летопись изменений условий палеосреды, дают возможность реконструировать эволюцию озер и природно-климатических изменений в позднем неоплейстоцене-голоцене [17].

Особый интерес к исследованной территории обусловлен тем, что она подвергалась неоднократным оледенениям, которые полностью изменяли существовавшие ландшафты. Расположение территории исследования между краевыми образованиями невской стадии и стадией сальпаусселькя I (ругозерской) позволяет предположить, что она освободилась от льда между 12500–10800 ^{14}C лет назад [24]. По данным [29, 34], формирование краевых гряд сальпаусселькя I завершилось в начале позднего дриаса, около ~10700 ^{14}C л. н. Следует отметить, что когда ледник отступил в пределы Фенноскандинавского кристаллического щита, то он был слабо обогащен обломками устойчивых к эрозии кристаллических пород и, лишенный супрагляциального комплекса, быстро таял. Согласно полученным ранее данным, озера образовывались практически сразу после таяния ледника [8]. Известно, что время их зарождения было гетерохронным в зависимости от типа котловины, геоморфологического положения и климатических условий. С этих позиций определение возраста малых озер на обширной территории между конечными моренами невской стадии и стадии сальпаусселькя I представляют значительный интерес.

Центральная Карелия в палеогеографическом отношении остается малоизученной. В XX в. опубликованы спорово-пыльцевые диаграммы озерно-болотных отложений болот Мини-Тумба и Чудесное, где формирование озерных отложений в первом из них по палинологическим данным было отнесено к позднему дриасу. Во втором болоте были вскрыты лишь торфяные отложения, начало накопления которых датируется бореалом (8450 ^{14}C л. н.) [10]. Данные о диатомовой флоре для территории исследования отсутствуют.

Целью настоящих исследований стало изучение времени зарождения одного из малых озер Центральной Карелии и установление этапов его развития, особенностей осадконакопления и эволюции растительного покрова водосбора со времени дегляциации территории.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ

Озеро Южное Хаугилампи расположено в Медвежьегорском районе Республики Карелия в пределах восточной окраины Фенноскандинавского кристаллического щита (63°33.224' с.ш.; 33°20.262' в.д.; урез воды – 153 м над уровнем моря (рис. 1).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Весной 2018 г. со льда была пробурена скважина и отобран керн донных осадков, мощностью 350 см, послуживший материалом для данной работы. Глубина воды в месте отбора колонки 250 см. Сверху вниз были вскрыты следующие осадки:
250–350 см – гомогенный черный сапропель с редкими растительными остатками;
350–410 см – гомогенный желеобразный черно-оливковый сапропель с растительными остатками;
410–450 см – черный обводненный слегка разжиженный сапропель;
410–510 см – черный гомогенный сапропель с редкими волосовидными растительными остатками;
510–530 см – черный гомогенный сапропель;



Рис. 1. Местоположение оз. Южное Хаугилампи и изученного разреза. Звездочкой обозначено место отбора колонки донных отложений. Границы стадий дегляциации (^{14}C лет назад – по [24]): Vp + Kг (вепсовско-крестецкой); Lg (лужской): 14200–13200; Nv (невской): 12500–11900; Rg (ругозерской – сальпауссельья I): 11300–10800; Kl (калевальской – сальпауссельья II): 10500–10200.

Fig. 1. Location of the lake Yuzhnoye Haugilampi and the studied section. The asterisk marks the place where the bottom sediment core was taken. Boundaries of deglaciation stages (^{14}C years ago – according [24]): Vp + Kг (Vepsovian-Krestets); Lg (Luga): 14200–13200; Nv (Neva): 12500–11900; Rg (Rugozerian – Salpausselkä I): 11300–10800; Kl (Kalevala – Salpausselkä II): 10500–10200.

530–538 см – слой коричневатого-черного гомогенного сапропеля;

538–564 см – диатомовый? сапропель зеленовато-оливкового цвета (внутри слоя 564–554 см сапропель зеленовато-серого цвета с большим количеством органики);

564–574 см – сапропель черного цвета;

574–578 см – прослой песка с органикой серовато-черного цвета;

578–583 см – песок мелко-тонкозернистый отмытый, с включениями гравия до 1 см;

583–600 см – отмытая гравийная смесь с включениями мелкой гальки до 3–4 см в диаметре.

Образцы на микропалеонтологические анализы отобраны послойно, каждые 5–10 см. Обработка проб для спорово-пыльцевого анализа осуществлялась по общепринятым методикам [16]. При идентификации пыльцевых зерен привлекали справочники-определители [2, 12, 13, 31 и др.], а также эталонную коллекцию пыльцы и спор Института геологии КарНЦ РАН. Спорово-пыльцевая диаграмма построена с использованием компьютерных программ TILIA-2 [25] и TILIA GRAPH [26]. Процентное содержание пыльцы и спор рассчитывались следующим образом. Общая суммы пыльцы древесных и кустарниковых пород (ΣAP), кустарничковой и травянистой растительности (ΣNAP) была принята за 100% ($\Sigma\text{AP} + \Sigma\text{NAP} = 100\%$). Содержание водной (Q) и споровой (F) растительности вычислялось от $\Sigma\text{AP} + \Sigma\text{NAP} + \Sigma\text{Q}$ и $\Sigma\text{AP} + \Sigma\text{NAP} + \Sigma\text{F}$. На основании изменения состава и соотношений компонентов спорово-пыльцевых спектров (СПС) и применения кластерного анализа (CONISS) выделены палинологические зоны (ПЗ). Полученные результаты сопоставлены с данными радиоуглеродно-

Таблица 1. Радиоуглеродный и калиброванный возраст донных отложений оз. Южное Хаугилампи
Table 1. Radiocarbon and calibrated age of bottom sediments of the lake Yuzhnoye Haugilampi

№ п/п	IGAN AMS Лаб. номер	Глубина отбора от поверхности воды, см	Тип отложений для датирования	Радиоуглерод- ный возраст, лет назад (1σ)	Калиброванный возраст*, лет назад 68,3% (1σ)
1	6712	574–578	Растительные остатки	10660 ± 40	12597–12681
2	6711	570–574	Растительные остатки	10850 ± 35	12706–12747
3	6710	533–537	Растительные остатки	10085 ± 35	11415–11423
4	6709	485–490	Растительные остатки	8900 ± 30	9937–9997
5	6708	380–385	Растительные остатки	6710 ± 25	7567–7597
6	6707	280–285	Растительные остатки	5520 ± 20	6289–6314

Примечание. * RADIOCARBON CALIBRATION PROGRAM CALIB REV7.1.0 Copyright 1986–2018. M. Stuiver and P.J. Reimer. References for calibration datasets: Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Buck C.E., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hafllidason H., Hajdas I., Hatt G.C., Heaton T.J., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., Manning S.W., Niu M., Reimer R.W., Richards D.A., Scott E.M., Southon J.R., Turney C.S.M., van der Plicht J. IntCal13 and MARINE13 radiocarbon age calibration curves 0–50000 years calBP Radiocarbon 55(4). DOI: 10.2458/azu_js_rc.55.16947

го датирования. Основой периодизации разреза донных отложений послужили схема Блитта–Сернандера, модифицированная Н.А. Хотинским [19] и уточненная для Карелии Г.А. Елиной [10]. Параллельно с палинологическим исследованием в образцах проведено видовое определение водорослей *Pediastrum* по [27].

Техническая обработка проб и приготовление постоянных препаратов на диатомовый анализ выполнялись по общепринятой методике [7, 9]; при идентификации флоры использовалась различная справочная литература [1, 3–6, 11, 15, 28, 32, 35]. На радиоуглеродное датирование были отобраны шесть образцов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты радиоуглеродного анализа представлены в табл. 1.

В результате спорово-пыльцевого анализа в донных осадках озера Южное Хаугилампи выделено шесть ПЗ (рис. 2).

Первый образец, отобранный в крупнозернистых песках (глубина 600–582 см), оказался немым. Вероятно, это обусловлено тем, что пыльца и споры аккумулируются в более тонкой фракции, имеющей такую же скорость седиментации. Скорость осадения песка несравнимо выше, чем пыльцевых зерен.

ПЗ I (глубина 582–575 см) (песок мелко- и тонкозернистый отмытый, с включениями гравия до 1 см) характеризуется наиболее высоким содержанием пыльцы травянистых растений и кустарничков (60–70%), преимущественно *Betula nana* L. (27%) и Ericales (15–20%), *Artemisia* (1–10%), вклад которых снижается к верхней границе палинозоны. Количество Сурегасеае, напротив, увеличивается до 10%. Доля пыльцы *Betula* sect. *Albae* (главным образом, *Betula czerepanovii* N.I.Orlova) возрастает от 10 до 25%, а доля *Pinus* колеблется в пределах 5–7%. Вклад пыльцы *Picea* составляет 3%; у верхней границе зоны эта пыльца отсутствует. Из травянистых следует отметить пыльцу Caryophyllaceae, Brassicaceae, Polygonaceae, *Rumex*, *Saxifraga*, *Rubus chamaemorus* L. В группе споровых преобладают Bryales, Lycopodiaceae, Polypodiaceae. Идентифицированы споры Нератицае, *Selaginella selaginoides* (L.) Link. Описанные спорово-пыльцевые

спектры отражают наиболее холодный период за все время накопления осадков. Согласно полученным данным, можно предположить, что СПС ПЗ I формировались на заключительном этапе позднего дриаса. Даты 10660 ± 40 ^{14}C л. н./12597–12681 кал. л. н. (глубина 574–578 см), 10850 ± 35 ^{14}C л. н. или 12706–12747 кал. л. н. (глубина 570–574 см) не соотносятся с данными палинологического анализа и, на наш взгляд, являются несколько завышенными (в сторону большего возраста), что, возможно, связано с перетолжением более древней органики.

На окружающей территории наиболее широко были распространены ерниково-зеленомошные и кустарничковые тундровые палеосообщества (*Betula nana*, *Salix*, *Ericales*, *Rubus chamaemorus*, *Selaginella selaginoides*, *Lycopodium pungens* Alderw, *Bryales*). Роль пионерных полынно-маревых ценозов была уже менее значительной. Возможно, березы (*Betula czerepanovii*, в меньшей степени *Betula pubescens* (Ehrh.)) создавали островные лесотундровые сообщества, ограниченные благоприятными, защищенными от ветра местообитаниями. Учитывая высокую летучесть пыльцы сосны, можно предположить, что практически вся она была дальнезаносной. В озере были распространены водоросли *Pediastrum* (*P. integrum* var. *integrum*, *P. kawraiskyi*, *P. privum*), характерные для холодных олиготрофных водоемов. Самое высокое количество спор плаунов за всю историю накопления отложений, присутствие *Hepaticae* и низкая насыщенность осадков пылью указывает на то, что растительный покров был несомкнутым. Это послужило причиной денудации поверхностных отложений на водосборе и поступления в водоем обломочного минерального материала.

ПЗ II (глубина 575–500 см) отличается увеличением количества пыльцы древесной растительности, главным образом, *Betula* sect. *Albae* (*Betula pubescens*), которая достигает своего максимума у верхней границы палинозоны. Между тем, некоторые особенности СПС позволяют выделить в рамках палинозоны II две подзоны. Подзона **ПЗ II а** (575–547 см) характеризуется ростом количества пыльцы *Betula* sect. *Albae* и снижением количества пыльцы *Betula nana*, *Ericales*, *Superaceae*, спор *Bryales*. Зафиксирована пыльца *Salix*, *Alnus*. В подзоне **ПЗ II б** (547–501 см) отмечается стабильно высокое содержание пыльцы *Betula* sect. *Albae* (65–70%), увеличение содержания пыльцы *Pinus*, дальнейшее снижение вклада пыльцы и спор вышеперечисленных видов и групп (*Betula nana*, *Ericales*, *Bryales*). В обеих подзонах присутствует пыльца *Juniperus*. В спектрах подзоны ПЗ II б отмечены пылевые зерна *Typha* sp., *Potamogeton*, *Sparganium*, *Myriophyllum alterniflorum* DC, а также колонии водорослей *Pediastrum*. Следует отметить, что начиная с глубины 450 см и в вышележащих отложениях встречаются устья сосны, что указывает на то, что эта порода произрастала на изучаемой территории. Полученные палинологические данные и сравнение их с региональными спектрами свидетельствуют о том, что СПС палинозоны II формировались в пребореальное время. Это подтверждается и радиоуглеродной датой 10085 ± 35 ^{14}C л. н./11415–11423 кал. л. н. (глубина 533–537 см) (см. табл. 1).

Увеличение содержания пыльцы древесных растений было обусловлено значительным улучшением климатических условий. Это благоприятствовало распространению, в первую очередь, березы, как пионерной породы. На изучаемой территории доминировали березовые лесотундровые сообщества, которые позже сменились березовыми и сосново-березовыми редкостойными лесами северотаежного облика. О редкостойности древесных палеосообществ свидетельствует присутствие в СПС пыльцы разнообразных плаунов и можжевельника. В то время мелководья водоема начинают зарастать водно-болотными видами. Среди водорослей *Pediastrum* появились более теплолюбивые виды *Pediastrum boryanum* var. *boryanum* и *P. duplex* var. *duplex*. Распространение водорослей, прибрежно-водных растений и закрепление субстратов растительностью, препятствующей сносу минерального материала в палеоводоем, а также активное почвообразование привели к снижению интенсивности денудацион-

ных процессов на водосборе, уменьшению твердого стока в озеро и, как следствие, к смене условий накопления отложений от минеральных осадков к органогенным (или и гиттии).

Нижняя граница ПЗ III (глубина 500–458 см) маркируется значительным увеличением количества пыльцы *Pinus* (50%) и снижением содержания пыльцы *Betula* sect. *Albae* (42–45%). Появляется в СПС пыльца *Ulmus*, увеличивается процентное содержание зерен *Alnus* (в т. ч. *Alnus glutinosa*). Среди спор преобладают Bryales (2–4%), Polypodiaceae (1–3%), Lycopodiaceae (~2%). Идентифицированы пыльца *Juniperus*, споры *Pteridium aquilinum*. В группе травянистых растений доминирует пыльца Сугерасеae, увеличивается частота встречаемости пыльцы Asteraceae, *Filipendula ulmaria*, Ranunculaceae. Помимо пыльцевых зерен *Typha*, *Potamogeton* и *Sparganium* появляется пыльца *Nymphaea*. Верхняя граница палинозоны проведена выше максимума содержания пыльцы *Pinus*. Согласно данным спорово-пыльцевого анализа палиноспектры рассматриваемой ПЗ формировались в бореальный период, что согласуется с датировкой 8900 ± 30 ¹⁴C л. н./9937–9997 кал. л. н. (глубина 485–490 см). Для этого периода характерно потепление климата на фоне дефицита влажности. Уменьшение влажности наряду с гляциоизостатическим поднятием Фенноскандинавского щита вызвало понижение уровня грунтовых вод [22], что способствовало широкому распространению сосны. В напочвенном покрове сосновых лесов появляется орляк обыкновенный – представитель борового ценогенетического комплекса. Наряду с сосновыми лесами продолжали существовать березово-сосновые и, в наиболее влажных местообитаниях, крупнотравные березовые сообщества. Леса постепенно приобретали среднетаежный облик, о чем косвенно свидетельствует уменьшение роли плаунов. Во время максимального для бореального периода потепления [18] граница ареала распространения вяза (*Ulmus*) приблизились к исследуемой территории, что нашло отражение и в диаграмме. В озерной экосистеме усиливаются продукционные процессы, что способствовало активному накоплению автохтонного органического вещества в донных отложениях и постепенному заилению котловины озера. Расширилась зона хорошо прогреваемых мелководий палеоводоёма, которые продолжали зарастать водными и водно-болотными видами.

ПЗ IV (458–340 см) характеризуется невысоким, но стабильным содержанием пыльцы термофильных и широколиственных пород (*Quercus*, *Tilia*, *Ulmus*, *Corylus*, *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn). Данные спорово-пыльцевого анализа, а также радиоуглеродная дата 6710 ± 25 ¹⁴C л. н./7567–7597 кал. л. н. (глубина 380–385 см) позволяют отнести время формирования этой палинозоны к атлантическому периоду. В СПС наблюдается тенденция увеличения вклада пыльцы *Picea* и *Pinus* и уменьшения содержания пыльцы *Betula* sect. *Albae*. Изменения в соотношениях этих основных компонентов СПС позволяют выделить несколько подзон. Чередование пиков пыльцы сосны и березы, возможно, обусловлено следующими причинами: 1) неоднократные изменения влажности климата в атлантическое время; 2) пожары, после которых на горях формировались постпирогенные березняки.

Подзона ПЗ IV а (глубина 458–425 см) характеризуется уменьшением количества пыльцы *Pinus*, тогда как вклад пыльцы *Betula* sect. *Albae*, *Picea*, *Alnus* увеличивается. В палиноспектрах, помимо пыльцы *Ulmus*, появляется *Quercus*, *Corylus*, *Alnus glutinosa*, у верхней границы палинозоны – *Tilia*. Скорее всего, это связано с изменением климата в сторону потепления и увеличения влажности, что характерно для атлантического периода. Следует отметить, что перенос пыльцы липы и дуба по воздуху происходит в пределах лишь нескольких десятков километров [30]. Вероятно, термофильные породы уже произрастали на исследуемой территории.

В спорово-пыльцевых спектрах подзоны ПЗ IV б (глубина 425–368 см) отмечается постепенное увеличение содержания пыльцы *Pinus* за счет пыльцы *Betula* sect. *Albae*. Доля пыльцы *Picea* в спектрах возрастает до 7–9%, что свидетельствует о существен-

ном участии ели в растительном покрове. Вклад пыльцы термофильных пород незначителен, однако их кривые на диаграмме непрерывны. Среди травянистых лидирует пыльца Poaceae. В СПС палинозоны возрастает вклад пыльцы водных и прибрежно-водных растений. Согласно полученным данным, сосна вновь возвращается на прежние позиции, вытесняя березовые сообщества. Уровень палеоводоёма понижается. Мелководья его хорошо прогреваются, зарастают водными и прибрежно-водными растениями, о чем свидетельствует повышение их доли в СПС. На территории исследования были распространены южнотаежные елово-сосновые, сосново-еловые, сосново-березовые леса, в составе которых принимали участие термофильные древесные породы. Наиболее влажные местообитания занимали еловые сообщества с ольхой черной, вязом и лещиной.

В СПС подзоны ПЗ IV с (глубина 368–340 см) зафиксировано наиболее высокое участие пыльцы термофильных пород. Вероятно, импульсом для их распространения послужил максимум атлантического потепления [18]. Кроме этого, отмечаются пик содержания пыльцы *Pinus* (60%), увеличение вклада пыльцы *Picea* (до 15%) и падение доли пыльцы *Betula sect. Albae* до 18%.

Потепление и увеличение влажности климата создало условия для расселения термофильных пород. Широкое распространение имели елово-сосновые, сосново-еловые и сосново-березовые леса с ольхой и теплолюбивыми древесными породами и кустарниками (вяз, липа, дуб и лещина). Крупнотравные березовые с ольхой серой и елово-черноольховые леса с примесью вяза и лещины произрастали в депрессиях рельефа с проточным увлажнением и богатыми почвами.

ПЗ V (глубина 340–305 см) У нижней границы палинозоны зафиксировано снижение количества пыльцы термофильных пород, доля которых впоследствии вновь возрастает, но не достигает значений, зарегистрированных в предыдущей палинозоне. Среди основных компонентов спектров отмечается следующая тенденция – увеличение количества пыльцы *Betula sect. Albae* до 35%, *Picea* (15%) и уменьшение доли пыльцы *Pinus* до 43%. Известно, что количество пыльцы сосны и березы в спектрах выше по отношению к участию этих пород в составе древостоя, а ели и широколиственных пород, напротив, ниже [10, 14 и др.].

В следующей ПЗ VI (глубина 305–250 см) пыльца *Pinus* вновь преобладает (58%), на втором месте – пыльца *Betula sect. Albae* (20–28%), на третьем – пыльца *Picea* (5–10%). Надо отметить довольно существенный вклад пыльцы *Alnus* (5–16%).

Принимая во внимание снижение вклада пыльцы термофильных пород и увеличение в палиноспектрах количества пыльцевых зерен *Picea*, мы предполагаем, что палиноспектры двух последних палинозон были сформированы в позднем голоцене. На исследуемой территории на увлажненных местообитаниях, наряду с елово-сосновыми лесами, произрастали монодоминантные ельники, а на сухих песчаных и каменистых субстратах – сосняки. Участие широколиственных пород в лесах сократилось.

Методом диатомового анализа было исследовано 30 образцов в интервале глубин 600–275 см. В донных отложениях выявлено 122 вида и разновидности диатомовой флоры из 37 родов. В результате исследования по составу полученных комплексов выделено пять диатомовых зон (DZ), соответствующих различным этапам развития водоема и палеоклиматическим периодам позднеледниковья и голоцена. Результаты исследований представлены на диаграмме (рис. 3).

В отложениях на глубине 600–470 см ископаемая диатомовая флора практически отсутствует. С глубины 555–550 см выявлены *Nitzschia* sp.; на глубине 540–538 см – единичная морская створка *Pinnularia quadratarea*. В образце с глубины 525–520 см определено всего 43 створки, представленные видами *Staurosira venter*, *St. pinnata*, *Fragilaria construens*, *Achnanthes linearis*, *Ach. minutissima*, *Discotella stelligera*, *Cyclotella kuetzingiana*, *Navicula radiosa* и др. Большинство из них корродированы. С глубины 490–485 см в осадках также выявлены единичные сильно корродированные створки

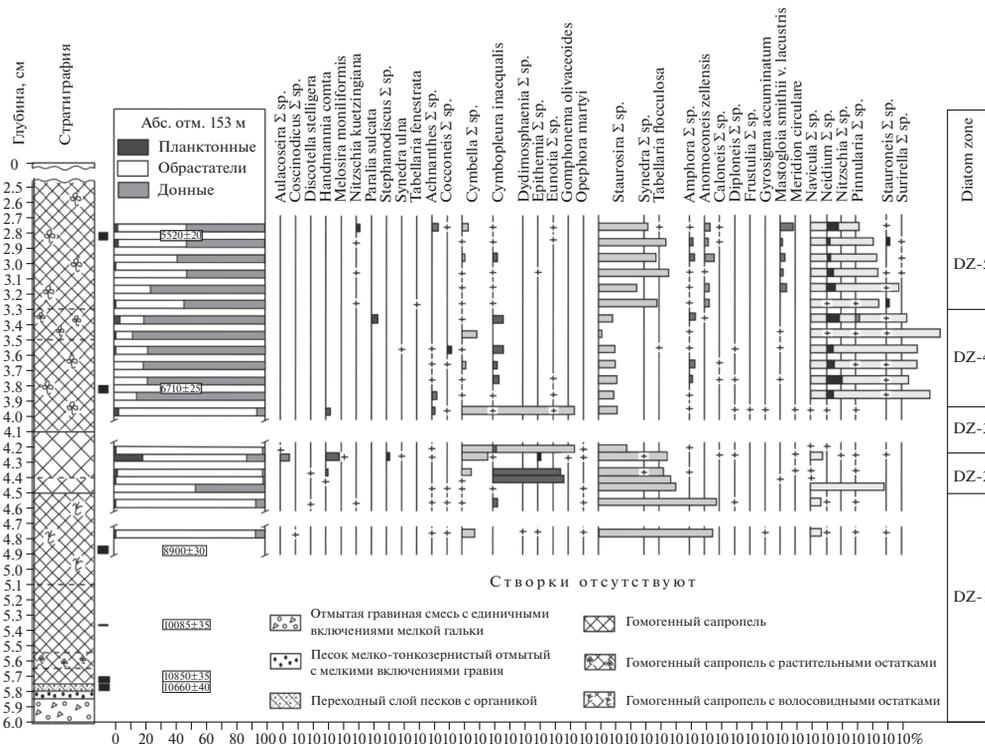


Рис. 3. Диатомовая диаграмма донных отложений оз. Южное Хаугилампи.

Fig. 3. Diatom diagram of bottom sediments from the lake Yuzhnoye Haugilampi.

видов *Ellerbeckia arenaria*, *Pseudostaurosira brevistriata*, *Grammatophora oceanica*, *Coscinodiscus* sp., *Mastogloia* sp., *Navicula pupula* var. *pupula* и десмидиевая водоросль *Ephidatia muellery*. Все обнаруженные виды, кроме мелкого обломка *Coscinodiscus* sp. и *Grammatophora oceanica* — пресноводные. Можно предположить, что отсутствие диатомовой флоры в нижних слоях разреза связано с высокими значениями pH (более 8.5), при которых диатомеи почти не могли развиваться. Однако более достоверным, с нашей точки зрения, является предположение, что из-за холодных условий позднеледникового в водоем поступало недостаточно кислорода и растворенной кремнекислоты, необходимой для активной вегетации диатомовых водорослей.

Наиболее полноценный диатомовый комплекс установлен в осадках, представленных гомогенными сапропелями черного цвета с редкими волосовидными растительными остатками с глубины 480 см.

DZ 1 (490–450 см) выделена на основе доминирования видов обрастаний рода *Staurosira*, достигающих почти 80% от общего состава флоры; остальные 20% представлены формами рода *Cymbella* sp. (причем большинство из них корродированно и разъедено, что вызывало трудности при идентификации). Из определенных форм следует отметить пресноводные *Cymbella laevis*, *C. ventricosa*; возможно в обломках представлены и морские формы этого рода. Среди донных видов рода *Navicula* определены мезогалобы *Navicula peregrina*, *N. diluviana*, а также галофил *Gyrosigma acuminatum*, несколько обломков крупной створки *Didymosphaenia* sp. Важно отметить присутствие в виде обломков солоноватоводно-морских форм *Coscinodiscus* sp., *Nitzschia* sp., *Epithe-*

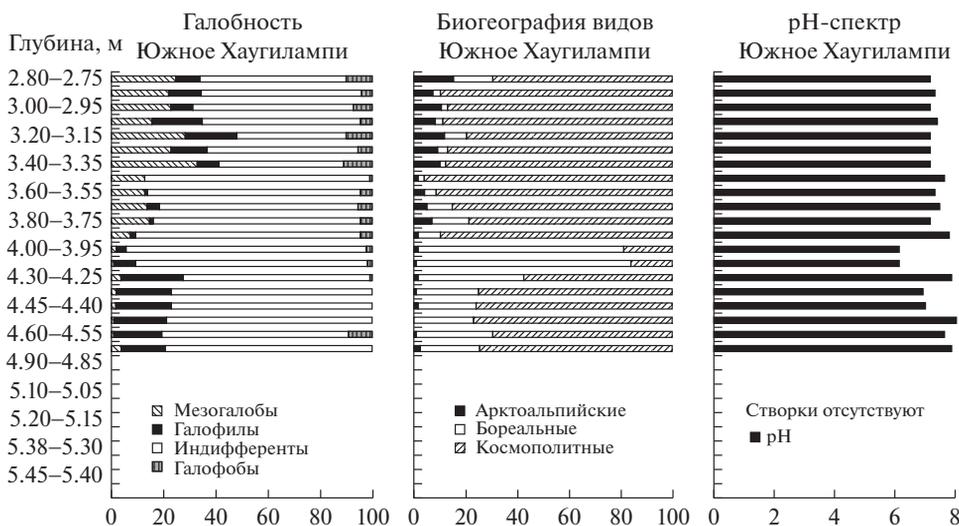


Рис. 4. Эколого-географические характеристики и рН-спектр диатомовой флоры донных осадков оз. Южное Хаугилампи.

Fig. 4. Ecological and geographical characteristics and pH – spectrum of diatom flora of bottom sediments of the lake Yuzhnoye Haugilampi.

mia sp. (глубина 480–475 см). Выше по разрезу (глубина 460–455 см) встречаются корродированные створки морских форм рода *Pinnularia* sp., а также целые створки *Diploneis smithi*, *Cymbopleura inaequalis*, *Cocconeis scutellum*. Эти единичные створки морских и солоноватоводных видов следует отнести к переотложенным, при доминировании пресноводных рода *Staurosira*. Отложения формировались в бореальное время.

Анализируя эколого-географические характеристики диатомового комплекса и рН-спектр, можно отметить, что на данном этапе господствовали космополитные формы, составляя более 70% флоры (рис. 4).

В структуре видов по галобности преобладали индифференты, однако доля галофилов составляла 20% при незначительном количестве галофобов. При этом среда была щелочной, показатель рН достигал максимальных значений 8. Таким образом, состав диатомового комплекса DZ 1 свидетельствует о мелководности хорошо прогреваемого водоема со щелочной средой, что характерно для бореального времени.

DZ 2 (450–425 см). В структуре диатомового комплекса отмечаются значительные колебания процентного соотношения отдельных групп водорослей. В начале зоны возрастает доля донных форм рода *Navicula* sp. (до 50%), примерно такого же количества достигает и формы обрастаний *Staurosira* sp. К концу этапа участие *Staurosira* sp. снижается с 80 до 50%. Все остальные виды присутствуют единично. Однако на глубине 445–435 см донные диатомеи рода *Navicula* sp. вытесняются формами обрастаний *Cymbopleura inaequalis* (почти 50%). В конце DZ 2 появляются планктонные виды *Handmania comta*, а также *Aulacoseira granulata* + *angustissima*, *Stephanodiscus hantzschii*, *St. astraea* (до 20%). Содержание форм обрастаний *Staurosira* sp. постоянно и составляет также около 20%. Возрастает роль видов рода *Cymbella* sp., представленных главным образом *Cymbella obtusa*, а также *Cymbopleura inaequalis*. Вновь появляются донные виды рода *Navicula* sp. (10%), единичные створки галофилов *Epithemia zebra*, *E. zebra* var. *saxonica*, *E. muellery*, *Melosira moniliformis*. Несмотря на относительно высокое содержание галофилов (до 30%) при доминировании индифферентных форм, рН резко сни-

жается до нейтральных значений (рис. 4). К концу этапа возрастает роль бореальных видов, что связано, скорее всего, с нарастанием увлажненности климата в начале атлантического времени.

DZ 3 (425–395 см) отличается полным господством видов рода *Cymbella* sp. (около 80%), среди которых выделяются *Cymbella laevis*, *C. obtusa*, снижением содержания видов рода *Staurosira* sp. (до 10–15%). Остальные представители диатомового комплекса *Handmania comta*, *Navicula* sp., *Gyrosigma* sp., *Achnanthes* sp., *Diploneis* sp. и другие выявлены единично. Отличительной особенностью диатомового комплекса данной DZ выступает резкое повышение содержания бореальных форм и сокращение роли космополитов (до 20%). При этом, в результате смены гидрохимических условий со щелочных на кислые (значения pH снизились с 8 до 6.1) заметно уменьшилось количество галофилов. Возросло участие планктонного сообщества (с 2 до 20%), предположительно, в результате обводнения водоема, возможно за счет увлажнения климата во второй половине атлантического периода.

DZ 4 (395–335 см) отличается господством донных форм диатомовых водорослей, представленных видами родов *Navicula* sp. (70–90%), *Stauroneis* sp. (10%), *Neidium* sp. (5–10%), незначительным количеством обрастателей *Cymbella* sp., *Cymbopleura inaequalis* (5–10%) и единичным участием *Achnanthes* sp., *Cocconeis* sp., *Stauroneis* sp., *Eunotia* sp. В структуре комплекса по галобности возрастает содержание мезогалобов (15% и более) и, наоборот, снижается доля галофильных форм по сравнению с предыдущим этапом. Вместе с тем заметно повышаются значения pH (колеблются в пределах 7–7.5), указывая на слабощелочную среду. В конце этапа в небольших количествах появляются, вероятно, переотложенные створки морского планктонно-литорального вида *Paralia sulcata* (до 5%), что может быть связано с потеплением климата в конце атлантического периода, усилением процессов питания водоема подземными более минерализованными водами, возможным поступлением с водораздела ранее отложенных четвертичных осадков.

DZ 5 (335–275 см). На данном этапе развития водоема в структуре диатомового комплекса происходят заметные изменения, связанные со значительным увеличением роли обрастателей *Staurosira* sp. (с 2–5 до 50%), снижением содержания донных форм с 90 до 40%. Кроме этого в небольшом количестве выявлены новые виды: мезогалоб *Mastogloia smithi* var. *lacustris* (10%), слабый кальцефил *Anomoeoneis zellensis*, а также виды родов *Amphora* sp., *Neidium* sp. (до 10%). Формы из обрастаний *Cymbella* sp., *Achnanthes* sp., *Nitzschia kuetzingiana* и др. составляют не более 2–5%. Увеличение роли видов рода *Staurosira* sp. может свидетельствовать о лучшей прогреваемости водоема, а также, вероятно, появлении новых мелководий из-за снижения уровня воды в результате сухости климата в суббореальное время. На это указывает сокращение до 20% доли арктоальпийских и бореальных форм, расширение спектра космополитов. В структуре комплекса по галобности повышается содержание мезогалобов (с 10 до 20%). Вместе с галофилами в середине этапа они достигают 50%. Показатель pH практически не меняется и близок к нейтральному. Все это может указывать на относительно теплые климатические условия суббореального времени.

Таким образом, отличительной особенностью суббореальных отложений изученного водоема является высокое содержание в составе диатомового комплекса мезогалобов и галофилов (суммарно 50%). **Такого большого содержания видов этих групп не выявлено для этого времени ни в одном водоеме на территории Карелии.** Большое содержание данных видов в составе диатомового комплекса можно объяснить: а) переотложением из ранее не размытых морских осадков (микулинских или моря Портландия); б) развитием видов в этом периоде. Ранее установленный уровень трансгрессии Беломорского бассейна (моря Портландия) достигал современных абсолютных отметок 150–175 м [21, 24]. Подтверждением переотложения створок служит сходство составов диатомовых комплексов моря Портландия и даже микулинских (рис. 5).

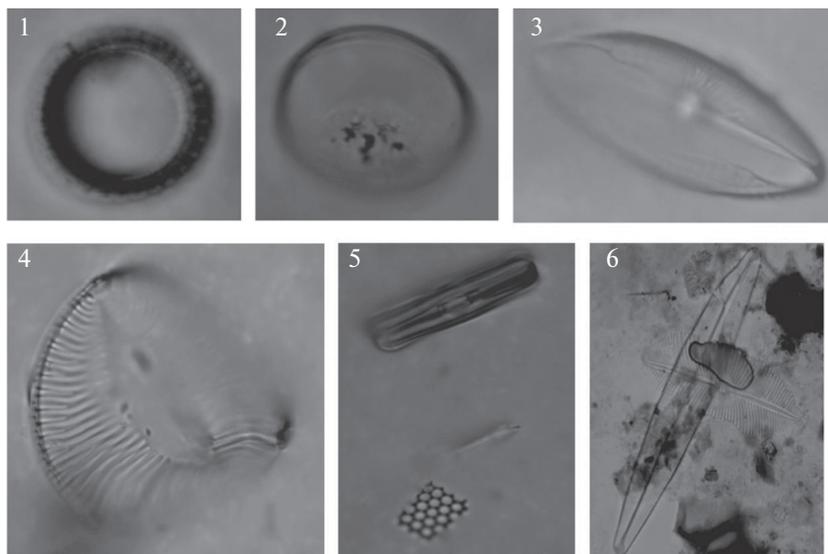


Рис. 5. Переотложенные створки диатомовых водорослей: 1 – *Paralia sulcata*; 2 – *Hyalodiscus scoticus*; 3 – *Mastogloia elliptica*; 4 – *Campilodiscus* sp.; 5 – *Grammatophora oceanica*; 6 – *Navicula peregrina*.

Fig. 5. Redeposited valves of diatoms.

Среди типичных видов, отмеченных в суббореале в озере Южное Хаугилампи, необходимо выделить мезогалофы *Navicula halophila*, *N. peregrina*, *Navicula* sp., *Cocconeis scutellum*; галофилы *Staurosirella pinnata*, *Navicula oblonga*, *Navicula (Sellaphora) pupula* var. *rectangularis*, *Diploneis* sp. Кроме этого важно заметить, что перечисленные виды отличаются более плохой сохранностью по сравнению с пресноводными индифферентами и галофобами. Присутствие видов *Paralia sulcata*, *Pinnularia quadratarea*, *Cocconeis costata*, *Cocconeis scutellum* – типичных представителей литоральной зоны Белого моря – еще больше подтверждает наше предположение. А их совместное существование с галофобами хорошей сохранности (*Neidium amphilatium*, *Neidium bisulcatum*), вообще не совместимых по экологии с морскими формами, является явным свидетельством переотложения. На рис. 5 представлены фотографии со светового микроскопа, свидетельствующие о плохой сохранности переотложенной флоры и наличии морских форм, несовместимых по обитанию с пресноводными.

Осадки субатлантического времени не зафиксированы в разрезе. Вероятно, с помощью ручного бура их поднять не удалось из-за разжиженной консистенции.

ВЫВОДЫ

Согласно полученным данным, установлено, что осадконакопление в водоеме началось в позднем дриасе. Базальные отложения, представленные гравийной смесью с включением мелкой гальки, лишены микрофоссилий и их возраст не может быть установлен биостратиграфическим методом. В результате спорово-пыльцевого анализа выделены отложения заключительного этапа позднего дриаса, пребореального, бореального, атлантического периода и нерасчлененные осадки позднего голоцена.

Тундровые ландшафты позднего дриаса постепенно замещались березовыми редколесьями. Направленное потепление и увлажнение климата началось в пребореальном периоде, что нашло отражение в составе СПС. Предположительно во второй по-

ловине пребореала береза становится доминирующей породой в северотаежных лесах изучаемой территории. В их составе все большее участие начинает принимать сосна, образуя сосново-березовые палеоценозы. В бореальное время максимального развития достигли сосновые среднетаежные леса, как монодоминантные, так и с участием березы. В атлантическом периоде они сменяются южнетаежными сосновыми и еловыми лесами с участием термофильных пород. В позднем голоцене леса начали приобретать среднетаежный облик.

По данным диатомового анализа выделяются позднеледниковые отложения, сменяющиеся осадками от пребореального до суббореального периодов. Позднеледниковые отложения практически не содержат ископаемой диатомовой флоры. В них выявлены лишь единичные морские створки *Pinnularia quadratarea*, *Nitzschia* sp. В пребореальном периоде в водоеме в незначительном количестве развивались пионерные виды из обрастаний *Staurosira venter*, *St. pinnata*, *Fragilaria construens*, *Achnanthes linearis*, *Ach. minutissima*, а также планктонные виды *Discotella stelligera*, *Cyclotella kuetzingiana*, донные виды *Navicula radiosa* и другие. Массовая вегетация диатомовых водорослей началась лишь в бореальное время во время максимального для этого периода потепления. В донных отложениях начала бореала при доминировании эпифитов *Staurosira* sp. выявлены также единичные сильно корродированные створки видов *Ellerbeckia arenaria*, *Pseudostaurosira brevistriata*, морская, вероятно, переотложенная форма *Grammatophora oceanica*, мелкий обломок *Coscinodiscus* sp., мезогалобные донные формы *Mastogloia* sp., галофилы *Navicula (Sellaphora) pupula* var. *pupula* и десмидиевая водоросль *Ephidatia muellery*.

В атлантическом периоде наблюдается подъем уровня, фиксирующийся по повышению содержания планктонных форм и диатомей из обрастаний.

В суббореальный период максимального содержания (50%) в диатомовом комплексе достигли мезогалобы в сумме с галофилами. Такое высокое их содержание в суббореале Карелии зафиксировано впервые и не наблюдалось ранее ни в одном из изученных водоемов Карелии. Однако, в это время отмечается рост количества данных видов во всех водоемах, что объясняется сухостью климата и усилением подземного питания, повышением минерализации воды [20]. Но в изученном озере такое высокое для Карелии содержание мезогалобов и галофилов, по нашему мнению, не связано с названными причинами, а выступает следствием переотложения и выщелачивания ранее сформированных и не до конца выветрелых морских микулинских (?) осадков, или осадков моря Портландия.

Результаты диатомового анализа донных отложений, начиная с бореального времени, подтверждаются данными спорово-пыльцевого анализа и радиоуглеродного датирования, таким образом, доказывая надежность комплексных исследований.

В соответствии с предложенной ранее схемой [23] образование малых озер, расположенных между конечными моренами сяозерской (невской) и ругозерской стадиями оледенения, происходило в аллереде. Согласно полученным данным, начало формирования донных отложений в озере Южное Хаугилампи, находящемся почти на одинаковом (~60 км) расстоянии от конечных морен невской и ругозерской стадий, относится к позднему дриасу (не ранее 11 000 ¹⁴C л. н./12900 кал. л. н.), что свидетельствует о запаздывании образования озера относительно края отступающего ледника. Дополнительные разносторонние комплексные исследования донных отложений малых озер этого региона позволят получить более достоверную дополнительную информацию о времени зарождения озер и об особенностях ископаемой диатомовой флоры для каждого палеоклиматического периода голоцена.

Работа выполнена в рамках государственной темы ИГ Кар НЦ РАН № АААА-А18-118020690231-1 и гранта РНФ 18-17-00176.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Барина С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В.* Биоразнообразие водорослей – индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: PilliesStudio, 2006. 498 с.
2. *Бобров А.Е., Куртиянова Л.А., Литвинцева М.В., Тарасевич В.Ф.* Споры папоротникообразных и пыльца голосеменных и однодольных растений флоры европейской части СССР. Л.: Наука: Ленингр. отд-ние, 1983. 208 с.
3. *Генкал С.И., Трифонова И.С.* Диатомовые водоросли планктона Ладожского озера и водоемов его бассейна. Рыбинск: Изд-во “Рыбинский дом печати”, 2009. 72 с.
4. *Генкал С.И., Чекрыжева Т.А.* Центрические диатомовые водоросли (Bacillariophyta, Centrophyceae) водоемов Карелии // Биол. внутр. вод. 2011. № 1. С. 5–16.
5. *Генкал С.И., Куликовский М.С., Михеева Т.М., Кузнецова И.В., Лукьянова Е.В.* Диатомовые водоросли планктона реки Свислочь и ее водохранилищ. М.: Научный мир, 2013. 236 с.
6. *Генкал С.И., Чекрыжева Т.А., Комулайнен С.Ф.* Диатомовые водоросли водоемов и водотоков Карелии. М.: Научный мир, 2015. 202 с.
7. *Давыдова Н.Н.* Диатомовые водоросли – индикаторы природных условий водоемов в голоцене. Л.: Наука, 1985. 244 с.
8. *Демидов И.Н.* Деградация поздневалдайского оледенения в бассейне Онежского озера // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 8. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2005. С. 134–142.
9. Диатомовый анализ. Определитель ископаемых и современных диатомовых водорослей. Л.: Государственное издательство геологической литературы, 1949–1950. Кн. 1. 240 с. Кн. 2. 288 с. Кн. 3. 399 с.
10. *Елина Г.А.* Принципы и методы реконструкции и картирования растительности голоцена. Л.: Наука, 1981. 160 с.
11. *Куликовский М.С., Глушенко А.М., Генкал С.И., Кузнецова И.В.* Определитель диатомовых водорослей России. Ярославль: Филигрань, 2016. 804 с.
12. *Куртиянова Л.А., Алешина Л.А.* Пыльца и споры растений флоры европейской части СССР. Т. 1. Л.: Наука, 1972. 171 с.
13. *Куртиянова Л.А., Алешина Л.А.* Пыльца двудольных растений флоры европейской части СССР. Lamiaceae, Zygophyllaceae. Л.: Наука, 1978. 184 с.
14. *Лийвранд Э.* Методические проблемы палиностратиграфии плейстоцена. Таллинн, 1990. 176 с.
15. Определитель пресноводных водорослей СССР. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1951. Вып. 4. 619 с.
16. Пыльцевой анализ / Под ред. И.М. Покровской. М.: Гос. изд-во геологической литературы, 1950. 571 с.
17. *Субетто Д.А.* Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции. СПб.: Изд-во РГПУ им. Герцена, 2009. 339 с.
18. *Филимонова Л.В., Климанов В.А.* Изменение количественных показателей палеоклимата в среднетаежной подзоне Карелии за последние 11000 лет // Труды Карельского научного центра РАН. 2005. Вып. 8. С. 112–120.
19. *Хотинский Н.А.* Голоцен Северной Евразии. М.: Наука, 1977. 200 с.
20. *Шелехова Т.С.* Эволюция малых озер охраняемых территорий Карелии (по данным диатомового анализа донных отложений): Автореф. дис. канд. геогр. наук. СПб., 1998. 26 с.
21. *Шелехова Т.С.* Четвертичные отложения и геоморфология Зеленого Пояса Фенноскандии // Труды Карельского научного центра РАН. № 4. 2019. С. 41–50. <https://doi.org/10.17076/them1007>
22. *Шелехова Т.С., Лаврова Н.Б.* Палеогеографические реконструкции развития территории Северо-западной Карелии в голоцене (по данным изучения донных отложений малых озер) // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. № 9. С. 101–122. <https://doi.org/10.17076/lim1268>
23. *Экман И.М., Лукашов А.Д., Колканен А.М., Лийва А.А.* Динамика развития озер и озерности Карельской АССР по данным радиохронологии (за последние 13000–14000 лет) // Изотопно-геохронологические исследования в Прибалтике и Белоруссии. Таллинн, 1988. С. 237.
24. *Ekman I., Piip V.* (1995). Deglaciation, the Younger Dryas end moraines and their correlation in Russian Karelia and adjacent areas // Glacial deposits in North-East Europe / J. Ehlers, S. Kozarski, P. Gibbard (Eds.). Rotterdam-Brookfield: A.A. Balkema. P. 195–209.
25. *Grimm E.C.* Tilia and TiliaGraph PC spreadsheet and graphics software for pollen data. INQUA, working group on data-handling methods. Newsletter 4. 1999. P. 5–7.
26. *Grimm E.C.* TGView. Illinois State Museum, Research and Collections Center, Springfield, 2004.
27. *Komarek J., Jankovska V.* Review of the Green Algal Genus Pediastrum: Implication for Pollen analytical Research. Bibliotheca Phycologica. Band XX. Berlin, Stuttgart: Cramer, 1999. 127 p.
28. *Krammer K., Lange-Bertalot H.* Bacillariophyceae 3. Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae // Süßwasserflora von Mitteleuropa. Stuttgart; Jena: Gustav Fischer Verlag, 1991. 576 p.

29. Lunkka J.P., Johansson P., Saarnisto M., Sallasmaa O. Glaciation of Finland // Quaternary Glaciation – Extent and Chronology / J. Ehlers, P.L. Gibbard (Eds.). Elsevier Science, 2004. P. 93–100.
30. Mazei N.G., Kusilman M.V., Novenko E.Y. The Occurrence of Carpinus, Fagus, Tilia, and Quercus Pollen in Subrecent Spore-Pollen Spectra from the East European Plain: On the Possibility of Long-Distance Pollen Transfer // Russian J. Ecology. 2018. V. 49 (6). P. 484–491. <https://doi.org/10.1134/S1067413618050077>
31. Moore P.D., Webb J.A., Collinson M.E. Pollen analysis. Second edition. London, Malden, Carlton: Blackwell Science, 1991. 216 p.
32. Mölder K., Tynni R. Über Finnlands rezente und subfossile Diatomeen. I–VII // Bull. Geol. Soc. Finland. 1967. V. 39. P. 199–217; 1968. V. 40. P. 151–170; 1969. V. 41. P. 235–251; 1970. V. 42. P. 129–144; 1971. V. 43. P. 203–220; 1972. V. 44. P. 141–149; 1973. V. 45. P. 159–179.
33. Niemelä J., Ekman I., Lukashov A. (Eds.). Quaternary deposits of Finland and Northwestern part of Russian Federation and their resources. Scale 1 : 1000000. Espoo: Geological Survey of Finland, 1993.
34. Saarnisto M., Saarinen T. Deglaciation chronology of the Scandinavian Ice Sheet from the Lake Onega Basin to the Salpausselkä End Moraines // Global and Planetary Change. 2001. V. 31(1–4). P. 387–405. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(01\)00131-X](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(01)00131-X)
35. Tynni R. Über Finnlands rezente und subfossile Diatomeen VIII–XI // Geol. Surv. Finland Bull. 1975. V. 274. P. 1–55; 1976. V. 284. P. 1–37; 1978. V. 296. P. 1–55; 1980. V. 312. P. 1–93.

Reconstruction of paleogeographic conditions in the Late Glacial-Holocene in Central Karelia based on comprehensive analysis of sediments from the lake Yuzhnoe Haugilampi

T. S. Shelekhova¹ *, N. B. Lavrova¹, ** and , and D. A. Subetto², ***

¹*Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia*

²*Herzen State Pedagogical University of Russia, St. Petersburg, Russia*

*E-mail: shelekh@krc.karelia.ru

**E-mail: lavrova@krc.karelia.ru

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

The results of diatom, palynological and radiocarbon analyses have shown that bottom sediments have been accumulating in the lake Yuzhnoe Haugilampi for the last 13–12 000 cal. years. Terrigenous sediments (sand, clay) formed in the lake in the Late Glacial Period and organic sediments (gyttia) began to form in Pre-Boreal time. The vegetation reconstructions of the area cover the period from Younger Dryas until present. After the retreat of the glacier of the last Valdai glaciation, periglacial vegetation (*Artemisia-Chenopodiaceae*), tundra and forest-tundra birch communities spread over the study area. In Pre-Boreal, tundra and forest-tundra vegetation had been changed by birch open forests. Later, in the Boreal period, middle taiga pine forests reached their maximum development. In Atlantic period, middle-taiga forests were replaced by south-taiga pine and spruce forests with thermophilic species. The forests began to acquire a middle-taiga character in the Late Holocene. In the Late Glacial Period, no diatom flora evolved in the lake. Sediments from that period contain the scarce, possibly redeposited valves of marine diatoms and small quantities of pioneer epiphytes and bottom species. In the Pre-Boreal period, a rather scarce diatom complex (regarding the abundance and diversity of species) developed in the lake, represented by pioneer forms typical for many northern water bodies: *Ellerbeckia arenaria*, *Pseudostaurosira brevistriata*, etc. The mass vegetation of diatoms began in the Boreal Period. The dynamics of the development of the lake from the Younger Dryas to the Subboreal time is traced.

Keywords: Late Glacial Period, Holocene, bottom sediments, spore-and-pollen analysis, diatom analysis, Lake Yuzhnoe Haugilampi, Central Karelia

REFERENCES

1. Barinova S.S., Medvedeva L.A., Anisimova O.V. Bioraznoobrazie vodoroslej – indikatorov okruzhayushhej sredy. Tel'-Aviv: PilliesStudio, 2006. 498 s.

2. Bobrov A.E., Kupriyanova L.A., Litvinceva M.V., Tarasevich V.F. Spory paporotnikoobraznyh i pyl'cza golosemennyh i odnodol'nyh rastenij flory evropejskoj chasti SSSR. L.: Nauka, Leningr. otd-nie, 1983. 208 s.
3. Genkal S.I., Trifonova I.S. Diatomovye vodorosli planktona Ladozhskogo ozera i vodoemov ego bassejna. Rybinsk: Izd-vo "Rybinskij dom pečati", 2009. 72 s.
4. Genkal S.I., Chekryzheva T.A. Centricheskie diatomovye vodorosli (Bacillariophyta, Centrophyceae) vodoemov Karelii // Biol. vnutr. vod. 2011. № 1. S. 5–16.
5. Genkal S.I., Kulikovskij M.S., Miheeva T.M., Kuznecova I.V., Luk'yanova E.V. Diatomovye vodorosli planktona reki Svisloch' i ee vodohranilishh. M.: Nauchnyj mir, 2013. 236 s.
6. Genkal S.I., Chekryzheva T.A., Komulajnen S.F. Diatomovye vodorosli vodoemov i vodotokov Karelii. M.: Nauchnyj mir, 2015. 202s.
7. Davydova N.N. Diatomovye vodorosli – indikatorы prirodnyh uslovij vodoemov v golocene. L.: Nauka, 1985. 244 s.
8. Demidov I.N. Degradaciya pozdnevaldajskogo oledeneniya v bassejne Onezhskogo ozera // Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii. Vyp. 8. Petrozavodsk: Karel. nauch. centr RAN, 2005. S. 134–142.
9. Diatomovyj analiz. Opredelitel' iskopaemyh i sovremennyh diatomovyh vodoroslej. L.: Gosudarstvennoe izdatel'stvo geologicheskoy literatury, 1949–1950. Kn. 1. 240 s. Kn. 2. 288 s. Kn. 3. 399 s.
10. Elina G.A. Principy i metody rekonstrukcii i kartirovaniya rastitel'nosti golocena. L.: Nauka, 1981. 160 s.
11. Kulikovskij M.S., Glushenko A.M., Genkal S.I., Kuznecova I.V. Opredelitel' diatomovyh vodoroslej Rossii. Yaroslavl': Filigran', 2016. 804 s.
12. Kupriyanova L.A., Aleshina L.A. Pyl'cza i spory rastenij flory evropejskoj chasti SSSR. T. 1. L.: Nauka, 1972. 171 s.
13. Kupriyanova L.A., Aleshina L.A. Pyl'cza dvudol'nyh rastenij flory evropejskoj chasti SSSR. Lamiaceae, Zygothylaceae. L.: Nauka, 1978. 184 s.
14. Lijvrant E. Metodicheskie problemy palinostratigrafii plejstocena. Tallinn, 1990. 176 s.
15. Opredelitel' presnovodnyh vodoroslej SSSR. M.; L.: Izd-vo AN SSSR, 1951. Vyp. 4. 619 s.
16. Pyl'cevoj analiz / Pod red. I.M. Pokrovskoj. M.: Gos. izd-vo geologicheskoy literatury, 1950. 571 s.
17. Subetto D.A. Donnye otlozheniya ozer: paleolimnologicheskie rekonstrukcii. SPb.: Iz-vo RGPU im. Gercena, 2009. 339 s.
18. Filimonova L.V., Klimanov V.A. Izmenenie kolichestvennyh pokazatelej paleoklimata v srednetazhnoj podzone Karelii za poslednie 11000 let // Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN. 2005. Vyp. 8. S. 112–120.
19. Hotinskij N.A. Golocen Severnoj Evrazii. M.: Nauka, 1977. 200 s.
20. Shelehova T.S. Evolyuciya malyh ozer ohranyaemyh territorij Karelii (po dannym diatomovogo analiza donnyh otlozhenij): Avtoref. dis. kand. geogr. nauk. SPb., 1998. 26 s.
21. Shelehova T.S. Chetvertichnye otlozheniya i geomorfologiya Zelenogo Poyasa Fennoskandii // Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN. № 4. 2019. S. 41–50. DOI 10.17076/them1007
22. Shelehova T.S., Lavrova N.B. Paleogeograficheskie rekonstrukcii razvitiya territorii Severo-zapadnoj Karelii v golocene (po dannym izucheniya donnyh otlozhenij malyh ozer) // Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN. 2020. № 9. S. 101–122. DOI 10.17076/lim1268
23. Ekman I.M., Lukashov A.D., Kolkkanen A.M., Lijva A.A. Dinamika razvitiya ozer i ozernosti Karel'skoj ASSR po dannym radiohronologii (za poslednie 13000–14000 let) // Izotopno-geohronologicheskie issledovaniya v Pribaltike i Belorussii. Tallinn, 1988. S. 237.
24. Ekman I., Iliyn V. (1995). Deglaciation, the Younger Dryas end moraines and their correlation in Russian Karelia and adjacent areas // Glacial deposits in North-East Europe / J. Ehlers, S. Kozarski, P. Gibbard (Eds.). Rotterdam-Brookfield: A.A. Balkema. P. 195–209.
25. Grimm E.C. Tilia and TiliaGraph PC spreadsheet and graphics software for pollen data. INQUA, working group on data-handling methods. Newsletter 4. 1999. P. 5–7.
26. Grimm E.C. TGView. Illinois State Museum, Research and Collections Center, Springfield, 2004.
27. Komarek J., Jankovska V. Review of the Green Algal Genus *Pediastrum*: Implication for Pollen analytical Research. Bibliotheca Phycologica. Band XX. Berlin, Stuttgart: Cramer, 1999. 127 p.
28. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae 3. Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae // Süßwasserflora von Mitteleuropa. Stuttgart; Jena: Gustav Fischer Verlag, 1991. 576 p.
29. Lunkka J.P., Johansson P., Saarnisto M., Sallasmaa O. Glaciation of Finland // Quaternary Glaciation – Extent and Chronology / J. Ehlers, P.L. Gibbard (Eds.). Elsevier Science, 2004. P. 93–100.
30. Mazei N.G., Kusilman M.V., Novenko E.Y. The Occurrence of *Carpinus*, *Fagus*, *Tilia*, and *Quercus* Pollen in Subrecent Spore-Pollen Spectra from the East European Plain: On the Possibility of Long-Distance Pollen Transfer // Russian J. Ecology. 2018. V. 49(6). P. 484–491. DOI 10.1134/S1067413618050077
31. Moore P.D., Webb J.A., Collinson M.E. Pollen analysis. Second edition. London, Malden, Carlton: Blackwell Science, 1991. 216 p.

-
32. Mölder K., Tynni R. Über Finnlands rezente und subfossile Diatomeen. I–VII // Bull. Geol. Soc. Finland. 1967. Vol. 39. P. 199–217; 1968. V. 40. P. 151–170; 1969. V. 41. P. 235–251; 1970. V. 42. P. 129–144; 1971. V. 43. P. 203–220; 1972. V. 44. P. 141–149; 1973. V. 45. P. 159–179.
 33. Niemelä J., Ekman I., Lukashov A. (Eds.). Quaternary deposits of Finland and Northwestern part of Russian Federation and their resources. Scale 1 : 1000000. Espoo: Geological Survey of Finland, 1993.
 34. Saarnisto M., Saarinen T. Deglaciation chronology of the Scandinavian Ice Sheet from the Lake Onega Basin to the Salpausselkä End Moraines // Global and Planetary Change. 2001. V. 31(1–4). P. 387–405. DOI 10.1016/S0921-8181(01)00131-X
 35. Tynni R. Über Finnlands rezente und subfossile Diatomeen VIII–XI // Geol. Surv. Finland Bull. 1975. V. 274. P. 1–55; 1976. Vol. 284. P. 1–37; 1978. V. 296. P. 1–55; 1980. V. 312. P. 1–93.

К 90-летию Н.Н. Давыдовой

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

© 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 палореконструкций экологических событий в позднем голоcene. 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 <math><1\text{ км}^2</math>). 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) признака 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 бюкс 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 бюксы.

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 колонки 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-

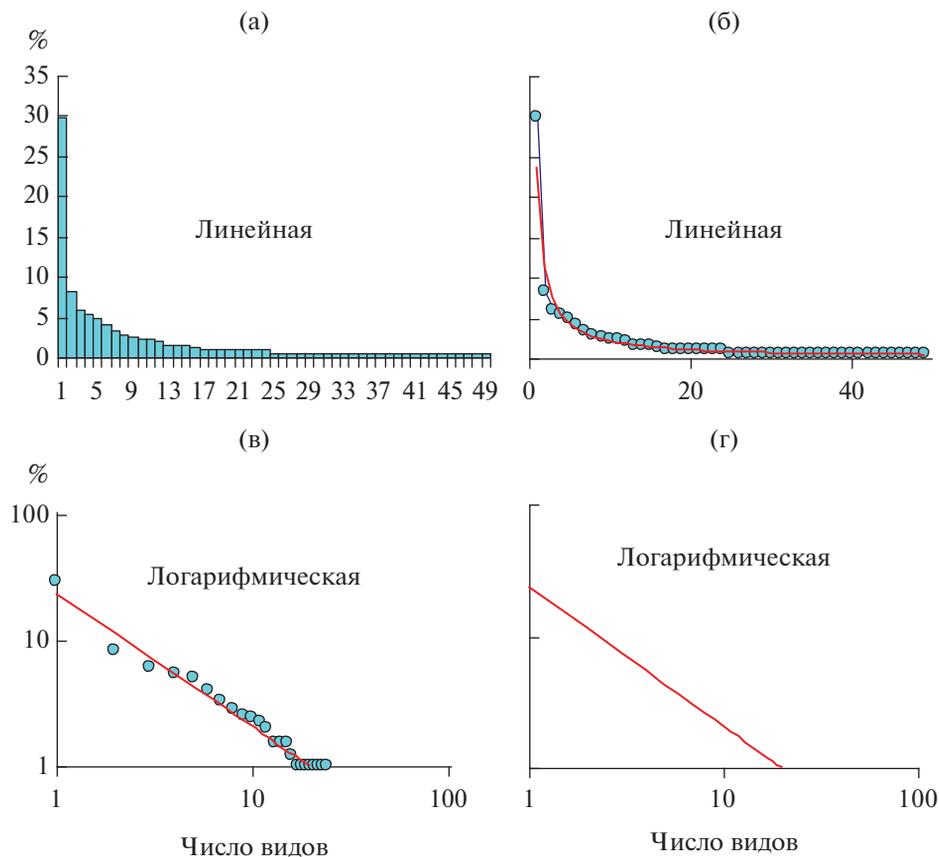


Рис. 2. Методика графического анализа в линейной и логарифмической системе координат (по [10], с сокращениями).

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: *Achnanthis 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, *Punctacriata 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 очерта-

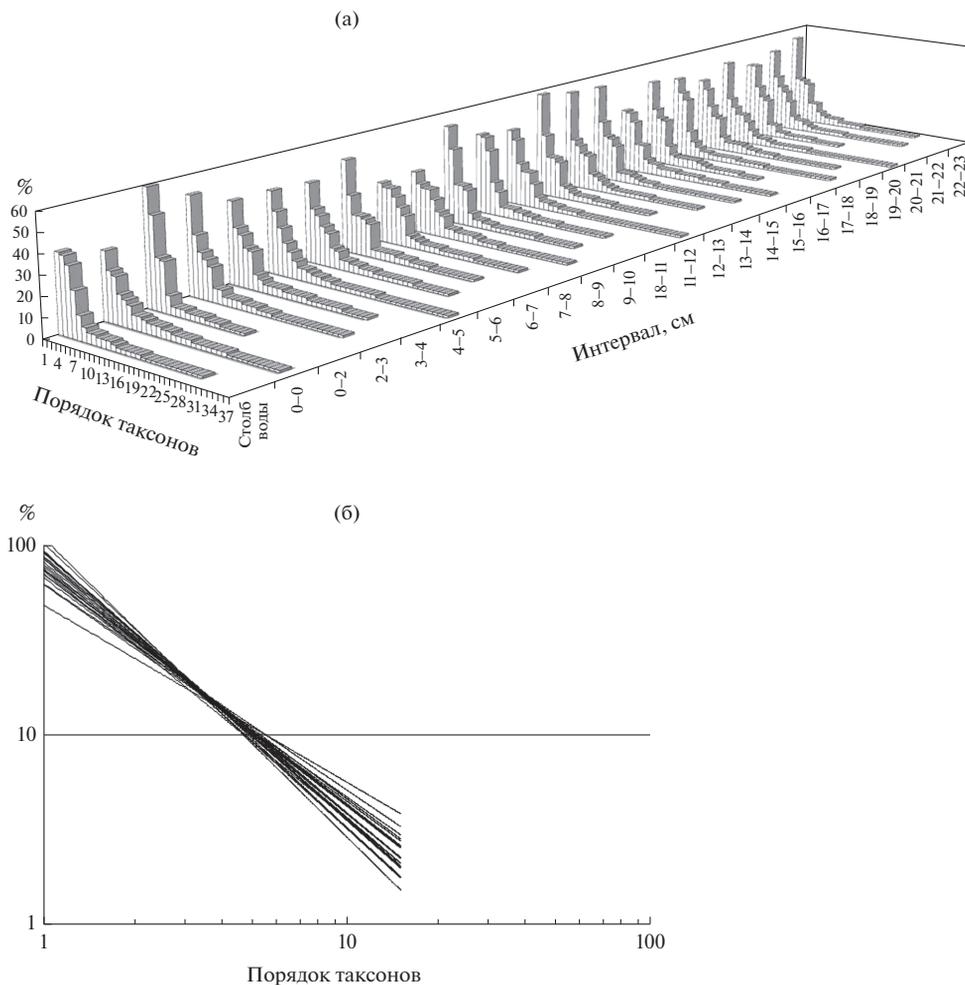


Рис. 3. Таксономическая структура диатомовых комплексов из донных отложений оз. Большое Дзитаку в линейной (а) и логарифмической (б) системе координат.

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. 3б). 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 послонное 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. *Джонгман 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 prirodnyh 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 soobshhestv 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 russkikh 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. Paleokologicheskie 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. С. 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 Zerka'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., Chepurnaya 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.