

**РЕАКЦИЯ ДИАТОМОВЫХ ВОДОРΟΣЛЕЙ ОЗЕРА ГРЯЗЕВОЕ
(МАГАДАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)
НА ИЗМЕНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ СЕВЕРНОГО ПРИОХОТЬЯ
В ПОЗДНЕМ ПЛЕЙСТОЦЕНЕ-ГОЛОЦЕНЕ**

© 2022 М.В. Черепанова¹, П.С. Минюк², Д.К. Пожидаева², С.С. Бурнатный²

¹Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН,
Владивосток, Россия, 690022; e-mail: cherepanova@biosoil.ru

²Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН им. Н.А. Шило,
Магадан, Россия, 685000; e-mail: minyuk@neisri.ru

Поступила в редакцию 17.08.2022 г.; после доработки 12.09.2022 г.; принята к публикации 26.09.2022 г.

Изучение диатомовых водорослей из отложений скважины Гз-1 (оз. Грязевое, Магаданская обл.) позволило выявить реакцию диатомовых сообществ на изменения окружающей среды в позднем плейстоцене и голоцене и установить основные этапы трансформации экосистемы озера. На основе изменения концентрации створок диатомей в осадках, соотношения представителей экологических групп и доминантов выделены три диатомовые зоны и четыре подзоны, отражающие тенденцию эволюции диатомовой флоры озера в переходный период от последнего ледникового максимума к голоцену. По смене таксономического состава и доминантов эта тенденция похожа на изменения в озерных диатомовых сообществах арктических регионов, отмеченные для последнего тысячелетия. Данные изучения диатомей, литологические и петрофизические характеристики осадков указывают на то, что наиболее значимые изменения природной среды произошли на границе плейстоцена и голоцена от 12.6 до 11.1 тысяч лет назад.

Ключевые слова: диатомеи, изменения климата, палеолимнология, плейстоцен, голоцен, Магаданская область.

ВВЕДЕНИЕ

На территории Магаданской области по спутниковым снимкам дешифрировано более 27000 водоемов различного генезиса и размера, площадью >0.1 га. Суммарная площадь водного покрытия составляет 1553 км², в том числе естественными водоемами — 1103 км², суммарный объем озерных вод составляет 2.86 км³ (Измайлова, 2018). Озер площадью >1 га насчитано около 10150, в том числе >20 га — 795. Более 17000 водоемов имеют площади от 0.1 до 1 га (Информационная система «Озера России». http://limno.ru//developments/catalogs/lakes_rus/).

Озерные отложения являются важными архивами данных об изменении природной среды прошлого, включая седиментогенез, палеоклимат, растительность, биопродуктивность. Для их изучения используется комплекс биологических, геофизических, геохимических, мине-

ралоогических и других исследований (Tracking..., 2001). Одним из основных методов изучения непрерывных летописей развития водоемов, а также глобальных изменений окружающей среды является диатомовый анализ, направленный на исследования створок диатомовых водорослей, обладающих кремневым панцирем, который хорошо сохраняется в осадках. Учитывая тот факт, что диатомовые водоросли, находящиеся на нижнем уровне трофических пирамид, определяют существование и функционирование водных экосистем, можно использовать сведения об изменении ископаемых сообществ диатомей для восстановления состояния данных экосистем на определенных временных срезах.

Разнообразие генетических типов озер Приохотья, их относительно высокий уровень трофности определяют благоприятные условия существования водной биоты и, следовательно, значительный уровень видового богатства

гидробионтов (Харитонов, 2010). Изучению таксономического разнообразия современных альгофлор водоемов региона, их экологическим особенностям посвящено довольно много работ (Васильева, Пшенникова, 1996; Кузьмин, 1987; Кузьмин и др., 1990; Михайлов, 1984а, 1984б, 1985; Потапова, 1991, 1992; Харитонов, 1981, 1985, 2001, 2005, 2006, 2010, 2011, 2014; Харитонов, Силин, 2007; Черепанова, 2004; Potapova, 1996 и др.). Данные об ископаемых диатомовых водорослях озер северо-востока России немногочисленны. Детально охарактеризована лишь диатомовая палеофлора оз. Гранд (60°43'47.87" с.ш., 151°53'05.84" в.д.), расположенного в Магаданской области. На основе анализа изменений видового разнообразия, экологической структуры диатомовых палеосообществ, а также концентрации створок в 1 г сухого осадка выделено три комплекса диатомей в осадках этого озера, сформировавшихся в различные климатические эпохи позднего плейстоцена и голоцена (Черепанова и др., 2013).

Целью проведенного исследования являлось выявление реакции диатомовых водорослей озера Грязевое (Тальская группа озер, Магаданская область) на изменение природной среды в конце позднего плейстоцена и голоцене.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Озеро Грязевое (неформальное название) расположено в небольшой седловине вблизи поселка Талая (61°08'21.18" с.ш., 152°19'57.22" в.д.) (рис. 1). Длина его составляет 270 м, ширина — 180 м, площадь поверхности воды — 0.03 км², максимальная глубина — 2.7 м, абсолютные отметка уровня воды — 713 м.

Озеро слабопроточное. На юге в него впадает небольшой неглубокий ручей, а на севере вытекает ручей Озерный, впадающий в р. Талая (левый приток р. Буянда).

Котловина озера находится в пределах Северо-Охотского сегмента Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. К востоку от озера отмечены выходы пород ранней юры таборнинской свиты, представленной алевролитами, аргиллитами, песчаниками (Геологическая..., 1974). На западе и юго-западе, на сопках с абсолютными отметками 1132, 1389 м, распространены позднемеловые граниты, вулканогенные верхнемеловые породы Ольского и Хольчанского комплексов, сложенные преимущественно лавовыми брекчиями риодацитов и дацитов.

Озеро расположено в небольшой межгорной долине, выполненной отложениями зырянского оледенения, представленными валунно-глыбовым материалом с галькой, щебнем и гравием (рис. 1б). Ледники двигались по долинам с юга

и юго-запада, где находятся горные массивы с абсолютными отметками выше 1000 м.

Нижняя часть склонов сопки, окружающих озеро, покрыта лиственницей, выше по склонам произрастают кедровый стланик, карликовая березка. Вокруг озера разнообразен травяной покров, северный берег заболочен (рис. 2а, б).

Климат района резко континентальный, субполярный. По данным наблюдений за 1969–2021 гг., среднемесячная температура в январе составляла –3.3 °С, минимальная температура — –53.9 °С; максимальная температура в июне–июле была +33.4 °С, среднегодовая — –9.9 °С, среднегодовое количество осадков — 439.7 мм, среднегодовое атмосферное давление — 927.3 мм ртутного столба (<http://pogoda-service.ru/>).

Вода в оз. Грязевое относится к ультрапресной. Общая минерализация составляет 49.80 мг/л, рН — 6.80. По составу она соответствует гидрокарбонатной, кальциевой (Алекин, 1953). Среди катионов доминируют Ca²⁺ — 9.46 мг/л, Na⁺ — 2.50 мг/л, Mg²⁺ — 0.88, K⁺ — 0.27 мг/л, NH⁴⁺ — 0.04, примеси включают Mn²⁺ — 0.01 мг/л, Fe³⁺ — 0.02 мг/л, Cu²⁺ — 0.03 мг/л, Co²⁺ — 0.01 мг/л, Zn²⁺ — 0.04 мг/л. Сумма анионов составляет 36.58 мг/л, которые включают HCO³⁻ — 33.90 мг/л, SO⁴⁻ — 0.35 мг/л, NO²⁻ — 2.00 мг/л, NO³⁻ — 0.08 мг/л, Cl⁻ — 0.25 мг/л (Минюк и др., 2022).

Минерализация, возможно, обусловлена влиянием подземных вод. Общее содержание катионов и анионов в воде р. Талой составляет 62 мг/л, в термальных скважинах — 450–980 мг/л (Брагин и др., 2021). Ил из озера использовался на курорте Талая для бальнеологических процедур (Глотов, Глотова, 2007).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Бурение осадков оз. Грязевое проводилось с использованием пробоотборника Ливингстона (Wright et al., 1984). В восточной части озера пробурены две скважины Гз-1 и Гз-2, глубиной 579 и 476 см, соответственно. Материалы исследований осадков скв. Гз-1 представлены в настоящей работе. Диатомеи из осадков скв. Гз-2 не изучались. Пробы воды (8 проб) объемом 2 л отобраны в летнее время на глубине 10–30 см от поверхности водоема. Химический анализ проб выполнен в Северо-Восточном центре коллективного пользования Северо-Восточного комплексного научно-исследовательского института им. Н.А. Шило ДВО РАН методами титриметрии, фотоколориметрии и атомно-абсорбционной спектроскопии с использованием утвержденных унифицированных методических указаний на спектрофотометре UVmini-1240 (SHIMADZU), атомно-эмиссионном спектрометре Agilent 4100 MP-AES, а также весовым методом. Определяли

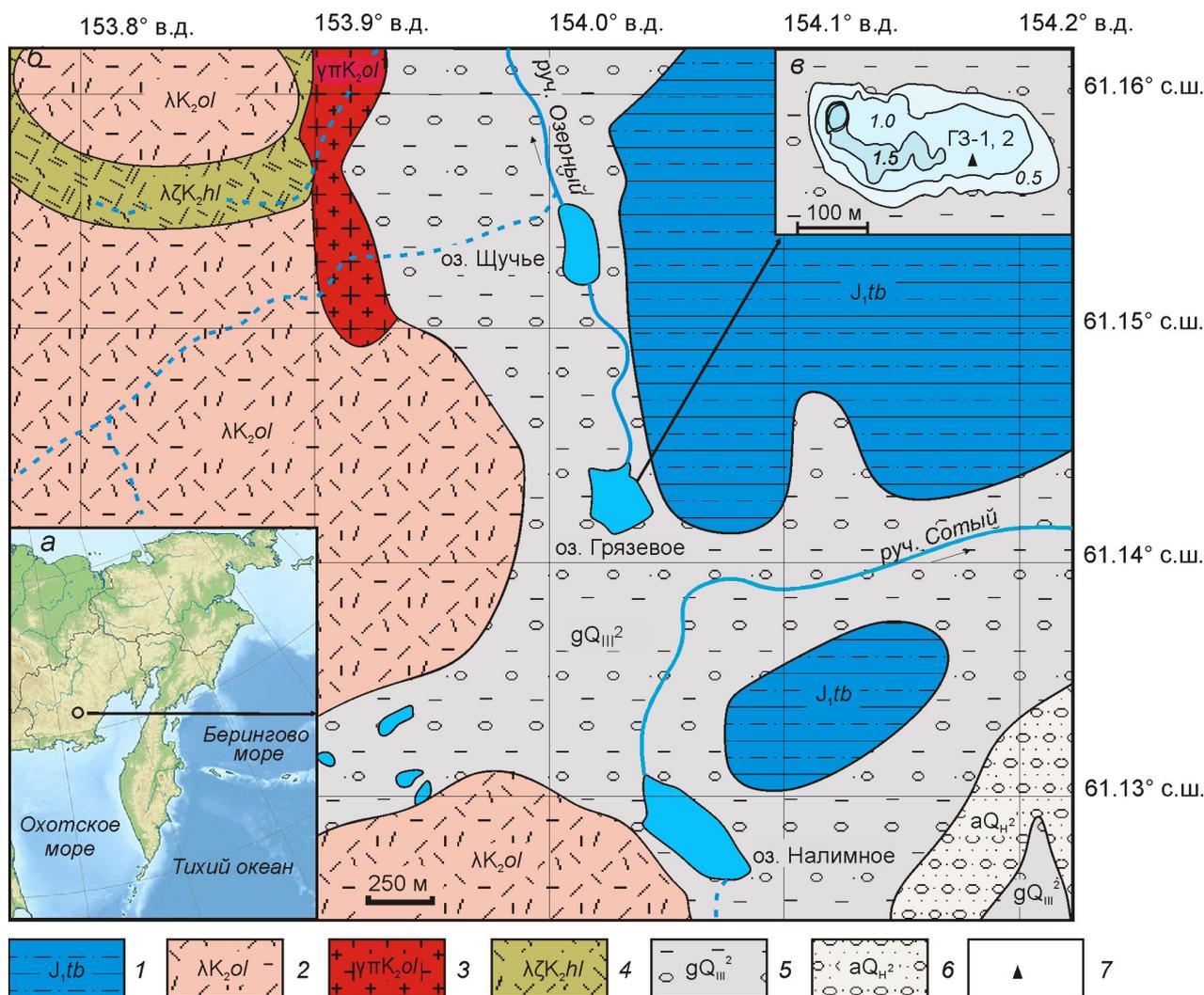


Рис. 1. Расположение оз. Грязевоe (а), геологическая схема окрестностей озера (б) и батиметрическая карта озера с местоположением скважин (в): 1 — осадочные породы таборнинской свиты ранней юры; 2 — верхнемеловые породы ольского комплекса; 3 — позднемеловые граниты; 4 — верхнемеловые породы хольчанского комплекса; 5 — ледниковые отложения зырянского оледенения; 6 — аллювиальные голоценовые отложения; 7 — местоположение скважин.

Fig. 1. Location of the Gryazevoe Lake (а), geological chart of the lake vicinity (б), and bathymetric map of the lake with cores location (в): 1 — sedimentary rocks of the Taborninsky Formation of the Early Jurassic; 2 — Late Cretaceous rocks of the Ola complex; 3 — Late Cretaceous granites; 4 — Late Cretaceous rocks of the Kholchan Complex; 5 — glacial deposits of the Zyryanka glaciation; 6 — Holocene alluvial deposits; 7 — location of wells.

содержание анионов и катионов, жесткость и щелочность воды, значения pH, а также элементов-примесей — Cd^{2+} , Cr^{3+} , Mo^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} , Cu^{2+} , Ba^{2+} , Sr^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} . Предел изменений для элементов составлял 0.005 мг/л.

Керн скв. ГЗ-1 после описания и фотографирования разделен на сегменты длиной 1 см для различных видов анализов.

Радиоуглеродное датирование органических микрочастиц из керна выполнено в лаборатории Ангстрема Уппсальского университета (Швеция). Калиброванный возраст определен по программе Calib 8.20 (<http://calib.org/calib/calib.html>).

Гранулометрический анализ выполнен в Дальневосточном геологическом институте ДВО

РАН на лазерном дифракционном анализаторе SALD-2300 (Shimadzu, Япония).

Измерения магнитной восприимчивости (МВ) осадков выполнены на многофункциональном каппаметре MFK 1FA («AGICO» Ltd.).

Относительное количество органического материала оценено по величине потери при прокаливании (LOI) после прогрева проб до 500°C (Heiri et al., 2001). Формы частиц тефры исследованы в прозрачных слайдах в проходящем свете на микроскопе Motic DM-BA-300.

Методом диатомового анализа было исследовано 46 проб.

Техническую обработку образцов проводили по стандартной методике (Прошкина-Лавренко,

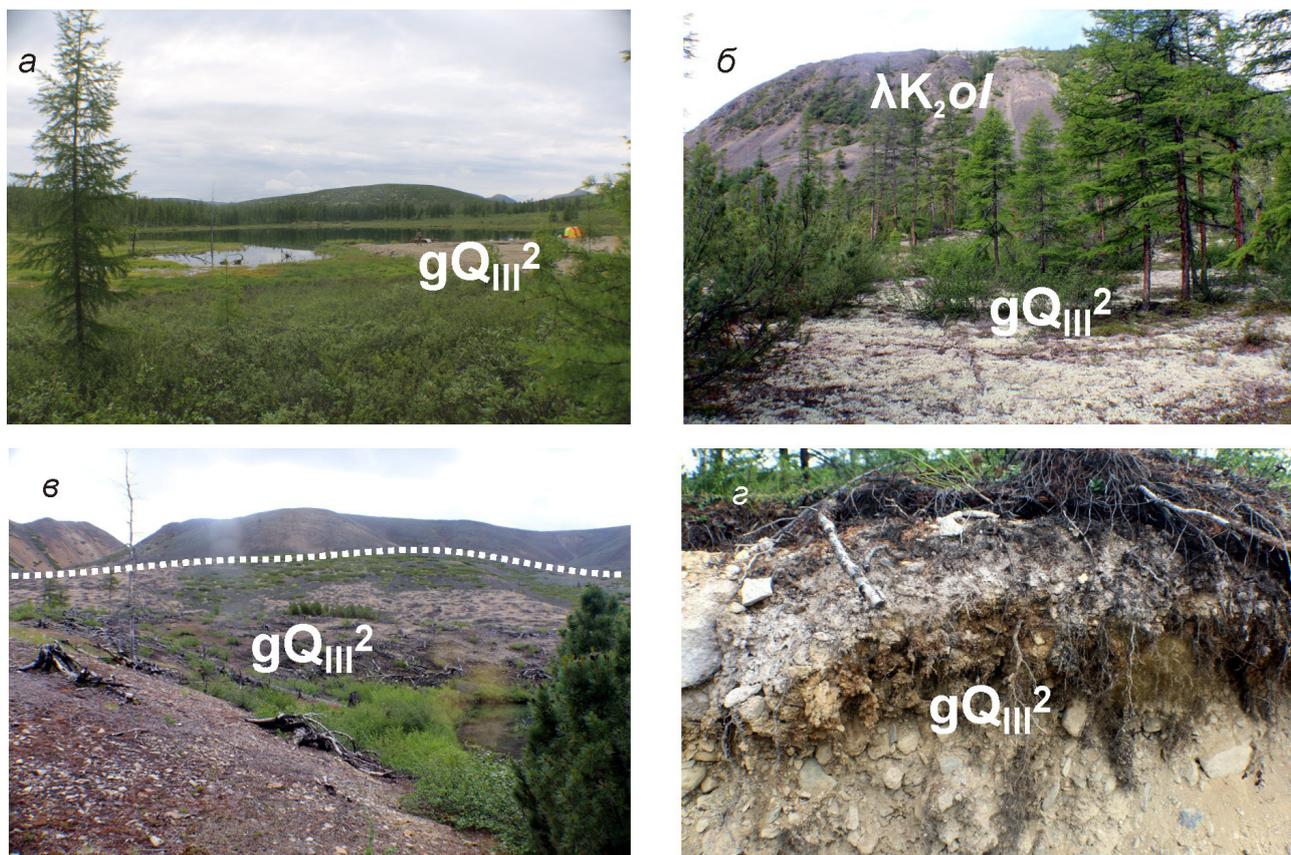


Рис. 2. Общий вид озера (а) и ледниковые отложения (б–д). Пунктирной линией показана граница ледниковых отложений.

Fig. 2. General view of the lake (a) and glacial deposits (b–d). Dashed line marks boundary of glacial deposits.

1974). Для удаления органического вещества и разрыхления породы образцы кипятили в растворе триполифосфата натрия с добавлением 1–5 мл 30% раствора перекиси водорода. Разделение осадка на фракции и отмывку их от химических реактивов проводили отмучиванием в дистиллированной воде. Из полученного материала готовили постоянные препараты, при этом использовали среду Эляшева (коэффициент преломления 1.67–1.68) для четкой видимости структуры створок. Подготовку постоянных препаратов осуществляли одинаково: навеска осадка для всех изученных проб составляла 1 г, осадок после химической обработки разводили в 100 мл дистиллированной воды, на покровное стекло 18×18 мм наносили 0.06 мл перемешанной взвеси. Это позволило рассчитать концентрацию створок в 1 г сухого осадка (Avramenko et al., 2015).

Изучение водорослей, подсчет створок в препарате, микрофотографирование диатомей проводили с помощью светового микроскопа Ахиорпан 40 с иммерсионной жидкостью при увеличении $\times 1000$. В отложениях встречены диатомовые створки хорошей сохранности. В некоторых интервалах скважины (335, 365–427, 515, 561 см) обнаружены единичные диатомеи — от 1 до 14 створок в 10 горизонтальных

рядах препарата, а в некоторых — створки отсутствовали вовсе (291–321, 351, 441–455, 485, 531, 575 см). В каждом из препаратов в интервале 11–271 см было подсчитано более 300 створок. В пробах на глубинах 255, 471, 501, 545 см их количество едва превысило 100 штук. Общее количество диатомовых створок использовали для выяснения степени участия отдельных таксонов в диатомовых ископаемых сообществах. Для интерпретации диатомовых данных были выделены следующие экологические группы, согласно (Passy, 2007; Rimet, Bouchez, 2012; Zelnik et al., 2018): 1) планктонные свободноживущие и колониальные; 2) тихопланктонные, часть жизненного цикла обитающие на дне, другую — в планктонных сообществах; 3) прикрепленные к субстрату бентосные с крупными створками, обитающие в водах с высоким содержанием питательных веществ; 4) прикрепленные к субстрату бентосные с мелкими створками, способные обитать в водах с невысоким содержанием питательных веществ; 5) свободноживущие бентосные таксоны. Распределение представителей этих групп позволило реконструировать условия обитания диатомей в процессе формирования осадков.

Построение диатомовой диаграммы, демонстрирующей распределение основных таксонов и

экологических групп по разрезу, было осуществлено с помощью программ TILIA и TILIA Graph (<http://www.tiliait.com>). Выделение локальных диатомовых зон сделано на основе кластерного анализа с использованием метода наименьших квадратов (CONISS) (Grimm, 1987).

В работе использована классификация диатомей согласно AlgaeBase (<http://www.algaebase.org>). Эколого-географические характеристики таксонов взяты из монографии (Баринова и др., 2006), а также некоторых других источников, ссылки на которые далее приведены в тексте.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Литология. В разрезе скв. Гз-1 (рис. 1) выделено два слоя.

1. Слой 1, гл. 0–230 см. Алеврит, неслоистый органогенный, оливково-серого цвета, в неокисленном состоянии цвет серый, темно-серый, с редкими включениями органики, преимущественно обломков веток растений (рис. 3а). Осадки содержат вивианит в виде землистых форм синего цвета размером до нескольких мм в диаметре. На глубине 196.5–198 см отмечен прослой тефры белого света (рис. 3в). Нижний контакт разорванный, не четкий, возможно, из-за

биотурбаций. Стекла преимущественно прозрачные, остроугольные, пластинчатые, с продольно-волоконистой структурой, газовыми пузырьками (рис. 3е). Тефра связывается с кальдерообразующим извержением вулкана Курильского озера на Камчатке, произошедшем, по данным радиоуглеродного анализа, 7600 л.н. (Ponomareva et al., 2004). Гранулометрические спектры отложений слоя одномодальные, размер частиц варьирует от долей микрона до 200 мкм (рис. 3з). Осадки слабомагнитные, значения магнитной восприимчивости составляют $(0.010–0.086) \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$ (среднее = $0.037 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$).

2. Слой 2, гл. 230–579 см. В верхней части (гл. 230–280 см) алеврит, серый с неявно выраженной слоистостью. Нижнюю часть слоя (гл. 280–579 см) слагают алевриты пластичные, сизовато-серые, слоистые (рис. 3б). Слоистость выражена тонкими прослоями песчаных алевритов, органики, с обильными голубыми включениями вивианита. В основание слоя залегают серые пески. Осадки слоя сортированы хуже осадков слоя 1. Гранулометрическое распределение, как правило, двухмодальное, диаметр частиц изменяется от долей микрона (глины) до 200 мкм (пески) (рис. 3д). Моды расположены в областях 1–10 и 10–100 мкм. Магнитная восприимчивость верхней

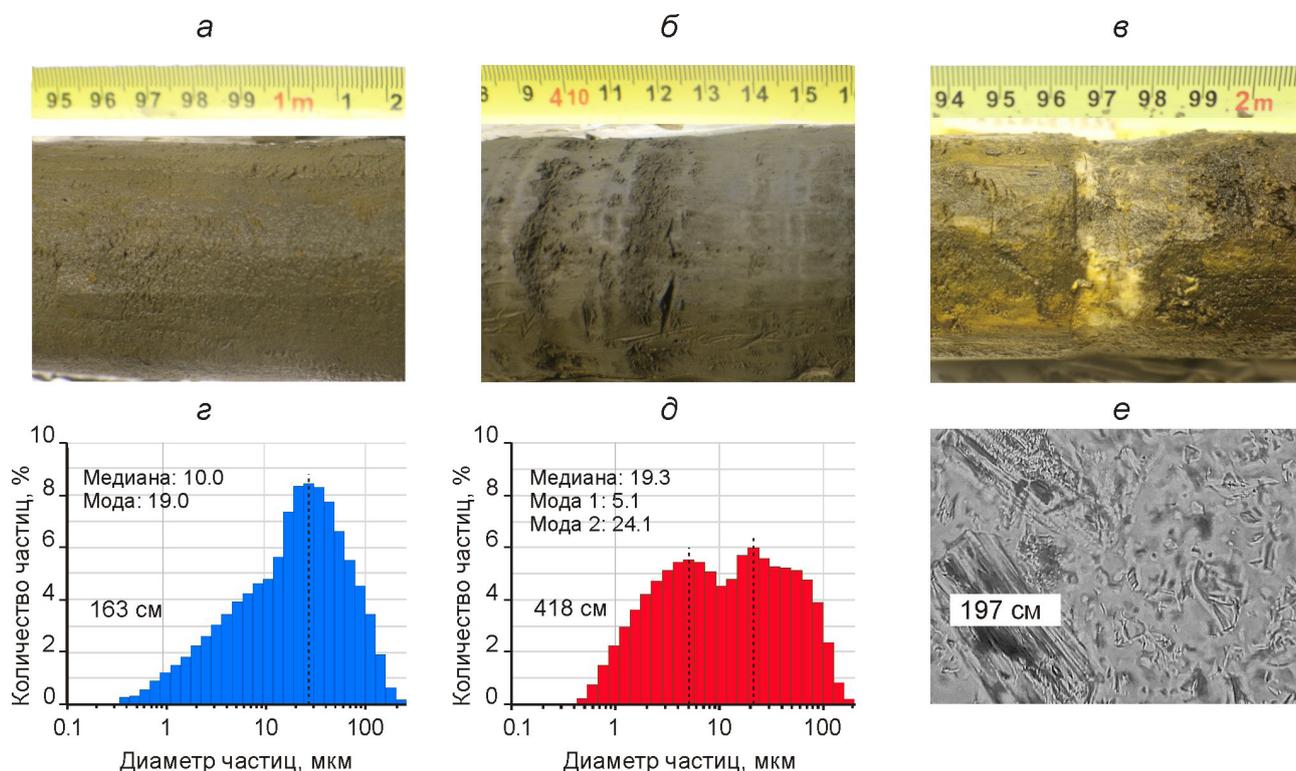


Рис. 3. Литологические характеристики осадков озера (скв. Гз-1): а, б, в — фотографии отложений слоя 1, 2 и прослоя тефры, соответственно; з и д — характерные гранулометрические спектры осадков слов 1 и 2; е — микрофотографии тефры в проходящем свете.

Fig. 3. Lithological characteristics of lake sediments (well Gz-1): а, б, в — photos of layers 1, 2 deposits and tephra interbed, respectively; з and д — representative granulometric spectra of sediments of layers 1 and 2; е — microphotos of tephra in transmitted light.

РЕАКЦИЯ ДИАТОМОВЫХ ВОДОРΟΣЛЕЙ

части слоя варьирует от 0.0267 до 0.503×10^{-6} м³/кг (среднее = 0.234×10^{-6} м³/кг). Нижняя часть слоя более магнитная. Значения магнитной восприимчивости изменяются в пределах $0005-1.94 \times 10^{-6}$ м³/кг (среднее = 0.57×10^{-6} м³/кг).

Возрастная модель. Четыре радиоуглеродные датировки (табл. 1) и возраст тефры (Ropomageva et al., 2004) были использованы для построения возрастной модели (рис. 4) с применением программы Bacon (Blaauw, Christen, 2011). Самая молодая датировка (1927 лет BP) при расчетах отбракована (рис. 4). Рассчитанная средняя скорость осадконакопления составляет 2 мм/год.

Диатомовый анализ. В осадках оз. Грязевого встречается богатая диатомовая флора, представленная 189 видами и внутривидовыми таксонами (рис. 5).

Анализ экологической структуры ископаемых диатомовых сообществ позволил выделить в осадках озера три зоны (ДзГз), комплексы диатомей которых формировались в разных условиях среды. Основными критериями для выделения комплексов послужили: изменение концентрации створок диатомей, участие в палеосообществах таксонов, различающихся по местообитанию (планктон, бентос), обладающих

Радиоуглеродные датировки органических остатков скважины Гз-1
Radiocarbon ages of organic material from well Gz-1

Лаб. номер	Глубина, см	$\delta^{13}\text{C}\text{‰V-PDB}$	¹⁴ C возраст BP	Кал. возраст BP
Ua-71985	146	-14.8	1927 ± 37	1838 ± 101
Ua-71986	211	-34.3	9334 ± 46	10387 ± 3
Ua-71987	346-347	-27.9	12556 ± 42	14632 ± 79
Ua-71988	407	-	12772 ± 57	15261 ± 208
Тефра	196.5–198		7618 ± 14	8401 ± 21

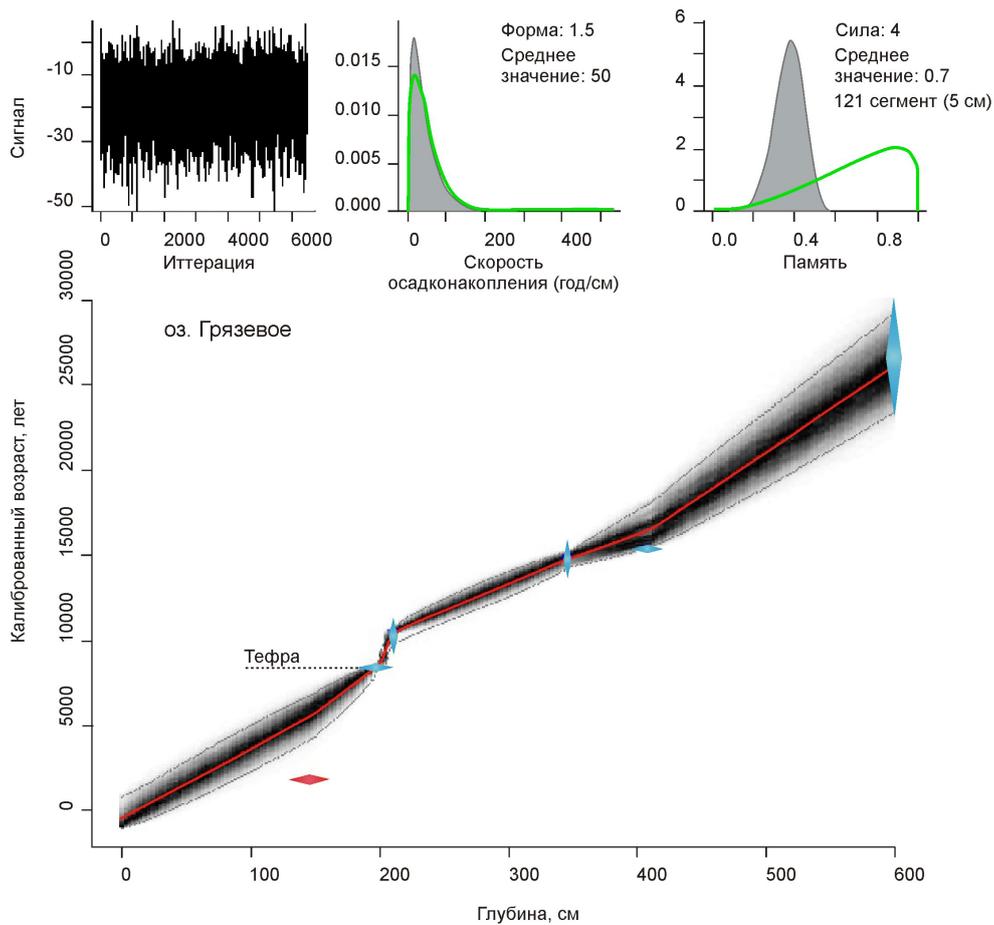


Рис. 4. Возрастная модель для осадков скв. Гз-1 оз. Грязевого. Пунктирные линии показывают 95% достоверность, красный ромб — отбракованная дата.

Fig. 4. Age model for the sediments of well Gz-1 from Gryazevoe Lake. Dashed lines show 95% confidence, red rhomb — rejected date

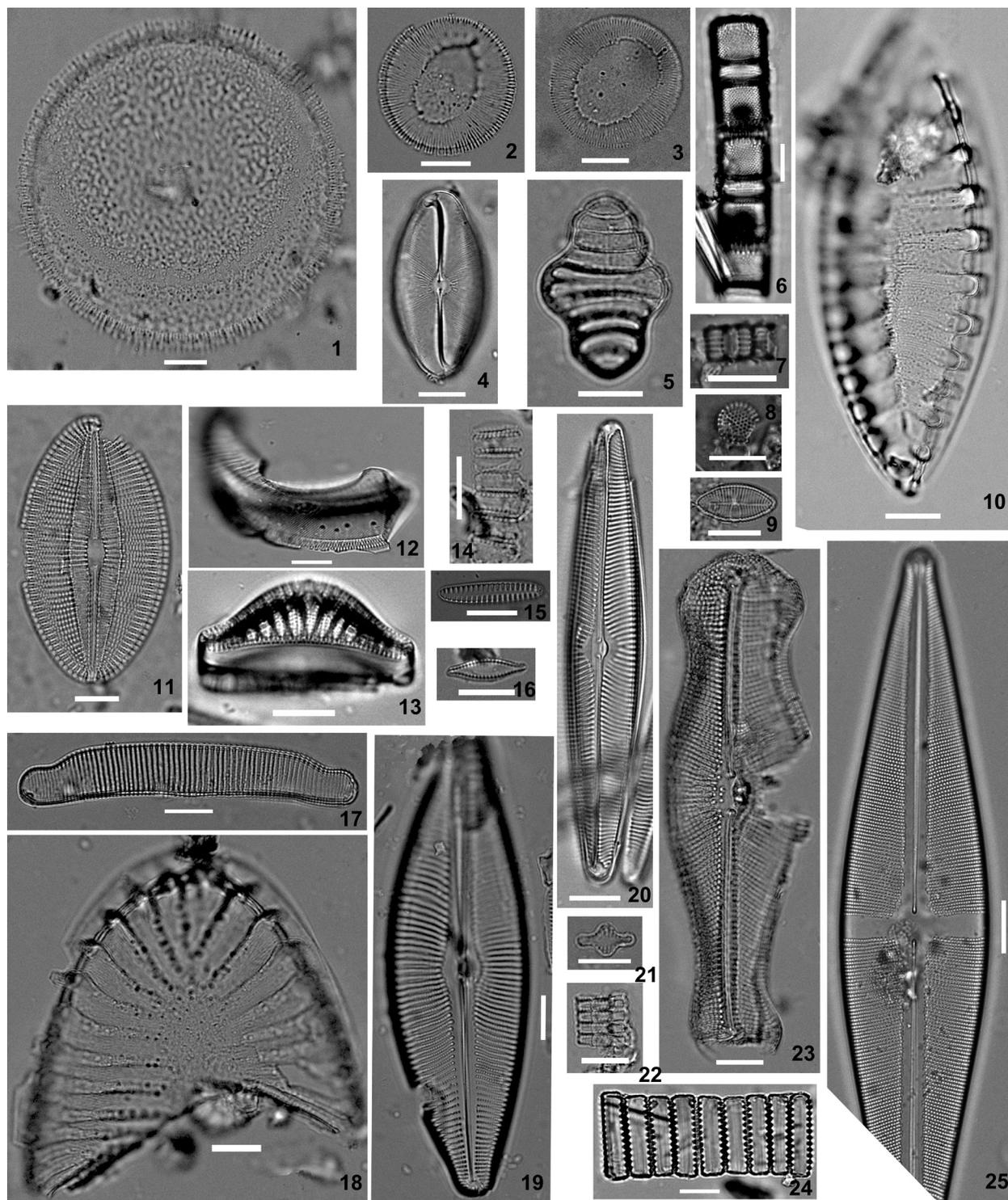


Рис. 5. Ископаемые диатомовые водоросли оз. Грязевого: 1, 12 — *Ellerbeckia arenaria* f. *teres* (Brun) R.M. Crawford; 1 — вид со створки; 12 — соединительный поясок; 2, 3 — *Lindavia michiganiana* (Skvortsov) T. Nakov, Guillory, M.L. Julius, E.C. Theriot et A.J. Alverson; 4 — *Eucocconeis flexella* (Kützing) Meister; 5 — *Tetracyclus glans* (Ehrenberg) F.W. Mills; 6 — *Aulacoseira valida* (Grunow) Krammer, колония; 7, 8 — *Aulacoseira humilis* (A. Cleve) Genkal et Trifonova; 7 — колония; 8 — вид со створки; 9 — *Skabitschewskia oestrupii* (A. Cleve) Kuliskovskiy et Lange-Bertalot; 10 — *Iconella linearis* (W. Smith) Ruck et Nakov; 11 — *Diploneis finnica* (Ehrenberg) Cleve; 13 — *Epithemia smithii* Carruthers; 14 — *Staurosira venter* (Ehrenberg) Cleve et J.D. Möller: колония; 15, 24 — *Staurosirella lapponica* (Grunow) D.M. Williams et Round; 15 — вид со створки; 24 — колония; 16 — *Pseudostaurosira brevistriata* (Grunow) D.M. Williams et Round; 17 — *Eunotia monodon* Ehrenberg; 18 — *Iconella hibernica* (Ehrenberg) Ruck & Nakov; 19 — *Cymbopleura inaequalis* (Ehrenberg) Krammer; 20 — *Navicula vulpina* Kützing; 21, 22 — *Staurosira construens* Ehrenberg: 21 — вид со створки; 22 — колония; 23 — *Didymosphenia geminata* (Lyngbye) Mart. Schmidt; 25 — *Stauroneis phoenicenteron* (Nitzsch) Ehrenberg. Масштабная линейка — 10 мкм.

РЕАКЦИЯ ДИАТОМОВЫХ ВОДОРΟΣЛЕЙ

разной степенью толерантности к динамике водной толщи и содержанию питательных веществ в воде (рис. 6, 7).

Осадки **зоны ДзГз 1** (575–280 см) отличаются самыми низкими концентрациями створок. В указанном интервале обнаружены лишь

несколько прослоев, содержащих необходимое для статистической обработки количество диатомей (чуть более 100 створок). В диатомовых палеосообществах, выделенных на разных глубинах, отмечается смена доминантов. Так, планктонный индикатор олиготрофных вод

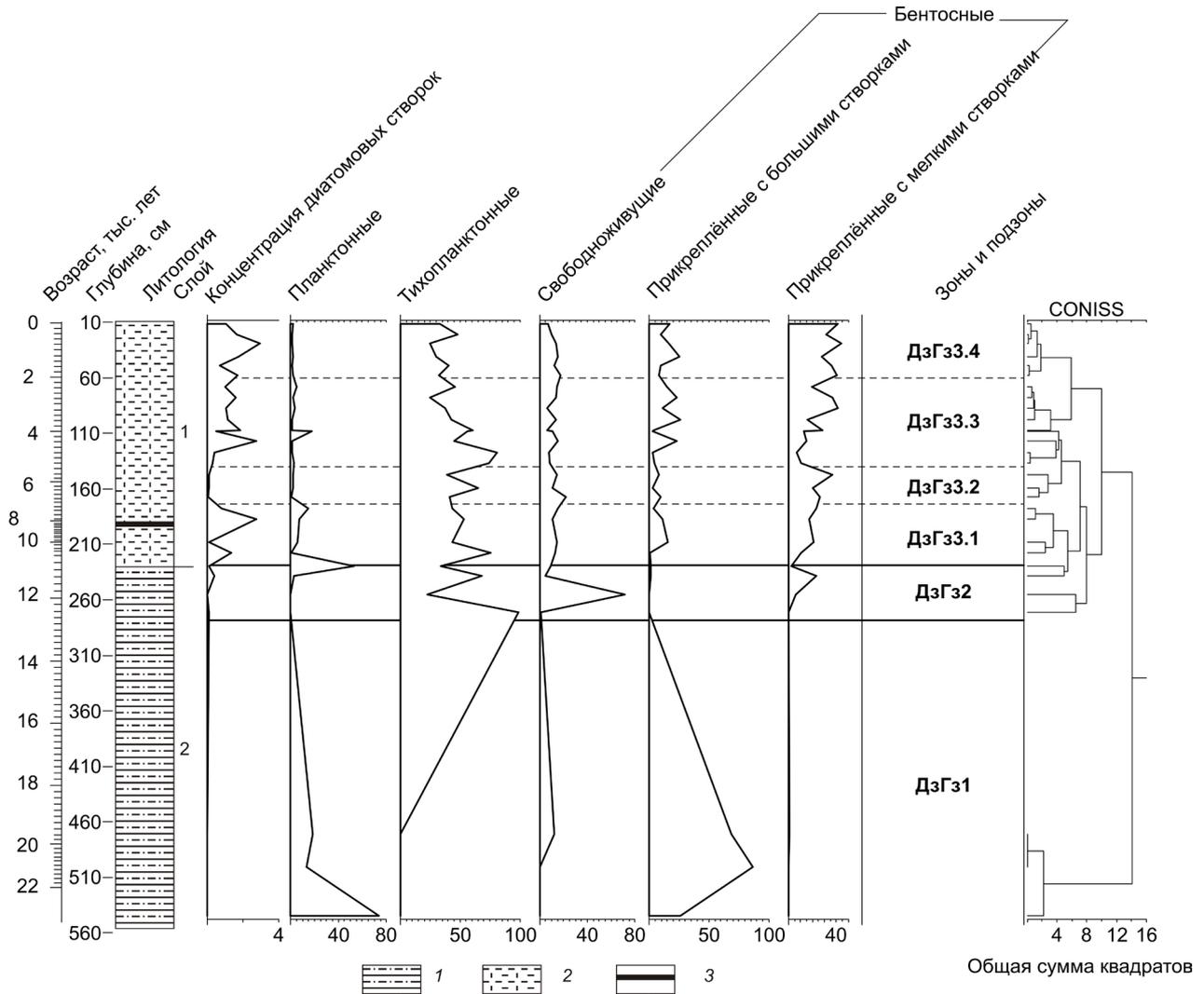


Рис. 6. Концентрация створок диатомей в 1 г сухого осадка ($\times 10^6$) и распределение представителей экологических групп (%) в скв. Гз-1: 1 — тонкослоистый алеврит; 2 — органогенный неслоистый алеврит; 3 — тephра.

Fig. 6. Concentration of diatom valves per 1 g of dry sediment ($\times 10^6$) and distribution of representatives of ecological group (%) in the well Gz-1: 1 — thinly laminated silt; 2 — organogenic massive silt; 3 — tephra.

Fig. 5. Fossil diatoms of the Gryazevoe Lake: 1, 12 — *Ellerbeckia arenaria* f. *teres* (Brun) R.M. Crawford: 1 — valve face; 12 — girdle band; 2, 3 — *Lindavia michiganiana* (Skvortsov) T. Nakov, Guillory, M.L. Julius, E.C. Theriot et A.J. Alverson; 4 — *Eucocconeis flexella* (Kützing) Meister; 5 — *Tetracyclus glans* (Ehrenberg) F.W. Mills; 6 — *Aulacoseira valida* (Grunow) Krammer, chain; 7, 8 — *Aulacoseira humilis* (A. Cleve) Genkal et Trifonova: 7 — chain; 2 — valve face; 9 — *Skabitschewskia oestrupii* (A. Cleve) Kuliskovskiy et Lange-Bertalot; 10 — *Iconella linearis* (W. Smith) Ruck et Nakov; 11 — *Diploneis finnica* (Ehrenberg) Cleve; 13 — *Epithemia smithii* Carruthers; 14 — *Staurosira venter* (Ehrenberg) Cleve et J.D. Möller: chain; 15, 24 — *Staurosirella lapponica* (Grunow) D.M. Williams et Round; 16 — *Pseudostaurosira brevistriata* (Grunow) D.M. Williams et Round; 17 — *Eunotia monodon* Ehrenberg; 18 — *Iconella hibernica* (Ehrenberg) Ruck & Nakov; 19 — *Cymboplectra inaequalis* (Ehrenberg) Krammer; 20 — *Navicula vulpina* Kützing; 21, 22 — *Staurosira construens* Ehrenberg: 21 — valve face; 22 — chain; 23 — *Didymosphenia geminata* (Lyngbye) Mart. Schmidt; 25 — *Stauroneis phoenicenteron* (Nitzsch) Ehrenberg. Scale bar — 10 μ m.

с низким содержанием питательных веществ *Lindavia michiganiana* (Kireta, 2018; Stoermer, 1993) доминирует на глубине 545 см (74,2%) и является субдоминантом на глубинах 501 см (13,1%) и 471 см (17,7%). Бентосная *Ellerbeckia arenaria* f. *teres* (Rimet, Bouchez, 2012), считающаяся также обитателем олиготрофных водоемов (Krammer, Lange-Bertalot, 1991), доминирует на глубине 501 см (85,2%) и 471 см (66,0%), и отмечена как субдоминант на глубине 545 см (25,8%). К. Краммер и Х. Ланге-Берталот (Krammer, Lange-Bertalot, 1991) включают этот таксон в группу аэрофильных диатомей, способных обитать на спорадически увлажняемых, временами пересыхающих поверхностях. Бентосная *Iconella hibernica*, встречающаяся непосредственно на дне водоемов (Krammer, Lange-Bertalot, 1988), появляется в доминирующей группе на глубине 471 см (11,6%). Особенностью комплекса является низкое видовое богатство. Остальные обнаруженные таксоны представлены единичными створками.

В осадках **зоны ДзГз 2** (280–230 см) постепенно начинает увеличиваться концентрация створок. Особенностью зоны, также как и в ДзГз 1, является ярко выраженное доминирование разных таксонов по разрезу. На глубине 271 см — это тихопланктонная *Staurosira venter* (83,1%) с субдоминантом той же экологической группы *Pseudostaurosira brevistriata* (15,0%); 255 см — *I. hibernica* (63,2%) и субдоминант *S. venter* (12,8%); с глубины 238 см, на которой преобладает *S. venter* (45,6%), а субдоминантом является бентосная *Skabischewskia oestrupii* (16,4%), резко увеличивается видовое богатство диатомей. Выше по разрезу состав доминирующей группы изменяется. На глубине 230 см доминантами являются маленькая, с диаметром створки < 10 мкм, центрическая планктонная *Aulacoseira humilis* (42,5%), обитатель олиготрофных вод (Genkal, Kulikovskiy, 2014), и *S. venter* (25,1%). Необходимо отметить также высокие оценки обилия грубоокремненной *Aulacoseira valida* (9,7%).

Зона ДзГз 3 (230–11 см). В осадках, охарактеризованных данным комплексом, концентрация створок повышается и достигает своего максимума, но не остается постоянной внутри интервала. Особенностью комплекса является высокое видовое разнообразие диатомей и постоянное присутствие в доминирующей группе таксонов с небольшими створками < 20 мкм: *S. venter*, *Staurosirella pinnata*, *Staurosirella lapponica*, *Staurosira construens*, *P. brevistriata*, объединяемых в группу *Fragilaria sensu lato* (Smol et al., 2005), а также разнообразие и относительное обилие представителей семейства Cymbellaceae Greville, отнесенных к родам *Cymbella*, *Cymbopleura*, *Encyonema*, *Encyonopsis*, всего 15 таксонов. Изме-

нения концентрации створок в осадках, соотношения представителей разных экологических групп, а также состава доминирующей группы позволило выделить в интервале зоны четыре подзоны (ДзГз 3.1 — ДзГз 3.4).

Подзона ДзГз 3.1 (230–174 см). Концентрация створок в осадках возрастает почти в 10 раз. Ярко выраженное доминирование *S. venter* (до 44,9%) определяет формирование монодоминантных диатомовых ископаемых сообществ. На глубине 208 см (~10,0 тыс. л.т.н.) концентрация створок уменьшается, и обилие *S. venter* снижается до 28,2%. В доминирующей группе появляются *Cymbella aspera* (12,3%), обитающая на покрытых мхом увлажненных берегах небольших ручьев (Jüttner et al., 2010), и встречающийся на илистых грунтах *Stauroneis phoenicenteron* (8,5%) (Mann, Stickle, 1995), увеличивается разнообразие и обилие болотных таксонов рода *Eunotia* (*E. minor*, *E. monodon*, *E. glacialis*, *E. incisa* и др.).

Подзона ДзГз 3.2 (174–140 см). Для осадков данной подзоны фиксируется снижение концентрации створок диатомей. Наиболее обильны тихопланктонные *S. venter* (до 35,9%), *S. construens* (до 12,3%) и *S. pinnata* (до 15,9%). В группу доминантов также входит *Amphora copulata* — обитатель эпилитона (Baker et al., 2022), прикрепляющийся к камням (Round, 1991).

Подзона ДзГз 3.3 (140–68 см). Концентрация створок в осадках резко повышается. Для ископаемых диатомовых сообществ характерно постепенное снижение вверх по разрезу обилия *S. venter* (с 58,4 до 11,1%) и *S. pinnata* (с 24,7 до 8,4%), и увеличение численности крупной (более 100 мкм) бентосной *Cymbopleura inaequalis* (до 24,6%), предпочитающей медленно текущие известковые воды (Krammer, Lange-Bertalot, 1986) и обитающей в горных районах (Barinova, Niyatbekov, 2019; Catalan et al., 2009). На разных глубинах с высокими оценками обилия встречаются виды из разных местообитаний: бентосные *Achnantheidium minutissimum* (до 14,0%), *A. copulata* (до 12,6%), *Navicula vulpina* (до 6,2%), *N. radiosa* (до 6,0%), планктонная *A. valida* (до 10,6%), тихопланктонная *Fragilaria* sp. (до 11,1%), эпифитная *Epithemia smithii* (8,9%). С глубины 117 см появляется и постепенно увеличивает обилие вверх по разрезу бентосная *Denticula kützingii* (с 4,0 до 20,0%), предпочитающая слабощелочные воды с высокой проводимостью (Zgrundo et al., 2017).

Подзона ДзГз 3.4 (68–11 см). Концентрация створок остается высокой. Ярко выраженное доминирование *S. venter* прекращается, оценки ее обилия в пределах интервала изменяются от 5,9 до 22,6%. Диатомовые сообщества становятся полидоминантными. Среди наиболее обильных таксонов встречены *C. inaequalis*

(до 22.6%), *Stausirella lapponica* (до 16.5%), *S. pinnata* (до 12.8%), *Cymbopleura incerta* var. *spitsbergensis* (до 12.2%), *A. copulata* (до 11.9%), *N. vulpina* (до 8.5%), *Eucocconeis flexella* (до 9.8%), обитающие в самых разных местообитаниях — планктон, бентос, и имеющие разную толерантность к параметрам окружающей среды. Возрастает численность бентосной *Epithemia smithii* (до 12.20%). К. Краммер и Х. Ланге-Берталот (Krammer, Lange-Bertalot, 1988) сообщают, что этот таксон широко распространен в Северной Европе, часто как эпифит, в мезотрофных и эвтрофных прудах, озерах и реках.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные данные позволили выявить реакцию диатомовых ископаемых сообществ на изменения окружающей среды и установить этапы развития озерной экосистемы в позднем плейстоцене-голоцене.

Комплекс ДзГз 1 (24.844–19.564 тыс. л.н.) формировался в позднем плейстоцене во время холодной морской изотопной стадии (МИС) 2. Низкие концентрации створок в осадках или их полное отсутствие свидетельствует о существовании постоянного ледового покрова озера, который препятствовал развитию фотосинтезирующих водорослей. Тем не менее, практически постоянные скорости осадконакопления по всему разрезу, предполагают непрерывное поступление в водоем тонкого детритового материала, лишенного органических остатков и имеющего высокие значения магнитной восприимчивости. Скорее всего, он приносился в летнее время, когда узкая кромка льда вблизи берега оттаивала. Присутствие льда в центральной части препятствовало ветровому перемешиванию воды и обогащению ее кислородом, создавая в придонных водах и верхних слоях осадков аноксидные условия, благоприятные для образования вивианита ($\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) и сульфидов железа (Minyuk et al., 2013; Suits, Wilkin, 1998; Wilkin, Barnes, 1997). Наличие тонкослойных осадков указывает на отсутствие биотурбаций. Известно, что подобные условия были характерны для многих озер Северо-Востока России во время холодных климатических стадий (Минюк, Борходоев, 2006; Melles et al., 2007, 2012; Minyuk, Subbotnikova, 2021).

Выявленные редкие прослойки с диатомеями в этом интервале осадков могут свидетельствовать о возможных кратковременных потеплениях, которые отмечались в холодной МИС 2. Так, осадки с диатомеями на глубине 545 см могли сформироваться ~23.4 тыс. л.н. во время интерстадиала GI 2.2 (Cohen, Gibbard, 2019; Rasmussen et al., 2014). В период потеплений зона оттаивания

ледового покрова расширялась, и в ней развивались бентосные виды, или такой обитатель неглубоких озер тундровой зоны, каковым является *L. michiganiana* (Balhs et al., 2018). Установленное ярко выраженное доминирование одного таксона может быть обусловлено специфическими экологическими условиями, а также кратким периодом их существования и довольно резкой их сменой.

По-видимому, именно в МИС 2 начала формироваться котловина озера. Изучение отложений вокруг оз. Грязевого показало, что они сформировались во время зырянского оледенения (МИС 4), в то время как в скважине Гз-1, согласно полученным радиоуглеродным датировкам, осадков этого возраста не установлено.

Особенности комплекса ДзГз 2 (12.689–11.116 тыс. л. н.), отличающегося, прежде всего, непостоянством состава доминирующей группы, свидетельствуют о его переходном характере, обусловленном сменой экологических условий. Комплекс формировался на границе плейстоцена и голоцена, которая проводится по окончанию холодного события поздний дриас, соответствующего в гренландских ледовых шкалах стадиялу GS-1, на уровне 11.7 тыс. л.н. (Cohen, Gibbard, 2019; Walker et al., 2009). На начальной стадии формирования осадков этого комплекса в условиях еще низких температур в озере появляются и начинают активно развиваться тихопланктонные виды. Скорее всего, водоросли развивались лишь в самом верхнем прогреваемом слое воды. Можно предположить, что они также приносились водотоками, впадающими в озеро. Водная растительность, на которой могли бы поселиться диатомеи, отсутствовала, и в придонном слое температуры были слишком низкими для развития диатомей. Небольшой выбор местообитаний не способствовал высокому разнообразию таксонов. Появление *Iconella* в вышележащих осадках можно считать индикатором начала устойчивого потепления климата и связанного с ним последующего развития более сложной и разнообразной диатомовой флоры озерной экосистемы. Подобные тенденции в развитии диатомовых флор отмечаются для последнего тысячелетия в озерах арктической Канады (Besonen et al., 2008). Видовое разнообразие продолжает оставаться низким, отсутствуют планктонные, эпифитные таксоны, что обусловлено еще невысокими температурами и продолжительным ледовым режимом, соответствующим похолоданию 11.4 тыс. л.н. (Rasmussen et al., 2014), но в мелководной зоне озера вода все-таки прогревается достаточно хорошо, чтобы развивался бентосный *I. hibernica*. Примерно 11.3 тыс. л.н. концентрация створок и разнообразие диатомей возрастают и появляются представители рода *Aulacoseira*, в том числе с крупными створками,

которые обитают в водах с повышенной турбулентностью, благодаря которой они получают возможность, находиться в толще воды (Round et al., 1990; Röhland et al., 2015). Таким образом, тенденция потепления климата продолжается, увеличивается контрастность сезонов года, об этом свидетельствует рост разнообразия диатомей, относящихся к разным экологическим группам.

Изменяется и характер поступающего обломочного материала. Происходит накопление алевритов с неясно выраженной слоистостью, включающих большее количество органического материала, по сравнению с нижележащими слоями. Разбавление осадка органикой направленно уменьшает магнитную восприимчивость.

Начало периода, соответствующего ДзГз 3.1 (11.116–7.103 тыс. л.н.), ознаменовался резким увеличением концентрации створок диатомовых водорослей в осадках. Устойчивый рост обилия мелких представителей *Fragilaria sensu lato*, скорее всего, связан с некоторым повышением температур поверхностных вод водоема. Аналогичная ситуация, зафиксированная в голоценовых осадках маленького субарктического озера Канады, была охарактеризована как общая реакция сообществ диатомовых водорослей на потепление (Podrیتske, Gajewski, 2007). Вместе с тем, условия среды остаются непостоянными. Выделенные подзоны свидетельствует об их изменении в течение формирования осадков этой зоны. Так, начавшееся около 10.7 тыс. л.н. повышение температур сменилось относительным похолоданием (около 10.0 тыс. л.н.), которое, вероятно, увеличило продолжительность ледостава на озере, сократив вегетационный период планктонных и тихопланктонных диатомей. При этом происходило заболачивание окружающей озера территории. С водами небольших водотоков в озеро поступали болотные формы диатомей. Осадки, накопившиеся в это время, содержат большое количество органики, приводящее к разбавлению детритового материала и низким значениям магнитной восприимчивости.

Низкие концентрации диатомей в осадках подзоны ДзГз 3.2 (7.103–5.329 тыс. л.н.) скорее всего, связаны с интенсивным разбавлением минеральными частицами, поступающими на дно водоема, что подтверждается относительно высокими значениями магнитной восприимчивости в осадках этой зоны и низким содержанием органики. Присутствие *S. pinnata* в доминирующей группе может свидетельствовать о невысоких температурах. Обратная зависимость обилия *S. venter* и *S. pinnata*, которая связывается с изменениями климата в голоценовых осадках арктических озер (Michelutti et al., 2003; Podrیتske, Gajewski, 2007), говорит в пользу более низких

температур обитания *S. pinnata*. Отсутствие эпифитных диатомей и присутствие обитателей эпилитона, может свидетельствовать об отсутствии водных макрорастений, на которых поселяются некоторые виды диатомей.

Тенденция на повышение температуры поверхностных вод сохраняется в течение формирования подзоны ДзГз 3.3. (5.329–2.360 тыс. л.н.). Примерно 4.4 тыс. л.н. отмечается резкое, почти в 3 раза, увеличение концентрации створок в осадках. Именно с этого времени в состав доминирующей группы на постоянной основе начинают входить бентосные таксоны с крупными створками. Их появление может рассматриваться, как реакция на потепление (Perren et al., 2003). Считается, что с повышением температуры очевиден переход от мелких мелководных таксонов (например, *S. venter*, *S. pinnata*) к более крупным эпифитным бентосным видам (Lotter, Bigler, 2000), в нашем случае, например, *C. inaequalis*, *Navicula vulpina*. Аналогичные последовательности смен таксонов диатомей отмечены и в ледниковом/последледниковом онтогенезе озер в более низких широтах (Round, 1981). Возможно, эти изменения в диатомовых ископаемых сообществах зафиксировали событие на границе среднего/позднего голоцена, получившее название «Holocene Turnover» (Paasche, Bakke, 2009), вызвавшее реорганизацию циркуляции океана и атмосферы и отмеченное во многих регионах мира (Mayewski et al., 2004; Railsback et al., 2018; Walker et al., 2018). Последующие частые, но кратковременные изменения в доминирующих группах могут свидетельствовать о нестабильных экологических условиях на фоне тенденции потепления. И, если температура, по-видимому, следовала тренду на повышение, то рН воды, ее трофность менялись весьма хаотично. Такие изменения могли обуславливаться и увеличением разнообразия биотопов, которые заселяли диатомей, а также усилением конвективного перемешивания вод и отсутствием четкой стратификации вод. Да и сток водотоков, поставляющих не только питательные и минеральные вещества, но и диатомей, мог увеличиваться в это время.

Подзона ДзГз 3.4 (с 2.360 тыс. л.н.) отражает становление современной разнообразной и таксономическом, и экологическом отношении диатомовой флоры. Высокие концентрации створок в осадках могут определяться отсутствием конкурентных других групп водорослей, для активного развития которых температуры поверхностных вод водоема являются относительно низкими, и, вместе с тем, достаточными для извлечения диатомеями кремния из водной толщи для построения своих панцирей. Высокие оценки обилия таксонов, обитающих в

гидрокарбонатных горных озерах, — *C. inaequalis*, *Cymbopleura incerta* var. *spitsbergensis*, *N. vulpina*, *Eucocconeis flexella* (Barinova, Niyatbekov, 2019), свидетельствуют об установлении современного характера минерализации и типа воды. Таким образом, начиная с 1.95 тыс. л.т.н. в озере создаются все условия для активного развития диатомовых водорослей. Появившаяся во время формирования комплекса предыдущей подзоны водная макрорастительность стала активно распространяться в озере, предоставив диатомеям новые типы местообитания, а также повышая трофность вод, в которых стали активно развиваться мезотрофные таксоны диатомей.

ВЫВОДЫ

Изучение диатомовых водорослей в осадках оз. Грязевого позволило выявить их реакцию на изменения среды обитания в переходный период от последнего гляциального максимума к голоцену, которая проявилась, прежде всего, в колебаниях концентрации створок в осадках, трансформации экологической структуры и доминирующей группы тафоценозов диатомей.

Практически полное отсутствие диатомей отмечено для осадков, сформировавшихся в позднем плейстоцене во время холодной МИС 2. Некоторое увеличение концентрации створок в основании разреза может быть обусловлено кратковременным потеплением, соответствующим интерстадиалу GI 2.2 (~23.4 тыс. л.н.), а доминирование одного таксона, скорее всего, специфическими экологическими условиями и кратким периодом их существования.

Частые изменения в доминирующей группе ископаемых сообществ на границе плейстоцена и голоцена зафиксировали неоднократную смену экологических условий. Так, низкое таксономическое разнообразие и доминирование бентосных и тихопланктонных диатомей было связано с похолоданием 11.4 тыс. л.т.н., а увеличение видового богатства и появление планктонных видов с 11.3 тыс. л.т.н. — о начале тенденции относительно устойчивого потепления.

Резкое увеличение концентрации створок диатомей и обилия мелкостворчатых видов около 10.7 тыс. л.т.н. было связано со значительным повышением температур, которое 10.0 тыс. л.т.н. сменилось похолоданием, отмеченным снижением общего обилия диатомей, доминированием холодноводных таксонов и появлением болотных видов.

Выявленные тенденции изменения диатомовой флоры оз. Грязевого в переходный период от гляциального максимума к голоцену во многом похожи на смену диатомовых сообществ в арктических регионах, отмеченные для последнего тысячелетия.

Резкий скачок концентрации створок в осадках 4.4 тыс. л.т.н. и постоянное присутствие в доминирующей группе бентосных таксонов с крупными створками зафиксировали «теплое» событие на границе среднего/позднего голоцена.

Началом становления современного таксономического разнообразия диатомовой флоры озера можно считать рубеж 2.360 тыс. л.т.н., а 1.95 тыс. л.т.н. создаются благоприятные условия и для активного развития диатомей, что отразилось на росте численности их створок в осадках.

Выявленная реакция диатомей, прежде всего, на колебания климата в позднем плейстоцене-голоцене позволила выделить основные этапы озерной экосистемы от неглубокого олиготрофного озера с постоянным ледоставом до относительно глубокого мезотрофного озера с богатой диатомовой флорой.

Данные изучения диатомей, литологические и петрофизические характеристики осадков указывают на то, что наиболее значимые изменения природной среды произошли на границе плейстоцена и голоцена от 12.6 до 11.1 тысяч лет назад

Исследования выполнены за счет средств Российского научного фонда, проект № 22-27-00444, а также частично в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема №121031500274-4).

Список литературы [References]

- Алекин О.А.* Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1953. 296 с. [*Alekin O.A.* Fundamentals of hydrochemistry. Leningrad: Hydrometeorological Publishing House, 1953. 296 p. (in Russian)].
- Барينو́ва С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В.* Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: Русское издательство «Pilies Studio», 2006. 498 с. [*Barinova S.S., Medvedeva L.A., Anissimova O.V.* Diversity of algal indicators in Environmental Assessment. Tel Aviv: Russian Publishing House «Pilies Studio», 2006. 498 p. (in Russian)].
- Брагин И.В., Челноков Г.А., Харитоновна Н.А.* Новые изотопно-геохимические данные по термальным водам Тальского месторождения (Магаданская область) // Тихоокеанская геология. 2021. Т. 40. № 6. С. 111–119. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2021-40-6-111-119> [*Bragin I.V., Chelnokov G.A., Kharitonova N.A.* New isotope-geochemical data on thermal waters of the Talskoe deposit (Magadan Oblast) // Russian Journal of Pacific Geology. 2021. V. 15. Iss. 6. P. 602–609. <https://doi.org/10.1134/S1819714021060026>].
- Васильева И.И., Пшенникова Е.В.* Водоросли реки Колымы и водоемов ее бассейна (Россия) // Альгология. 1996. Т. 6. № 1. С. 35–41 [*Vasilyeva I.I., Pshennikova E.V.* Algae of the Kolyma River and

- reservoirs of its basin (Russia) // *Algae*. 1996. V. 6. № 1. P. 35–41 (in Russian).
- Геологическая карта. Лист Р-56-XXVIII. Масштаб 1:2000000 / Составители В.Е. Литвинов, З.Ф. Литвинова, А.В. Федоров. Первое издание, 1974. [Geological map. Sheet P-56-XXVIII. Scale 1:2000000 / Compiled by V.E. Litvinov, Z.F. Litvinova, A.V. Fedorov. First edition, 1974 (in Russian)].
- Глотов В.Е., Глотова Л.П. Особенности распространения бальнеологических ресурсов Северо-Востока России // *Вестник ДВО РАН*. 2007. № 6. С. 79–94 [Glotov V.Ye., Glotova L.P. Distribution and formation of balneologic resources in the North-East of Russia. // *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Science*. 2007. № 6. P. 79–94 (in Russian)].
- Измайлова А.В. Озерные водные ресурсы азиатской части Российской Федерации // *Водные ресурсы*. 2018. Т. 45. № 5. С. 453–462. <https://doi.org/10.1134/S0321059618050097> [Izmailova A.V. Lake water resources of the Asian part of the Russian Federation // *Water resources*. 2018. V. 45. № 5. P. 453–462 (in Russian)].
- Кузьмин Г.В. Биомасса и структура планктонных фитocenозов пойменных водоемов зоны затопления Колымской ГЭС // *Экология, распространение и жизненные формы растений Магаданской области* / Ред. А.П. Хохряков, Л.С. Благодатских; Владивосток: ДВО АН СССР. 1987. С. 83–98 [Kuzmin G.V. Biomass and structure of planktonic phytocenoses in floodplain water bodies of the flood zone of the Kolyma HPP // *Ecology, distribution and life forms of plants of the Magadan region* / Eds. A.P. Khokhryakov, L.S. Blagodatsky; Vladivostok: FEB AS USSR, 1987, P. 83–98 (in Russian)].
- Кузьмин Г.В., Агапова Г.А., Сусекова Н.Г. Фитопланктон и химический состав воды озера Джека Лондона (Магаданская область) // *Гидробиологический журнал*. 1990. № 6. С. 21–27 [Kuzmin G.V., Agarova G.A., Susekova N.G. Phytoplankton and the chemical composition of the water of Lake Jack London (Magadan Region) // *Journal of Hydrobiology*. 1990. № 6. P. 21–27 (in Russian)].
- Минюк П.С., Борходоев В.Я. Геохимия осадков озера Гранд, Северо-Восток России // *Геохимия*. 2016. № 9. С. 841–851. <https://doi.org/10.7868/S0016752516070074> [Minyuk P.S., Borkhodoev V.Ya. Geochemistry of sediments from Lake Grand, Northeast Russia // *Geochemistry International*. V. 54. Iss. 9. P. 807–816. <https://doi.org/10.1134/S0016702916070065>].
- Минюк П.С., Пожидаева Д.К., Бурнатный С.С. Гидрохимические характеристики природных и техногенных вод Магаданской области // *Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН*. 2022. № 2. С. 45–58. <https://doi.org/10.34078/1814-0998-2022-2-45-58> [Minyuk P.S., Pozhidaeva D.K., Burnatny S.S. Hydrochemical characteristics of natural and technogenic waters bodies in Magadan oblast // *Bulletin of the North-Eastern Scientific Center*. 2022. № 2. P. 45–58 (in Russian)].
- Михайлов В.И. К экологии видов рода *Nitzschia* Hass. (Bacillariophyta) во временных водоемах зоны затопления Колымской ГЭС // *Экология*. 1984а. № 5. С. 78–81 [Mikhailov V.I. On the ecology of species of the genus *Nitzschia* Hass. (Bacillariophyta) in temporary reservoirs of the flood zone of the Kolyma HPP // *Ecology*. 1984a. № 5. P. 78–81 (in Russian)].
- Михайлов В.И. Новые виды рода *Nitzschia* Hass. (Bacillariophyta) в пойменных водоемах реки Колымы // *Новости систематики низших растений*. 1984б. Т. 21. С. 26–31 [Mikhailov V.I. New species of the genus *Nitzschia* Hass. (Bacillariophyta) in floodplain reservoirs of the Kolyma River // *Novosti Sistematiki nizshikh rastenii*. 1984b. V. 21. P. 26–31 (in Russian)].
- Михайлов В.И. Новые и редкие виды рода *Nitzschia* Hass. (Bacillariophyta) в устье р. Ямы (Магаданская обл.) // *Ботанический журнал*. 1985. Т. 70. № 10. С. 1403–1405 [Mikhailov V.I. New and rare species of the genus *Nitzschia* Hass. (Bacillariophyta) at the mouth of the Yama River (Magadan region) // *Botanicheskii Zhurnal*. 1985. V.70. № 10. P. 1403–1405 (in Russian)].
- Потапова М.Г. Сезонная динамика и пространственное распределение донных сообществ водорослей в водотоках бассейна р. Колыма на примере ручья Контактного // *Водотоки Верхней Колымы (гидрохимия, гидрология, гидробиология)* / Ред. Е.А. Макаренко; Владивосток: ДВО АН СССР, 1991. С. 57–68 [Potapova M.G. Seasonal dynamics and spatial distribution of benthic algae communities in the watercourses of the Kolyma river basin, on the example of the Kontaktovoy stream // *Watercourses of the Upper Kolyma (hydrochemistry, hydrology, hydrobiology)* / Ed. E.A. Makarchenko; Vladivostok: DVO AN SSSR, 1991. P. 57–68 (in Russian)].
- Потапова М.Г. Состав и распределение сообществ прикрепленных водорослей малых рек бассейна Верхней Колымы // *Ботанический журнал*. 1992. Т. 77. № 1. С. 83–91 [Potapova M.G. Composition and distribution of attached algal communities in small rivers of the Upper Kolyma basin // *Botanicheskii Zhurnal*. 1992. V.77. № 1. P. 83–91 (in Russian)].
- Прошкина-Лавренко А.И. (Глав. ред.). Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Ленинград: Наука, 1974. Т. 1. 403 с. [Proshkina-Lavrenko A.I. (Ed.). *Diatoms of the USSR (fossil and modern)*. Leningrad: Nauka, 1974. V. 1. 403 p. (in Russian)].
- Харитонов В.Г. Об особенностях распределения диатомовых водорослей на севере Магаданской области // *Ботанический журнал*. 1981. Т. 66. № 5. С. 731–734 [Kharitonov V.G. On the features of the distribution of diatoms in the north of the Magadan region // *Botanicheskii Zhurnal*. 1981. V.66. № 5. P. 731–734 (in Russian)].
- Харитонов В.Г. Диатомовые водоросли (перифитон и фитобентос) водоемов зоны затопления Колымской ГЭС // *Пояс редколесий верховий Колымы: (Район строительства Колымской ГЭС)* / Отв. ред. Д.И. Берман; Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1985. С. 91–105 [Kharitonov V.G. Diatoms (periphyton and phytobenthos) of reservoirs in the flood zone of the Kolyma HPP. Ed. D.I. Berman; Vladivostok: Far Eastern Scientific Center of the Academy of Sciences of the USSR, 1985. P. 91–105 (in Russian)].
- Харитонов В.Г. Диатомовые (Bacillariophyta) техногенных водотоков Верхнеколымского нагорья

- // Ботанический журнал. 2001. Т. 86. № 10. С. 34–41 [Kharitonov V.G. Diatoms (Bacillariophyta) of technogenic watercourses of the Upper Kolyma Highlands // Botanicheskii Zhurnal. 2001. V.86. № 10. P. 34–41 (in Russian)].
- Харитонов В.Г. Диатомовые водоросли бассейна Тауйской губы (Centrales, Fragilareaceae, Achnantheaceae) // Биологическое разнообразие Тауйской губы Охотского моря / Отв. ред. И.А. Черешнев; Владивосток: Дальнаука, 2005. С. 15–50 [Kharitonov V.G. Diatoms of the Tauyskaya Bay basin (Centrales, Fragilareaceae, Achnantheaceae) // Biodiversity of the Tauyskaya Bay of the Okhotsk Sea / Ed. I.A. Chereshev; Vladivostok: Dal'nauka, 2005. P. 15–50 (in Russian)].
- Харитонов В.Г. Диатомовые водоросли оз. Джека Лондона и водоемов его бассейна (Верхняя Колыма) // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2006. № 3. С. 40–54 [Kharitonov V.G. Diatoms of the Jack London Lake and water bodies of its basin (Upper Kolyma) // Bulletin of the North-Eastern Scientific Center. 2006. № 3. P. 40–54 (in Russian)].
- Харитонов В.Г. Конспект флоры диатомовых водорослей (Bacillariophyceae) Северного Охотоморья. Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2010. 189 с. [Kharitonov V.G. Synopsis of the flora of diatoms (Bacillariophyceae) of the Northern Sea of Okhotsk. Magadan: North-Eastern Scientific Center FEB RAS, 2010. 189 p. (in Russian)].
- Харитонов В.Г. Диатомовые водоросли // Растительность и животный мир заповедника «Магаданский» / Отв. ред. Н.Е. Докучаев. Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2011. С. 47–50 [Kharitonov V.G. Diatoms // Flora and fauna of the reserve «Magadanskiy» / Ed. N.E. Dokuchaev; Magadan: North-Eastern Scientific Center FEB RAS, 2011. P. 47–50 (in Russian)].
- Харитонов В.Г. Диатомовые водоросли Колымы. Магадан: Издательство «Кордис», 2014. 496 с. [Kharitonov V.G. Diatoms of the Kolyma. Magadan: Kordis Publishing House, 2014. 496 p. (in Russian)].
- Харитонов В.Г., Силин В.А. Химическая характеристика прибрежных экосистем Тауйской губы и таксономическое разнообразие населяющих их Bacillariophyceae // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2007. № 2. С. 83–94 [Kharitonov V.G., Silin V.A. Chemical characteristics of the coastal ecosystems of the Tauyskaya Bay and the taxonomic diversity of the Bacillariophyceae inhabiting them // Bulletin of the North-Eastern Scientific Center. 2007. № 2. P. 83–94 (in Russian)].
- Черепанова М.В. Пресноводные диатомовые сообщества озер Северо-Востока Сибири // Пространственная и временная изменчивость природной среды Северо-Востока Азии в четвертичный период / Отв. ред К.В. Симаков; Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2004. С. 77–89 [Cherepanova M.V. Freshwater diatom communities from Northeastern Siberian lakes // Spatial and temporal changes in the Quaternary environments of the North-East Asia / Ed. K.V. Simakov; Magadan: NEISRI FEB RAS, 2004. P. 77–89 (in Russian)].
- Черепанова М.В., Авраменко А.С., Андерсон П.М. и др. Диатомовые водоросли оз. Эликчан (Северное Приохотье) и их значение для реконструкции развития экосистемы озера за последние 70 тыс. лет // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2013. № 1. С. 3–15 [Cherepanova M.V., Avramenko A.S., Anderson P.M. et al. Diatom from the Elikchan Lake (Northern Priokhotye) and their value for reconstruction of lake evolution within the last 70 thousand years // Bulletin of the North-Eastern Scientific Center. 2013. № 1. P. 3–15 (in Russian)].
- Avramenko A.S., Cherepanova M.V., Pushkar V.S., Yarusova S.B. Diatom characteristics of the Far East siliceous organogenic deposits // Russian Geology and Geophysics. 2015. V. 56. Iss. 6. P. 947–958. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.05.010>
- Bahls L., Boynton B., Johnston B. Atlas of diatoms (Bacillariophyta) from diverse habitats in remote regions of western Canada // PhytoKeys. 2018. V. 105. P. 1–186. <https://doi.org/10.3897/phytokeys.105.23806>
- Baker L.-A., Biron D.G., Millan F. et al. The substrate, a key factor or not, to explain the species diversity of diatom communities in mineral springs // Botany Letters. 2022. V. 169. Iss. 2. P. 155–165. <https://doi.org/10.1080/023818107.2022.2028186>
- Barinova S., Niyatbekov T. Comparative Analysis of Diatom Algae Diversity in the Pamir Protected Lakes, Tajikistan // International Journal of Advanced Research in Botany. 2019. V. 5. Iss. 2. <http://dx.doi.org/10.20431/2455-4316.0502001>
- Besonen M.R., Patridge W., Bradley R.S. et al. A record of climate over the last millennium based on varved lake sediments from the Canadian High Arctic // The Holocene. 2008. V. 18. P. 169–180. <https://doi.org/10.1177/0959683607085607>
- Blaauw M., Christen J.A. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process // Bayesian Analysis. 2011. V. 6. Iss. 3. P. 457–474. <https://doi.org/10.1214/11-BA618>
- Catalan J., Barbieri M.G., Bartumeus F. et al. Ecological thresholds in European alpine lakes // Freshwater Biology. 2009. V. 54. Iss. 12. P. 2494–2517. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02286.x>
- Cohen K.M., Gibbard P.L. Global chronostratigraphical correlation table for the last 2.7 million years, version 2019 QI-500 // Quaternary International. 2019. V. 500. P. 20–31. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.03.009>
- Genkal S.I., Kulikovskiy M.S. 2014. Centric Diatoms from Lake Frolikha (Transbaikal Area) and Peculiarities of Distribution of Some Taxa in Asia // Inland Water Biology. 2014. V. 7. Iss. 3. P. 201–210. <https://doi.org/10.1134/S1995082914030079>
- Grimm E.C. CONISS: a FORTRAN 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares // Computers & Geosciences. 1987. V. 13. Iss. 1. P. 13–35. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(87\)90022-7](https://doi.org/10.1016/0098-3004(87)90022-7)
- Heiri O., Lotter A.F., Lemcke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results // Journal of Paleolimnology. 2001. V. 25. Iss. 1. P. 101–110. <https://doi.org/10.1023/A:1008119611481>
- Jüttner I., Gurung S., Sharma C. et al. Morphology of new taxa in the *Cymbella aspera* and *Cymbella neocistula* groups, *Cymbella yakii* sp. nov., and *Cymbella* cf. *hantzschiana* from Everest National Park, Nepal // Polish Botanical Journal. 2010. V. 55. Iss. 1. P. 73–92.

- Kireta A.* Deciphering Climate-Driven Changes in Planktonic Diatom Communities in Lake Superior. Electronic Theses and Dissertations. 2018. 2833. <https://digitalcommons.library.umaine.edu/etd/2833>
- Krammer K., Lange-Bertalot H.* Bacillariophyceae. 2. Teil: Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae // Süßwasserflora von Mitteleuropa, Band 2/2 / H. Ettl, J. Gerloff, H. Heynig, D. Mollenhauer (eds.); Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 1988. 596 p.
- Krammer K., Lange-Bertalot H.* Bacillariophyceae. 3. Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. // Süßwasserflora von Mitteleuropa, Band 2/3 / H. Ettl, J. Gerloff, H. Heynig, D. Mollenhauer (eds.); Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 1991. 576 p.
- Krammer K., Lange-Bertalot H.* Bacillariophyceae. 1. Teil: Naviculaceae. // Süßwasserflora von Mitteleuropa, Bd. 2/1 / H. Ettl, J. Gerloff, H. Heynig, D. Mollenhauer (eds.); Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 1986. 876 p.
- Lotter A. F., Bigler C.* Do diatoms in the Swiss Alps reflect the length of ice cover? *Aquatic Sciences*. 2000. V. 62. Iss. 2. P. 125–141. <https://doi.org/10.1007/s000270050002>
- Mann D.G., Stickle A.J.* The systematics of Stauroneis (Bacillariophyta) II. The life history of *S. phoenicenteron* and related species // *Diatom Research*. 1995. V. 10. Iss. 2. P. 277–297. <https://doi.org/10.1080/0269249X.1995.9705350>
- Mayewski P.A., Rohling E.E., Stager C. et al.* 2004. Holocene climate variability // *Quaternary Research*. V. 62. Iss. 3. P. 243–255. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2004.07.001>
- Melles M., Brigham-Grette J., Glushkova O.Y. et al.* Sedimentary geochemistry of core PG1351 from Lake El'gygytgyn – a sensitive record of climate variability in the East Siberian Arctic during the past three glacial-interglacial cycles // *Journal of Paleolimnology*. 2007. V. 37. Iss. 1. P. 89–104. <https://doi.org/10.1007/s10933-006-9025-6>
- Melles M., Brigham-Grette J., Minyuk P.S. et al.* 2.8 million Years of Arctic climate change from Lake El'gygytgyn, NE Russia // *Science*. 2012. V. 337. Iss. 6092. P. 315–320. <https://doi.org/10.1126/science.1222135>
- Michelutti N., Douglas M.S.V., Smol J.P.* Diatom response to recent climatic change in a high arctic lake (Char Lake, Cornwallis Island, Nunavut) // *Global and Planetary Change*. 2003. V. 38. Iss. 3. P. 257–271. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(02\)00260-6](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(02)00260-6)
- Minyuk P., Subbotnikova T.* Rock magnetic properties of Grand Lake sediments as evidence of environmental changes during the last 60 000 years in North-East Russia // *Boreas*. 2021. V. 50. Iss. 4. P. 1027–1042. <https://doi.org/10.1111/bor.12546>
- Minyuk P.S., Subbotnikova T.V., Brown L.L., Murdock K.J.* High-temperature thermomagnetic properties of vivianite nodules, Lake El'gygytgyn, Northeast Russia // *Climate of the Past*. 2013. V. 9. Iss. 1. P. 433–446. <https://doi.org/10.5194/cp-9-433-2013>
- Passy S.I.* Diatom ecological guilds display distinct and predictable behavior along nutrient and disturbance gradients in running waters // *Aquatic Botany*. 2007. V. 86. Iss. 2. P. 171–178. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2006.09.018>
- Paasche Ø., Løvlie R., Dahl S.O. et al.* Bacterial magnetite in lake sediments: late glacial to Holocene climate and sedimentary changes in northern Norway. *Earth and Planetary Science Letters*. 2004. V. 223. Iss. 3–4. P. 319–333. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.05.001>
- Perren B.B., Raymond S. Bradley R.S., Francus P.* Rapid Lacustrine Response to Recent High Arctic Warming: A Diatom Record from Sawtooth Lake, Ellesmere Island, Nunavut. Arctic, Antarctic, and Alpine Research. 2003. V. 35. Iss. 3. P. 271–278. <https://www.jstor.org/stable/1552562>
- Podrifske B., Gajewski K.* Diatom community response to multiple scales of Holocene climate variability in a small lake on Victoria Island, NWT, Canada // *Quaternary Science Reviews*. 2007. V. 26. Iss. 25–28. P. 3179–3196. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2007.06.009>
- Ponomareva V.V., Kyle P.R., Melekestsev I.V. et al.* The 7600 (14C) Year BP Kurile Lake caldera-forming eruption, Kamchatka, Russia: stratigraphy and field relationships // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2004. V. 136. Iss. 3–4. P. 199–222. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.05.013>
- Potapova M.* Epilithic algae communities in rivers of the Kolyma Mountains, NE Siberia, Russia // *Nova Hedwigia*. 1996. V. 63. Iss. 3–4. P. 309–334.
- Railsback L.B., Liang F., Brook G.A. et al.* The timing, two-pulsed nature, and variable climatic expression of the 4.2 ka event: a review and high-resolution stalagmite data from Namibia // *Quaternary Science Reviews*. 2018. V. 186. P. 78–90. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.02.015>
- Rasmussen S.O., Bigler M., Blockley S.P. et al.* A stratigraphic framework for abrupt climatic changes during the Last Glacial period based on three synchronized Greenland ice-core records: refining and extending the INTIMATE event stratigraphy // *Quaternary Science Reviews*. 2014. V. 106. P. 14–28. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.09.007>
- Rimet F., Bouchez A.* Life-forms, cell-sizes and ecological guilds of diatoms in European rivers // *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*. 2012. V. 406. <https://doi.org/10.1051/kmae/2012018>
- Round F.E.* The Ecology of the Algae. Cambridge: Cambridge University Press, 1981. 653 p.
- Round F.E.* Diatoms in river water-monitoring studies // *Journal of Applied Phycology*. 1991. V. 3. Iss. 2. P. 129–145. <https://doi.org/10.1007/BF00003695>
- Round F.E., Crawford R.M., Mann D.G.* The diatoms: biology and morphology of the genera. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 747 p.
- Rühland A., Paterson M., Smol J.P.* Lake diatom responses to warming: reviewing the evidence // *Journal of Paleolimnology*. 2015. V. 54. Iss. 1. P. 1–35. <https://doi.org/10.1007/s10933-015-9837-3>
- Smol J.P., Wolfe A.P., Birks H.H. et al.* Climate-driven regime shifts in the biological communities of Arctic lakes // *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. 2005. V. 102. Iss. 12. P. 4397–4402. <https://doi.org/10.1073/pnas.0500245102>
- Stoermer E.F.* Evaluating diatom succession: some peculiarities of the Great Lakes case // *Journal of Paleolimnology*. 1993. V. 8. Iss. 1. P. 71–83. <https://doi.org/10.1007/BF00210058>
- Suits N.S., Wilkin R.T.* Pyrite formation in the water column and sediments of meromictic lake // *Geology*. 1998. V. 26. Iss. 12. P. 1099–1102. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1998\)026<1099:PFITWC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1998)026<1099:PFITWC>2.3.CO;2)

- Tracking environmental change using lake sediments. Volumes 1–4 / J.P. Smol, H.J.B. Birks, W.M. Last; Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. V. 1. 548 p., V. 2. 504 p., V. 3. 371 p., V. 4. 217 p.
- Walker M., Johnsen S., Rasmussen S.O. et al.* Formal definition and dating of the GSSP (Global Stratotype Section and Point) for the base of the Holocene using the Greenland NGRIP ice core, and selected auxiliary records // *Journal of Quaternary Science*. 2009. V. 24. Iss. 1. P. 3–17. <https://doi.org/10.1002/jqs.1227>
- Walker M., Head M.J., Berkehammer M. et al.* Formal ratification of the subdivision of the Holocene Series/Epoch (Quaternary System/Period): two new Global Boundary Stratotype Sections and Points (GSSPs) and three new stages/subseries. *Episodes*. 2018. V. 41. Iss. 4. P. 213. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2018/018016>
- Wilkin R. T., Barnes H.L.* Pyrite formation in an anoxic estuarine basin // *American Journal of Science*. 1997. V. 297. Iss. 6. P. 620–650. <https://doi.org/10.2475/ajs.297.6.620>
- Wright H.E., Mann D.H., Glaser P.H.* Piston corers for peat and lake sediments // *Ecology*. 1984. V. 65. Iss. 2. P. 657–659.
- Zelnik I., Balanč T., Toman M.J.* Diversity and Structure of the Tychoplankton Diatom Community in the Limnocene Spring Zelenci (Slovenia) in Relation to Environmental Factors // *Water*. 2018. V. 10. Iss. 4. 361. <https://doi.org/10.3390/w10040361>
- Zgrundo A., Wojtasik B., Convey P., Majewsk R.* Diatom communities in the High Arctic aquatic habitats of northern Spitsbergen (Svalbard) // *Polar Biology*. 2017. V. 40. Iss. 4 P. 873–890. <https://doi.org/10.1007/s00300-016-2014-y>

DIATOM RESPONSE TO ENVIRONMENTAL CHANGES OF THE NORTHERN OKHOTSK AREA (MAGADAN REGION) DURING LATE PLEISTOCENE-HOLOCENE FROM GRYZEVOE LAKE

M.V. Cherepanova¹, P.S. Minyuk², D.K. Pozhidaeva², S.S. Burnatny²

¹*Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity FEB RAS, Vladivostok, Russia, 690022*

²*North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute FEB RAS, Magadan, Russia, 685000*

Received August 17, 2022; revised September 11, 2022; accepted September 26, 2022

The study of diatoms from the sediments of well Gz-1 (Gryzevoe Lake, Magadan Region) allowed us to identify the response of diatom communities to environmental changes in the Late Pleistocene and Holocene and establish the main stages of the transformation of the lake ecosystem. Three diatom zones and four subzones were identified based on changes in the concentration of diatom floras in sediments, the ratio of representatives of ecological groups and dominants, reflecting the evolution trend of the lake diatom flora during the transition period from the last glacial maximum to the Holocene. This trend is similar to the changes in the lake diatom communities of the Arctic regions noted for the last millennium in terms of the change of taxonomic composition and dominants. The data of diatom studies, lithological and petrophysical characteristics of sediments indicate that the most significant changes in the natural environment occurred at the Pleistocene-Holocene boundary from 12.6 to 11.1 thousand years ago.

Keywords: diatom, climate changes, paleolimnology, Pleistocene, Holocene, Magadan region.