

ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ АРКТИЧЕСКИХ ОЗЕР ЗАПАДНОЙ СИБИРИ КАК ИНДИКАТОРЫ ИЗМЕНЕНИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

© 2020 г. Ю. Г. Таций^{a, *}, Т. И. Моисеенко^{a, **}, Л. В. Разумовский^{b, ***}, А. П. Борисов^a,
В. Ю. Хорошавин^c, Д. Ю. Баранов^a

^aИнститут геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН
ул. Косыгина, 19, Москва, 119991 Россия

^bИнститут водных проблем РАН ул. Губкина, 3, Москва, 119333 Россия

^cТюменский государственный университет, Институт наук о Земле
ул. Володарского, 6, Тюмень, 625003 Россия

*e-mail: yutatsy@mail.ru

**e-mail: moiseenko.ti@gmail.com

***e-mail: lazy-lion@mail.ru

Поступила в редакцию 31.01.2019 г.

После доработки 22.05.2019 г.

Принята к публикации 22.05.2019 г.

Представлены результаты исследования колонок донных отложений из двух фоновых арктических озер – Лангтибейто (полуостров Ямал) и Гольцовое (полуостров Гыдан). Скорость осадконакопления, оцененная по ²¹⁰Pb и ¹³⁷Cs, составила 0.17 и 0.20 см/год, соответственно. Для обеих колонок по-слойно определены элементный состав, гранулометрия и потери при прокаливании. Концентрации элементов в ДО обоих озер по всей длине колонок остаются на уровне фоновых. Ртуть, в отличие от остальных элементов, показала существенное превышение локального фона в приповерхностных слоях донных отложений обоих озер. Возможная причина – поступление из атмосферы за счет трансграничного переноса. Сопоставление данных диатомового анализа и гранулометрии выявило процессы перестройки экосистем озер, связанных с их обмелением. Показана перспективность применения биоиндикационных методов для реконструкции новейших климатических изменений в арктических районах.

Ключевые слова: арктические озера, Западная Сибирь, донные отложения, элементный состав, ртуть, скорость осадконакопления, гранулометрия, диатомовый анализ

DOI: 10.31857/S0016752520040111

ВВЕДЕНИЕ

Арктические озера являются чувствительными индикаторами глобальных изменений окружающей среды и климата. Наряду с этим на озерные экосистемы воздействуют региональные и трансграничные переносы загрязняющих веществ. Донные отложения арктических озер, не подверженных прямым антропогенным воздействиям, являются своего рода палеоклиматическими и палеогеохимическими архивами, которые содержат информацию о биогеохимических процессах на водосборе и в самом водоеме, информативно отражают изменения климата и окружающей среды. Уязвимость природы арктических регионов обуславливает высокую реактивность экосистем, что предопределяет информативную “запись” этих изменений в толщах донных отложений, включая изменения биогеохимических циклов и глобальные потоки загрязняющих веществ в ат-

мосфере, а также динамику климата и состояния экосистем, которые регистрируются на основе геохимического состава и останков диатомовых комплексов в донных отложениях. На сегодняшний день исследование диатомовых комплексов и геохимического состава слоев донных озерных отложений считается общепризнанным и, фактически, обязательным методом реконструкций климатических и экологических событий.

Палеолимнологические исследования озер занимают ведущее место в ряде крупных международных программ, например: Pole-Equator-Pole (полюс-экватор-полюс для Европы и Африки) и CAPE (Circumpolar paleoenvironment – циркумполярная окружающая среда в прошлом). Приоритет в изучении озерных отложений, как источников информации о новейших изменениях под влиянием антропогенного фактора, принадлежит школам диатомового анализа США (Stockner,

Таблица 1. Характеристики исследованных озер (Отчет..., 2011)

Озеро	Координаты	Площадь, км ²		Соотношение площадей	Высота над уровнем моря, м	Средняя глубина, м	рН	Минерализация, мг/л
		озера	водосбора					
Лангтибейто	71.063917; 70.321806	10.3	8.2	0.8	43.5	3.0	7.71	354.5
Гольцовое	71.423333, 78.849444	3.87	8.1	2.1	9.6	3.5	7.39	41.15

Benson, 1967; Stockner, 1975); Швеции (Tolonen, 1978; Renberg et al., 1978) и Великобритании (Batterbee et al., 2002).

Диатомовые водоросли – микроскопические одноклеточные организмы, являются неотъемлемой частью и важнейшей составляющей озерных экосистем. Они хорошо сохраняются в осадках благодаря наличию кремнеземного панциря (створок). Широкий спектр биоиндикационных признаков позволяет верифицировать данные диатомового анализа с результатами химического, гранулометрического и других видов анализа озерных отложений. Качественно новым этапом для реконструкций на основе диатомового анализа стало применение изотопного метода – анализ соотношения изотопов (²¹⁰Pb и ¹³⁷Cs) (Lottter, Hofmann, 2003).

В приложение к изучению антропогенно-индуцированных процессов разработаны инновационные методики реконструкции гидрологических параметров по диатомовым комплексам (Моисеенко, Разумовский, 2009; Разумовский, 2012).

На территории России комплексные исследования донных отложений озер проводили на Кольском Севере (Даувальтер, 1995; Моисеенко и др., 1998, 2002; Solovieva, 2002; Разумовский, 2012), в бассейне Печоры (Walker et al., 2009), а также в северных областях за Уралом (Laing et al., 1999), на Урале (Cremer et al., 2004; Масленникова и др., 2014), в Сибири (Laing, Smol, 2000), на Чукотке (Харитонов, 2010). Вместе с тем работ по донным отложениям арктических озер России крайне мало.

Север Западной Сибири является регионом интенсивной разработки месторождений углеводородов. Здесь находится более 200 месторождений, где ежегодно добывается 290–310 млн т нефти и 35–40 млрд м³ природного газа. Самые крупные газовые месторождения (Бованенковское, Харасавэйское, Тамбейское) расположены в арктической зоне. В 2010-е годы на полуострове Ямал началась интенсивная разработка крупных газоконденсатных месторождений с нефтяными оторочками (Новопортовское, Тамбейское), строительство газопроводов, комплекса по сжигению природного газа (Ямал-СПГ), что неизбежно приводит к росту антропогенной нагрузки на окружающую среду Западно-Сибирского сектора Арктики.

Целью исследований являлась реконструкция динамики окружающей среды и климата в арктических регионах Западной Сибири, оценка динамики осадконакопления элементов и состояния экосистем в многолетнем срезе и выявление возможного антропогенного вклада в эти изменения в период индустриальной деятельности по освоению нефтегазовых месторождений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Характеристика района. Исследования тенденций изменений природной среды, включая климат, проводили в арктической зоне Западной Сибири, Ямало-Ненецком автономном округе. В августе 2011 г. были отобраны колонки донных отложений из двух озер – Лангтибейто на севере полуострова Ямал (Ямальский район) и Гольцовое в северной части полуострова Гыдан (Тазовский район). Оба озера находятся в зоне арктической тундры, для которой характерны большая длительность снегового покрова (около 10 месяцев) и короткое лето с низкими температурами (1–5°C). Озера имеют ледниковое происхождение. Координаты и предварительные лимнологические данные озер приведены в табл. 1.

Основным источником питания тундровых озер являются атмосферные осадки и вода, образующаяся при сезонном оттаивании многолетнемерзлых пород. Донные отложения зон с ледовым литогенезом имеют в своем составе значительно больше осадочного материала, нежели органического вещества, и представляют собой глину, суглинки со слабощелочной средой (Страхов, 1963).

Горные породы, вмещающие котловины озер тундры полуострова Ямал и Гыдан, представлены четвертичными морскими и гляциально-морскими отложениями разнообразного гранулометрического состава – от крупнозернистых песков до тонкодисперсных глин. В зависимости от того, какие именно породы формируют ложе озера – морские глины или гляциальные пески-супеси прослеживаются отличия в минерализации вод озер.

Отбор проб. Донные отложения были отобраны сотрудниками Тюменского государственного университета по программе мегагранта № 220

11G34.31.0036 “Формирование качества вод в условиях изменения окружающей среды и климата Западной Сибири”. Колонки отбирали из центральной части озер поршневым буром Эдельмана компании Eijkelkamp (длина колонок до 70 см, диаметр 4 см), а для диатомового анализа микробентометром (стратометром) С-1 (диаметр 4 см). Глубина воды в точках отбора составляла на Лангтибейто 3.6 м, на Гольцовом 2.5 м. Длина отобранных буром колонок на Лангтибейто и Гольцовом составляла 57 и 48 см, стратометром – 10 и 23 см, соответственно. В полевых условиях колонки разрезали на слои толщиной 1 см, а после стратометра – 0.5 см. Каждый слой помещали в пластиковый пакет и хранили в замороженном состоянии до анализа.

Анализ. В лабораторных условиях пробы доводили до сухого состояния (до постоянного веса при комнатной температуре) и измельчали.

Обе колонки были послойно радиометрически датированы измерением активности изотопов ^{210}Pb и ^{137}Cs . Измерения проводили прямым методом на низкофоновом гамма-спектрометрическом комплексе с детектором из особо чистого германия ВЕGe3825 планарного типа и многоканальным анализатором импульсов (Степанец и др., 2010).

Потери при прокаливании (п.п.п.) определяли выдерживанием проб в муфельной печи при температуре 550°C в течение не менее 2 часов (до постоянного веса).

Для отдельных слоев донных отложений выполнен гранулометрический анализ методом сухого ситования на несколько фракций: >0.1 (песок), $0.1–0.04$ (крупный алеврит) и <0.04 мм (алеврито-пелит).

Элементный состав донных отложений (63 элемента) после кислотного разложения проб определяли с помощью масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС). Ртуть определяли из навески 20–100 мг ($n = 3$) методом пиролиза из твердой пробы с предварительным накоплением на золотом коллекторе и регистрацией на АА спектрометре. Калибровку осуществляли по насыщенным парам ртути (Таций, Стахеев, 2001).

Отбор и обработку проб для диатомового анализа, изготовление постоянных препаратов, подсчет и идентификацию створок диатомей проводили по стандартным методикам (Давыдова, 1985; Renberg, 1990; Разумовский, Моисеенко, 2009). Помимо классических форм диатомового анализа, был применен принцип унификации биоиндикационных методов (УБМ) (Моисеенко, Разумовский, 2009). Общепринятые экологические характеристики видов уточняли по многочисленным источникам (Давыдова, 1985; Kamenik et al., 2001; Battarbee et al., 2002; Schmidt et al., 2002; Баринаева и др., 2006).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследуемые озера сформированы на водосборах, гидрогеологические условия которых в значительной степени определяются наличием многолетнемерзлых пород, мощность которых достигает 300–500 м и более.

Водосбор озера Лангтибейто находится в районе распространения эпигенетически промерзших средне-четвертичных ледниковых и верхне-четвертичных морских отложений. Котловина озера сложена среднезернистыми песками с высоким содержанием соединений железа в закисной форме. Пески имеют кварцевый состав (85–90%), среди глинистых минералов встречаются лимонит, эпидот, пироксены и амфиболы, гидрослюда, гидроокислы железа. Породы морского генезиса являются источником карбонатов, содержание их доходит в среднем до 0.5%. Общее количество водно-растворимых солей в местных отложениях составляет от 0.01 до 1% (Криосфера..., 2013), что объясняет повышенную минерализацию воды в озере.

Минеральный, гранулометрический и химический составы отложений оз. Гольцовое формировались под влиянием многолетнемерзлых верхне-четвертичных отложений аллювиально-морского и морского происхождения. Ложе озера составляет льдистая песчано-суглинистая толща, в которой полевошпатово-кварцевые пески слагают 60% разреза, причем среди них преобладают пылеватые разности (45%), суглинки, соответственно, занимают 40% массы. Суглинистые породы залегают в виде прослоев и линз в толще песков, тонкая фракция в суглинках представлена лимонитом и гидроокислами железа (Геокриология СССР, 1989).

Датирование. Для датирования слоев и определения средних скоростей седиментации использовали послойное определение активности неравновесного ^{210}Pb по длине исследуемых колонок. Определения проводили в предположении постоянства потока ^{210}Pb (модель CRS – constant-rate-of-supply), постоянства скорости накопления осадков во времени (линейная модель) и отсутствия постседиментационной миграции ^{210}Pb . Измерения активности ^{137}Cs использовали для контроля результатов определений ^{210}Pb . Совместные графики распределения активностей ^{210}Pb и ^{137}Cs представлены на рис. 1. Оцененная по активности скорость осадконакопления в озерах составила для Лангтибейто 0.170 ± 0.035 (^{210}Pb) и 0.166 ± 0.033 (^{137}Cs), а для Гольцового 0.20 ± 0.04 см/год для обоих изотопов.

Гранулометрия и потери при прокаливании. Колонки из обоих озер визуально имели темный, серо-зеленый оттенок и не обладали выраженной тонкой слоистостью. Тем не менее, они были достаточно четко стратифицированы. В колонке

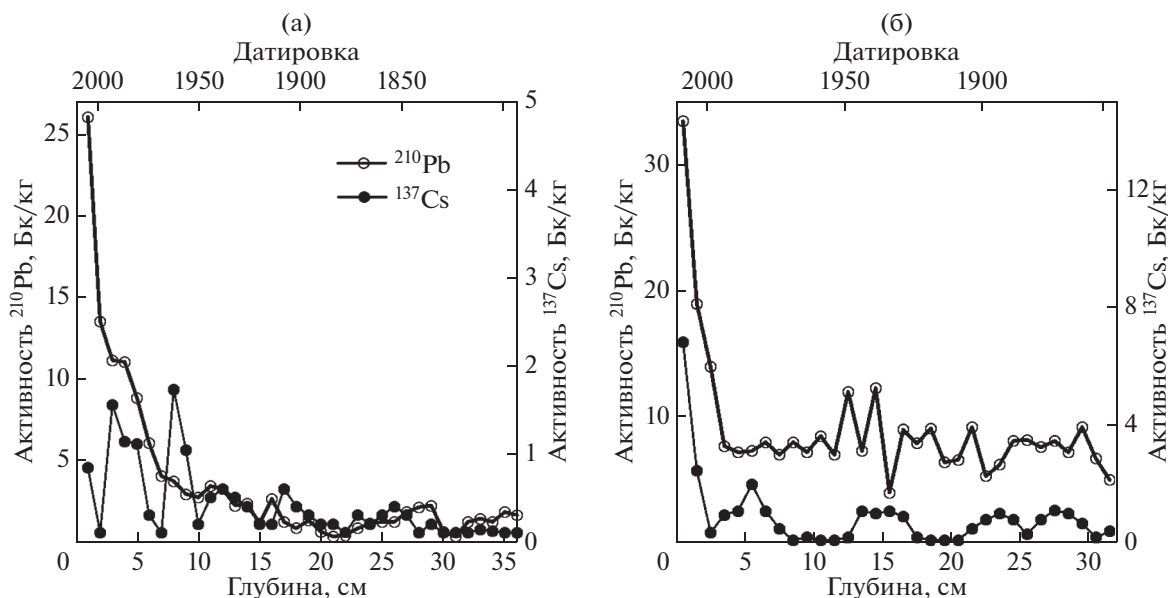


Рис. 1. Распределение активностей ^{210}Pb и ^{137}Cs в колонках донных отложений из озер Лангтибейто (а) и Гольцовое (б) и датировка колонок.

озера Лангтибейто верхний слой на границе с водой (примерно 1.5 см) представлен светло-коричневым суглинком скорее всего за счет оксидов и гидроксидов железа. Затем до глубины 8 см – зеленовато-бурым суглинком. В Гольцовом верхние примерно 23 см колонки представлены зеленовато-бурым суглинком с примесью мелкого песка. Нижние части обеих колонок представлены зеленовато-бурым песком, который, предположительно, может представлять песчаное ложе, минеральную основу, на которую сверху накладывается мелкодисперсный осадочный материал, представленный зеленовато-бурым илистым веществом, суглинком и зеленовато-бурым среднезернистым песком. Это подтверждается и длиной колонок, отобранных стратометром гравитационного типа, который просто уткнулся в более плотный песчаный слой.

Визуальная оценка была в основном подтверждена гранулометрическим анализом и результатами потерь при прокаливании (рис. 2). Гранулометрический анализ показал неоднородность суглинистых частей колонок. В верхних 10 см колонки Лангтибейто преобладает авлеврито-пелитовая фракция (рис. 2а), причем в горизонте 7–8 см доля фракции с размером частиц менее 0.04 мм превышает 70%. В нижних горизонтах (примерно с 10 см) резко возрастает доля песчаной фракции, а доля частиц размером менее 0.04 мм не превышает 10%. Потери при прокаливании (п.п.п.) показывают крайне низкое содержание органических веществ, но верхние 10 см этой колонки показали значительно более высокие значения (4–9%), чем нижние песчаные горизонты (~1%).

Содержание мелкой фракции (<0.04 мм) в верхней части колонки оз. Гольцовое существенно ниже и достигает максимума на глубине 17–20 см (рис. 2б), а начиная с горизонта 23 см донные отложения приобретают все более песчаный характер. Потери при прокаливании более четко соответствуют гранулометрии, чем в Лангтибейто, хотя и имеют более низкие значения (не более 5%).

Следует отметить сложность реальной оценки содержания органического вещества по таким низким значениям п.п.п. Основная проблема заключается в том, что большинство минералов содержат структурно связанную воду, которая постепенно высвобождается при нагреве. Поэтому содержание органического углерода и значения п.п.п могут существенно различаться. При повышении содержания $C_{\text{орг}}$ отношение (потери при прокаливании : углерод) стремится к 2, но при значениях п.п.п ниже 10% оно резко возрастает (Maskereth, 1966). Тем не менее значения п.п.п в верхних, суглинистых частях обеих колонок существенно превышают значения в нижних, песчаных частях и однозначно указывают на крайне низкое содержание органического вещества.

Геохимический состав. Отобранные колонки, несмотря на определенные различия между озерами, очень близки по химическому составу и концентрациям как типоморфных, так и микроэлементов. Для обоих озер характерно в большей или меньшей степени выраженное увеличение концентраций от нижних слоев к верху колонки практически для всех элементов. Для оз. Лангтибейто это увеличение выражено более явно. Концентрации большинства элементов в колонках

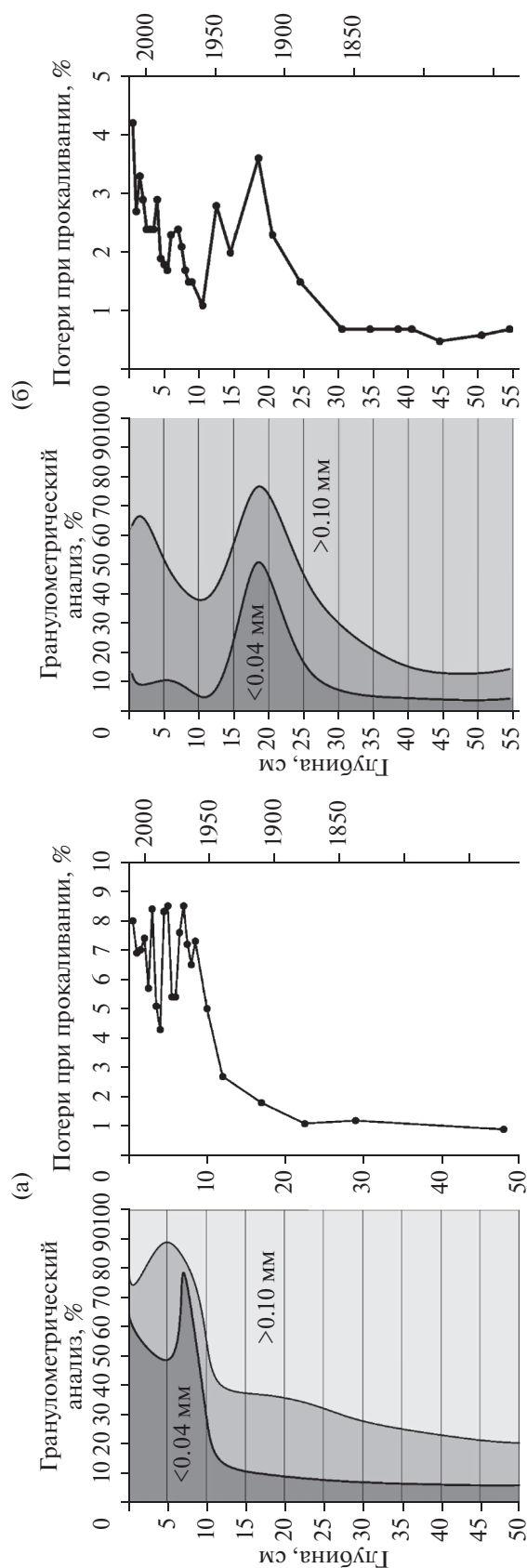


Рис. 2. Гранулометрия, потери при прокаливании и датировка колонок ДО озер Лангтибейто (а) и Гольцовое (б).

донных отложений озер находятся примерно на одном уровне, несмотря на существенные различия в составе вод. Однако даже максимальные содержания не превышают средние концентрации для осадочных пород (глинистые сланцы и, в большинстве случаев, песчаники), табл. 2. Рассчитанные относительно средних содержаний в глинистых сланцах факторы обогащения (с нормированием по Sc) не превышают 1.0 для максимальных концентраций всех элементов в колонке донных отложений озера Гольцовое и 2.0 для колонки Лангтибейто (рис. 3). Это позволяет отнести концентрации этих элементов в донных отложениях озер к фоновым, а сами озера можно рассматривать как фоновые. Концентрации Re, In, Pt, Au, Se, Rh, Pd, Te и Cd были ниже пределов обнаружения.

Распределение некоторых элементов по длине колонок представлены на рис. 4.

Послойный анализ позволил выявить несколько особенностей в распределении элементов вдоль колонок. В обоих озерах происходит постепенное увеличение концентраций элементов к поверхности, более четко проявляющееся в Лангтибейто. В верхних 1.5 см этого озера (светло-коричневый суглинок) наблюдается резкий рост (в 1.5–2 раза) Co, Cr, Cu, Mo, Ni, V, Zn, а также общей серы и оксидов Fe и Mn (рис. 4а). Подобное распределение можно объяснить поступлением элементов в донные отложения в результате осаждения на гидроксидах Fe и Mn, процессами на разделе донные отложения–вода и образованием сульфидов. Еще одной вероятной причиной повышения концентраций ряда элементов в приповерхностном слое может быть интенсивная разработка в нескольких десятках километров от озера Нижне-Тамбейского газоконденсатного месторождения, сопровождающаяся факельными сжиганиями газа и развитием ветровой эрозии в результате нарушения растительного покрова (Ямал СПГ., 2014). Вместе с тем, следует отметить, что и концентрации в верхнем горизонте донных отложений и повышение концентраций отдельных элементов в некоторых горизонтах остаются в пределах фоновых концентраций (рис. 3а). Распределение всех элементов (кроме ртути) плохо коррелирует с данными по гранулометрии и п.п.п.

Распределение элементов в колонке донных отложений из оз. Гольцовое, наоборот, достаточно хорошо коррелирует и с п.п.п и с данными гранулометрии (фракция <math><0.04\text{ мм}</math>) (рис. 2б). Характерной особенностью колонки является увеличение концентраций практически всех элементов в интервале от 22 до 16 см. Концентрации некоторых элементов (Bi, Cr, Cu, Li, Mg, Ni, S_{общ}, Th, V, Zn) в этих горизонтах повышены более чем в 2 раза. Такое увеличение можно было бы объяснить

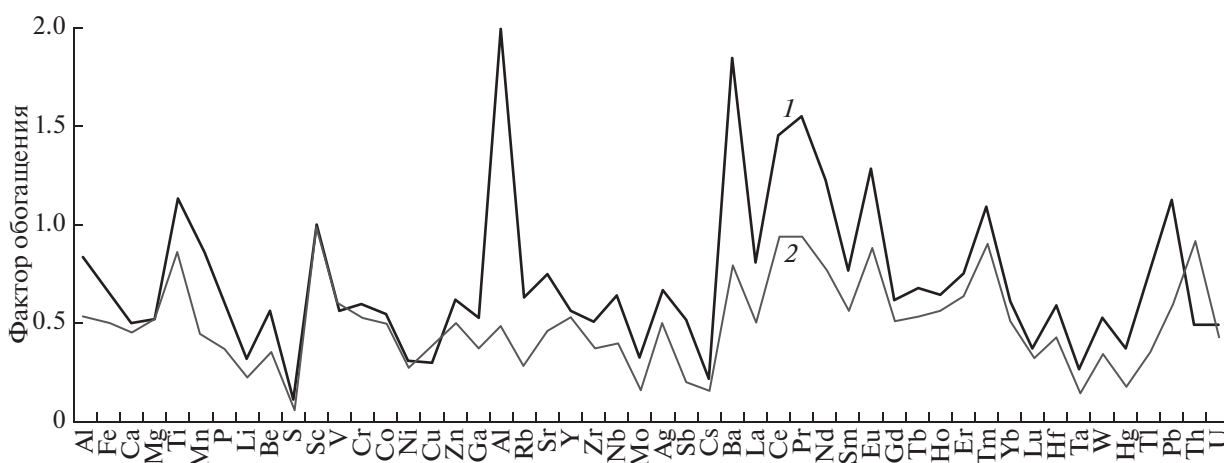


Рис. 3. Факторы обогащения элементов в колонках ДО озер Лангтибейто (1) и Гольцовое (2). Факторы обогащения рассчитывали для максимальных концентраций элементов в колонке относительно средних концентраций в глинистых сланцах с нормированием по Sc.

существенным увеличением аргилито-пелитовой фракции (почто до 50%), но это вряд ли могло сказаться практически на всех (>50) элементах. В случае Лангтибейто увеличение доли этой фракции до 70% вообще не привело к существенным изменениям концентраций. Причина и механизм такого распределения пока не до конца понятен.

Ртуть в донных отложениях. Поведение ртути в донных отложениях исследуемых озер существенно отличается от распределения других элементов тем, что она прекрасно коррелирует и с данными гранулометрии и с п.п.п в обоих озерах (рис. 5), а также с результатами, полученными для параллельных колонок (Морозова и др., 2015).

В отличие от распределения других элементов в донных отложениях озера Лангтибейто (рис. 5а), в распределении ртути повышение концентрации

начинается на участке перехода от песчаной части колонки к суглинистой. Этот переход при меньшей длине суглинистой части, чем в Гольцовом, носит более резкий характер.

В Гольцовом повышение концентраций Hg также начинается в зоне перехода от песчаной к суглинистой части колонки (примерно 27–30 см), но имеет менее выраженный характер (рис. 5б). При этом в распределении наблюдается два пика – на глубине 16–20 см (как и для остальных элементов) и на горизонте 7 см. Резкое увеличение концентраций Hg происходит в верхних 2 см, чего не наблюдается для большинства других элементов (рис. 4б).

Локальные фоновые содержания ртути в донных отложениях озер определяли по содержаниям металла в песчаных частях колонок: в слоях

Таблица 2. Средние содержания некоторых элементов в осадочных породах (Turekian, Wedepohl, 1961; Ронов и др., 1990) и колонках ДО исследованных озер, мг/кг

	Концентрация, мг/кг														
	As	Ba	Co	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	S	Sr	Tl	V	Zn	
Сланцы	13	580	19	90	45	0.4	0.26	68	20	2400	300	1.4	130	95	
Глина, глинистые сланцы	6.6	800	20	100	57	0.4	0.2	95	20	3000	450	1	130	80	
Песчаник	1	<i>n</i> × 10	0.3	35	<i>n</i>	0.03	0.2	2	7	240	20	0.82	20	15	
Лангтибейто	Верх. максимум (суглинок)	2.6	681	5.6	31	8.5	0.075	0.28	15	11.5	200	172	0.37	37	25
	Низ. среднее (песок, ниже 20 см)	2.3	578	2.7	15	3.4	0.004	0.14	5	8.8	72	126	0.26	20	11
Гольцовое	Верх. максимум (суглинок)	3.3	648	10	54	23	0.078	0.33	27	12	230	214	0.35	79	48
	Низ. среднее (песок, ниже 30 см)	1.16	563	3.7	21.6	4.9	0.005	0.16	6.5	8.4	81	132	0.26	34.7	14.4

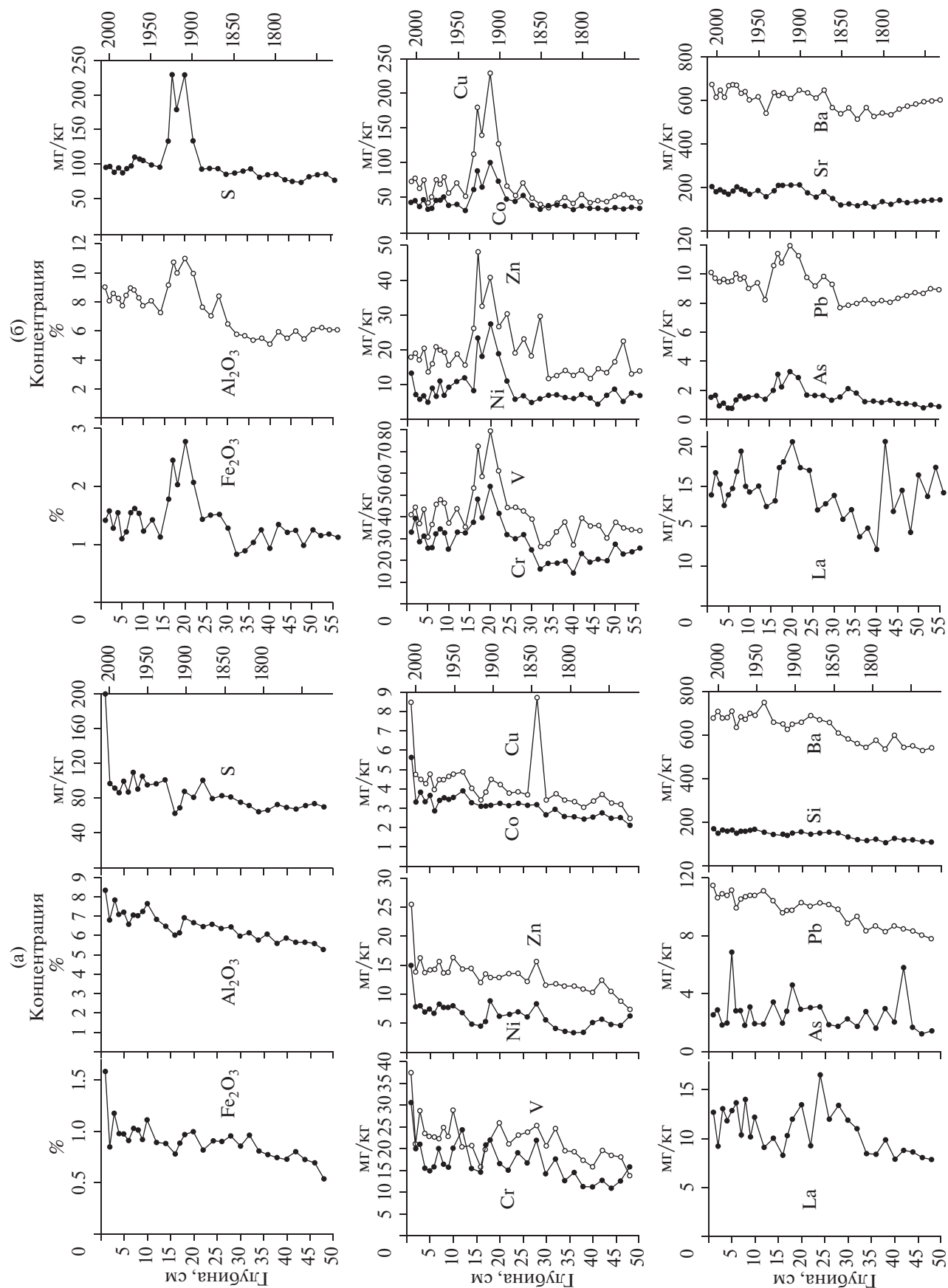


Рис. 4. Концентрационные профили элементов в колонках донных отложений озер Лангитбайто (а) и Гольдовос (б).

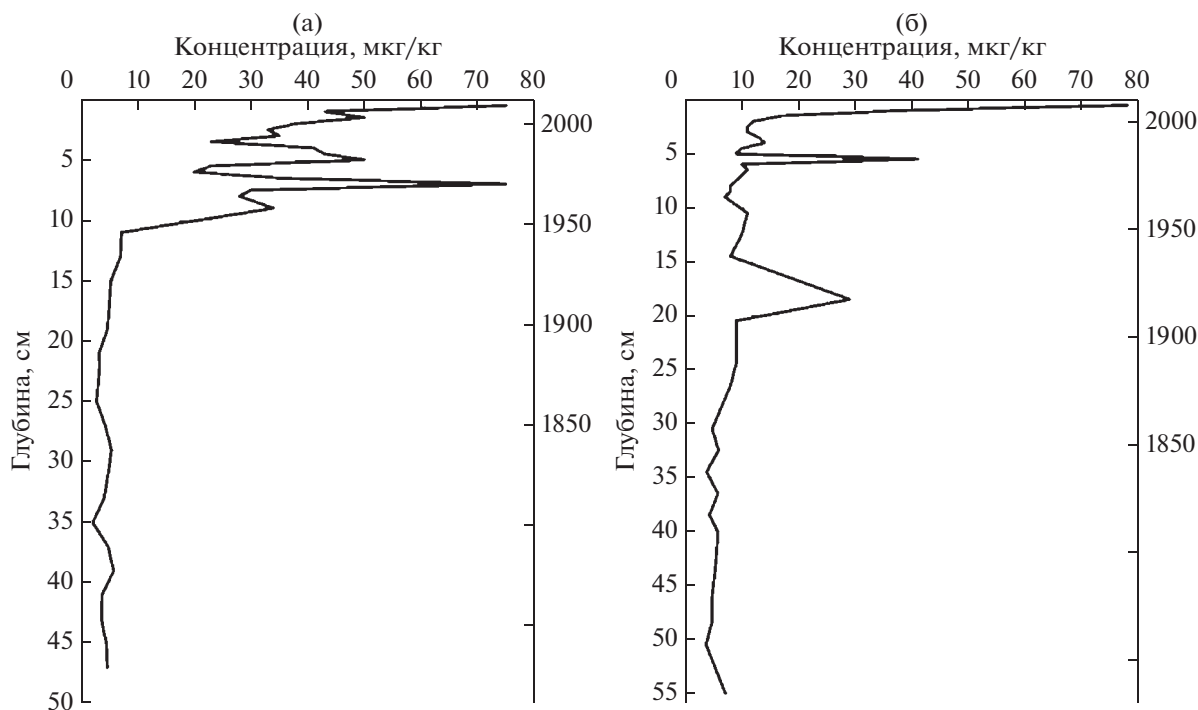


Рис. 5. Ртуть в ДО озер Лангтибейто (а) и Гольцовое(б).

10–47 см оз. Лангтибейто и 27–55 см оз. Гольцовое. Эти значения составили 4.5 ± 1.3 нг/г для Лангтибейто и 5.4 ± 1.2 нг/г для Гольцового. Более высокое содержание самой мелкой фракции (<0.04 мм) по всей суглинистой части колонки Лангтибейто объясняет более высокое содержание ртути в этой ее части. Незначительные содержания этой фракции в песчаных частях колонок из обоих озер соответствует низким (фоновым) содержаниям ртути. Характерно, что в верхних слоях донных отложений обоих озер концентрация ртути достигает примерно одинаковых величин. Фактор обогащения верхних слоев донных отложений для ртути относительно локального фона (содержания ртути в нижних слоях) составил 16.9 для Лангтибейто и 14.4 для Гольцового, что существенно выше, чем для других элементов. Это может свидетельствовать о похожем поступлении ртути из атмосферы за счет трансграничного переноса. Источником также могут служить промышленный район г. Норильска и нефтегазовые комплексы Ямала (факельное сжигание газа).

Диатомовый анализ. Качественный и количественный состав пресноводных диатомовых комплексов тесно связан с химическим составом воды, поэтому они были признаны биоиндикаторами, способными отражать изменения окружающей среды и климата. Наличие кремниевого панциря, имеющего сложную структуру и хорошо сохраня-

ющегося в ископаемом состоянии, позволяет по составу диатомей в донных отложениях дать ретроспективную оценку состояния экосистем и окружающей среды в прошлом, выявить динамику развития климата и неблагоприятных процессов. По сравнению со временем формирования позднечетвертичных отложений темпы внутривидовой эволюции в этой группе водорослей невелики. Видовой состав пресноводных диатомовых комплексов за последние 10–20 тыс. лет фактически не изменился. Поэтому диатомовые водоросли являются одной из руководящих групп при восстановлении экологических палеообстановок пресноводных водоемов (Разумовский Моисеенко, 2009; Моисеенко и др., 2000).

Учитывая разделение колонок по геохимическому составу (суглинок и песок), для диатомового анализа были использованы их верхние, суглинистые части – 10 см колонки оз. Лангтибейто и 23 см оз. Гольцовое.

Выявленная диатомовая флора донных отложений оз. Лангтибейто включает 124 вида, относящихся к 34 родам отдела Bacillariophyta. Створки имеют хорошую сохранность. Планктонные диатомеи составляют до 15% общего числа таксонов. Наибольшее видовое разнообразие принадлежит бентосным диатомеям, составляющим до 82% от общего количества таксонов. Все эти диатомеи пресноводные. В образцах идентифицировано 3 вида древних морских переотложенных

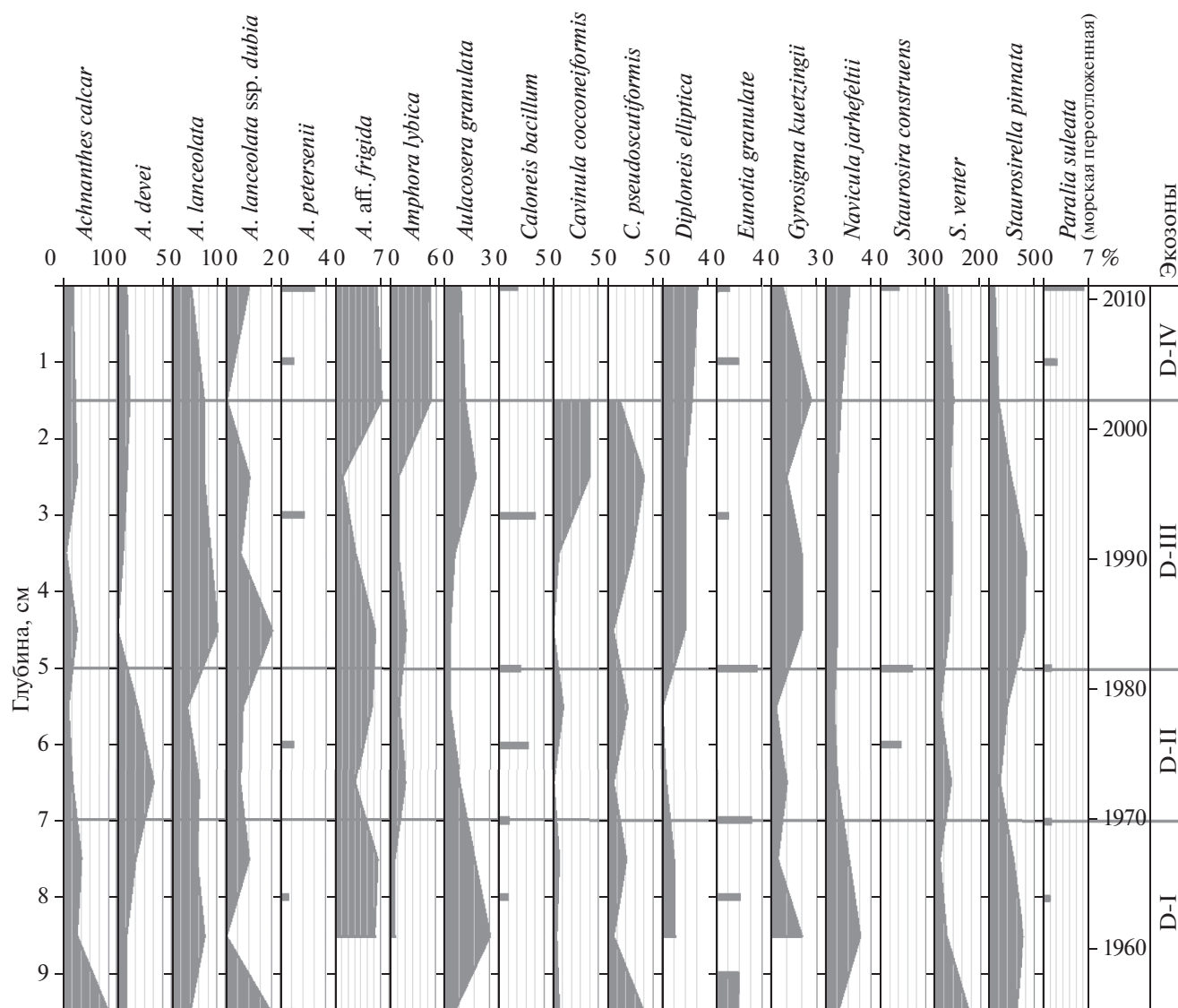


Рис. 6. Диатомовая диаграмма донных отложений оз. Лангтибейто с разделением на экозоны и датировкой.

диатомей — *Grunowiella gemmata*, *Paralia sulcata*, *Stephanopyxis turris*. Створки и обломки *Paralia sulcata* обнаружены по всему разрезу колонки, особенно много их в самом верхнем слое осадков.

На диатомовой диаграмме (рис. 6) показано распределение по разрезу некоторых доминирующих и показательных видов диатомей, а также приведены четыре экозоны, выделенные по характеру диатомовых комплексов в колонке из оз. Лангтибейто.

В интервале глубин 7–9.5 см (зона D-I) на переходе от зеленовато-бурого песка к зеленовато-бурому суглинкам содержание створок высокое. Здесь зафиксированы диатомовые комплексы с преобладанием бентосного вида *Staurosirella pinnata*. Виды рода *Achnanthes* (*Achnanthes calcar*) до

50%, *Navicula* (*N. jarnefeltii*) до 10%, виды родов *Staurosira* (*Staurosira venter*) до 14%. Немногочисленные экземпляры створок из болотного рода *Eunotia* (*E. pectinalis* var. *minor*) и рода *Pinnularia* (*P. microstauron*), составляют не более 3%, рода *Cavinula* (*C. pseudoscutiformis*) до 5%. Планктонные виды представлены в основном одним родом *Aulacoseira* и составляют до 15% (*Aulacoseira italica*), а планктонный вид *Tabellaria flocculosa* “единично” встречен только в этом горизонте осадков.

Выше по разрезу на глубине 5–7 см (зона D-II) в зеленовато-буром суглинке обнаружены диатомовые комплексы с преобладанием эпифитного пресноводно-солонатоводного вида *Staurosira construens* (до 20%). Из донных в состав доминант также входит *Staurosirella pinnata* (до 17%) — этот вид широко распространен в пресных, иногда

слегка солоноватых водах (легкий галофил, олигосапроб). Им сопутствуют обрастатели *Staurosira venter*, *Achnanthes lanceolata*, *A. aff. frigida* и др.

В третьей зоне (D-III), интервал 1.5–5 см, по сравнению с предыдущей зоной наблюдается рост численности диатомей. Преобладает вид *Staurosirella pinnata* (до 39%), которому сопутствуют *Staurosira venter* (до 7%). Возрастает количество эпифитных видов, прежде всего за счет увеличения количества створок видов рода *Achnanthes* (*Achnanthes lanceolata* (до 10%), *A. lanceolata* spp. *dubia* (до 2%), *Achnanthes bioretii* (до 5%) и др.). Снижается количество планктонных видов (*Aulacoseira alpigena*). Практически исчезают из комплекса болотные виды рода *Pinnularia*, виды рода *Eunotia* встречены “единично”.

В четвертой зоне (D-IV), интервал 0–1.5 см, концентрация створок остается высокой. Особенностью этого горизонта является отсутствие доминантных видов, комплексы составляют 59 видов диатомей, большая часть которых имеет количественные показатели от 3 до 7% от общего количества таксонов. Наиболее заметны: *Staurosira construens* (до 7%), *S. venter* (до 6%), *Staurosirella pinnata* (до 7%), *Achnanthes aff. frigida* (до 6%), *A. lanceolata* (до 5%), *A. petersenii* (до 3%), *A. bioretii* (до 3%), *Amphora lybica* (до 5%), *Aulacoseira italica* (до 4%), *Diploneis elliptica* (до 3%) и др. В диатомовых комплексах преобладают донные (до 54%) с заметным количеством эпифитов (до 42%).

Видовой состав и категории экологических групп в диатомовых комплексах озера Лангтибейто типичен для пресных водоемов с холодной водой, со слабощелочной или нейтральной реакцией среды. Тем не менее, следует отметить, что диатомовые комплексы этого озера отличаются от озерных комплексов Европейского Севера России отсутствием ярко выраженных доминант в составе ассоциаций и большим видовым разнообразием (124 вида). Так только *Staurosirella pinnata* имеет максимальные количественные показатели до 39% и то в отдельных горизонтах. По показателям рН в озере преобладали слабощелочные и нейтральные условия. В целом по колонке диатомовые комплексы характеризуют условия формирования литоральной зоны с нейтральной-слабощелочной реакцией среды с преобладанием бентосных (донных и эпифитных) диатомей, содержание планктонных диатомовых водорослей относительно невысоко (рис. 8).

Полученные распределения позволяют сделать некоторые обобщения. Незначительный рост количество эпифитных диатомей в зоне D-II по сравнению с первым этапом осадконакопления (D-I) может свидетельствовать о возможном незначительном снижении уровня воды в озере, а продолжающийся рост эпифитных диатомей в зоне D-III может говорить о дальнейшем сниже-

нии уровня. Наконец, преобладание в зоне D-IV донных и эпифитных диатомей с очень смешанным составом диатомовых ассоциаций, где нет ни одной ярко выраженной доминанты, может являться следствием нестабильных, меняющихся условий при развитии диатомовой флоры, что привело к тому, что ни один из видов не смог развиться в большом количестве.

В донных отложениях оз. Гольцовое выявлена чрезвычайно бедная количественно, но достаточно разнообразная по составу диатомовая флора — 107 видов и разновидностей диатомей, а также 5 таксонов морских жгутиковых водорослей — силикофлагеллят. К пресноводным и пресноводно-солоноватоводным диатомеям относятся 79 таксонов, из них 8 принадлежит планктонным видам, 44 относятся к донным диатомеям, а 27 являются видами — обрастателями. К солоноватоводным диатомеям, переносящим легкое осолонение бассейна обитания относятся 5 видов. Наибольшего видового разнообразия достигают донные диатомеи, среди которых наиболее представительны *Pinnularia* (17 видов) и *Navicula* (7 видов). Обрастатели представлены 27 видами и разновидностями. Это *Eunotia* (9 видов), *Cymbella* (7 видов), *Fragilaria* (3 вида). Остальные роды представлены меньшим количеством видов. Все створки пресноводных диатомей имеют хорошую сохранность и относятся к современной флоре.

Наряду с современными диатомеями, все изученные образцы содержат переотложенные морские диатомеи и силикофлагелляты палеогенового возраста. Всего установлено 22 таксона диатомей и 5 — силикофлагеллят. Среди переотложенных диатомей доминируют *Paralia sulcata* и *Aulacoseira* sp., встреченные во всех образцах с высокими количественными оценками, менее обильны *Coscinodiscus payeri* и *Stephanopyxis turris*, встречающиеся в большинстве образцов. Виды *Grunoviella gemmata* и *Hemiaulus* sp. встречены почти во всех образцах, но только в обломках, остальные виды диатомей, а также силикофлагелляты единичны. Из силикофлагеллят наиболее часто встречается *Dictyocha transitoria*.

Характерным для исследуемой колонки является присутствие в ряде образцов золотистых водорослей (Chrysophyta). Вид определен как *Synura sphagnicola* Korschikov. Этот представитель голарктических планктонных водорослей характерен для стоячих пресных вод. *Synura sphagnicola* встречена нами в 10 образцах из рассматриваемой колонки, а в осадках интервала 10–10.5 см число чешуек этой водоросли достигает более 75% от общего количества подсчитанных водорослей.

На диатомовой диаграмме (рис. 7) показано распределение по разрезу некоторых доминирующих и показательных видов диатомей. По составу и характеру диатомовых комплексов также выделе-

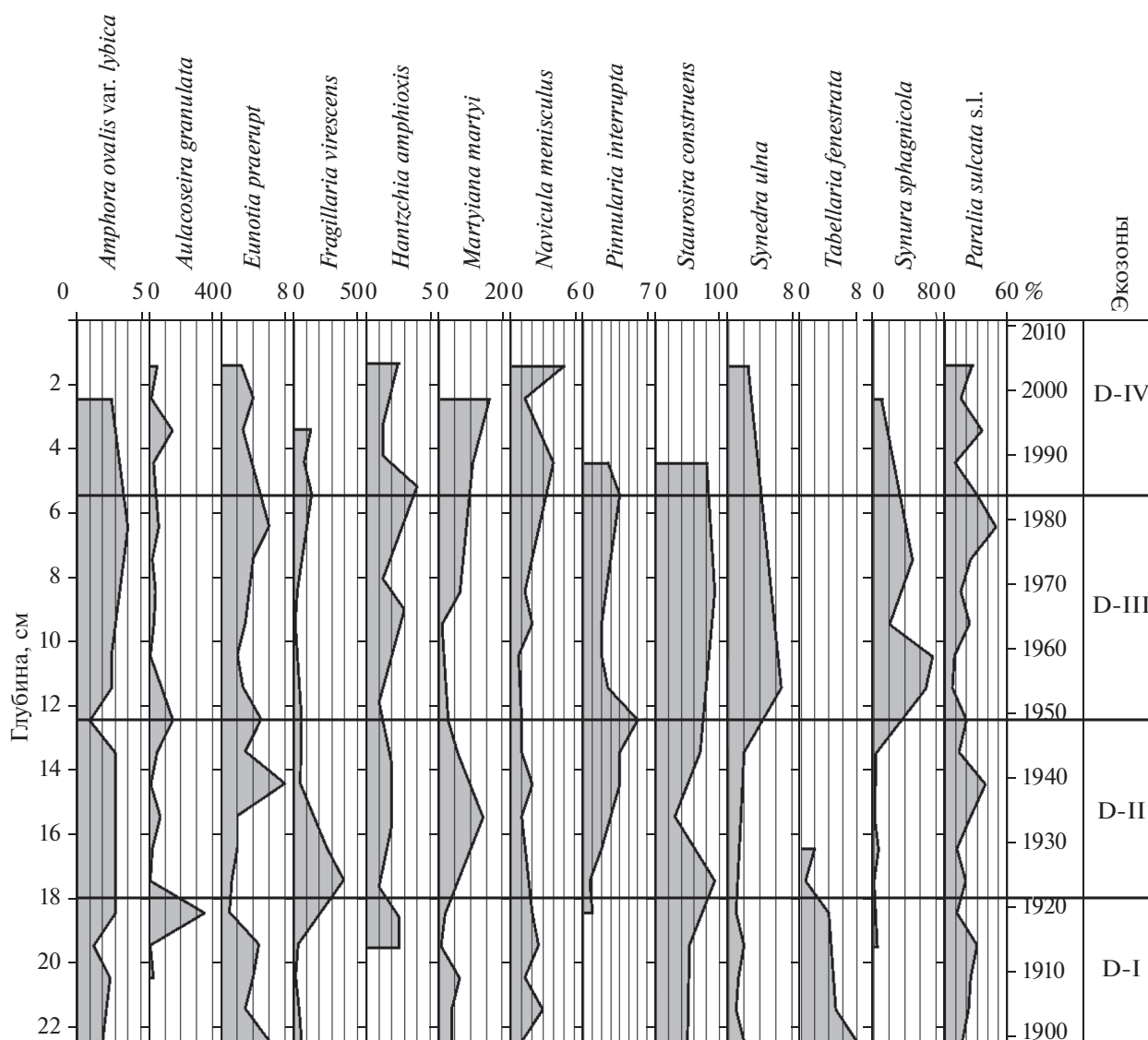


Рис. 7. Диатомовая диаграмма донных отложений оз. Гольцовое с разделением на экозоны и датировкой.

ны четыре зоны, отражающие изменение условий существования бассейна осадконакопления.

Зона D-I в интервале глубин 22.5–18 см, где донные отложения представлены зеленовато-бурым суглинком с большим количеством крупных темно-бурых пятен органики, характеризуется небогатыми диатомовыми комплексами, в составе которых преобладают обрастатели *Fragilaria virescens* (до 20%), *Tabellaria fenestrata* (до 8%), *Staurosira construens* (до 7%), *Eunotia praerupta* (до 6%). Донные виды *Amphora ovalis*, *Navicula menisculus* относятся к субдоминантам. Количество обрастателей вверх по разрезу внутри интервала уменьшается с 70 до 23%. В верхней части интервала отмечено появление *Synura sphagnicola*, а также пик численности планктонной *Aulacoseira granulata*.

Количество переотложенных диатомей колеблется от 20 до 65%.

В зоне D-II (17.5–12 см, суглинков с большим количеством включений органического черно-коричневого ила) в диатомовых комплексах преобладают *Fragilaria virescens* (до 18%), *Martyiana martyi* (до 18%), *Staurosira construens* (до 11%), а *Tabellaria fenestrata*, преобладающая в нижнем слое, исчезает из числа доминант. Список субдоминантов возрастает за счет эпифитных диатомей рода *Eunotia*, которые в верхней части интервала достигают 8%. Появляются донные формы (*P. interrupta*, *P. viridis*), не встреченные в нижележащих отложениях. Эпизодически появляется *Synura sphagnicola*. Количество обрастателей вверх по разрезу внутри интервала уменьшается с 87 до

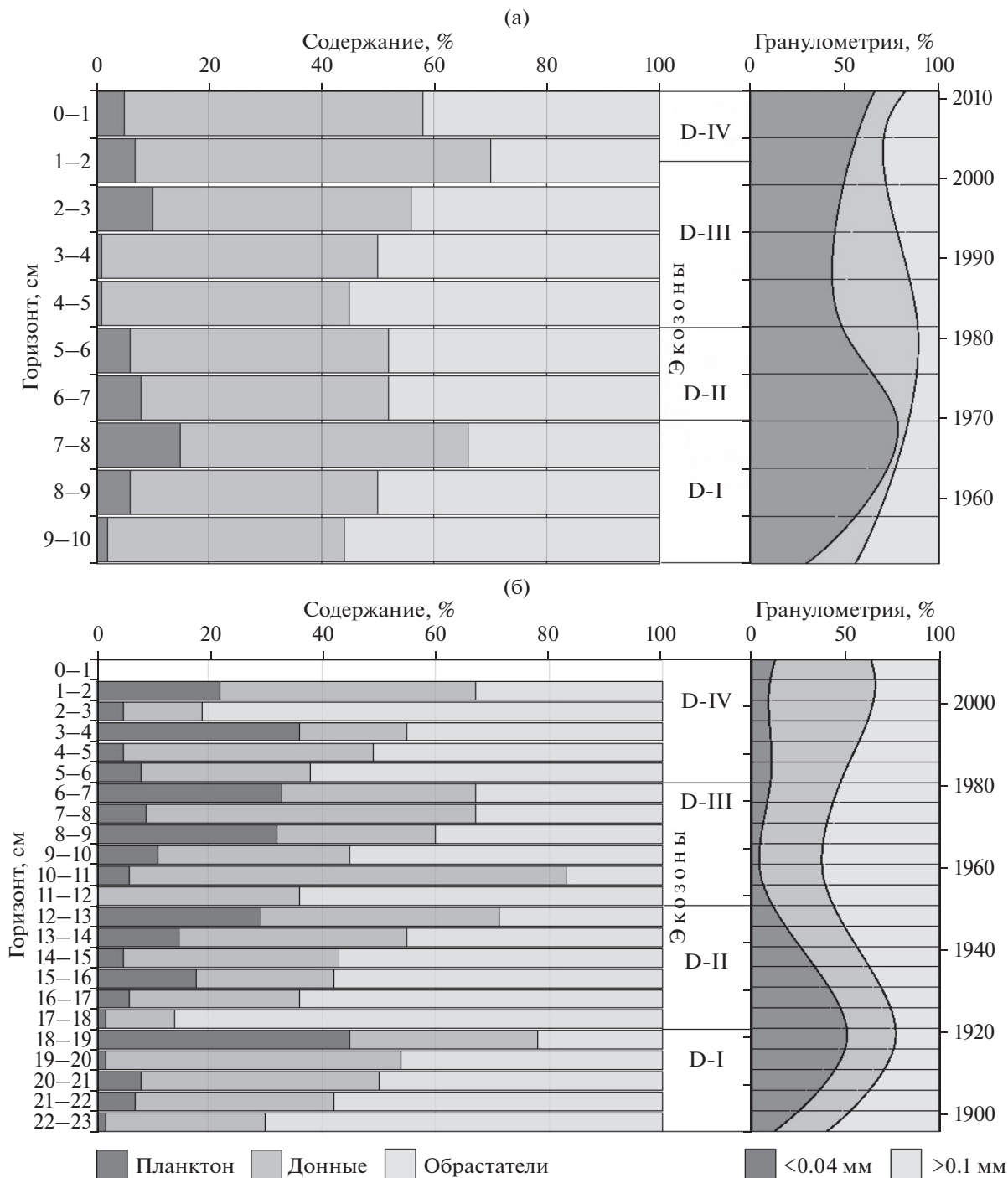


Рис. 8. Диаграмма распределения экологических групп диатомей, гранулометрия, датировка и экозоны в ДО озер Лангтибейто (а) и Гольцовое (б).

18%. Количество переотложенных диатомей колеблется от 35 до 60%.

В зоне D-III (11.5–6 см) количество включений черно-коричневого органического ила уменьшается вверх по разрезу. В комплексе происходит падение численности и уменьшение ви-

дого разнообразия пресноводных диатомей. В большинстве образцов доминирует *Synura sphagnicola*, количество которой достигает 75%. В пресноводном комплексе возрастает значение видов-индифферентов (*Hantzchia amphioxis*) и галофилов (*Synedra ulna* – до 7%), падает количество га-

лофобов (*Eunotia praerupta*, *Fragilaria virescens*, *Pinnularia interrupta*, планктонного вида *Aulacoseira granulata*). Стабильно высока численность *Staurisira construens* (8–9%). Количество переотложенных диатомей минимальное в разрезе (колеблется от 10 до 30%). Количество обрастателей вверх по разрезу внутри интервала уменьшается с 55 до 35% (исключение – интервал 10–10.5 см). Обилие *Synura sphagnicola* говорит о возможном увеличении площади водоема и повышении его трофического статуса.

Наконец, в верхней зоне D-IV (5.5–1 см) выделены бедные в видовом и количественном отношении комплексы диатомей. Доминирует в комплексах *Martyiana martyi* (до 18%), в нижней части интервала – *Fragilaria virescens*, *Staurisira construens*. Среди субдоминант – *Eunotia praerupta*, *Navicula menisculus*, *N. pupula*. Количество обрастателей вверх по разрезу внутри интервала уменьшается с 55 до 35% (исключение – интервал 2–2.5 см). В двух горизонтах (4–4.5 и 2–2.5 см) встречена *Synura sphagnicola*. Горизонт 0–0.5 см содержит только единичные переотложенные диатомеи. Количество переотложенных диатомей по сравнению с нижележащими отложениями возрастает. По составу и соотношениям между группами видов диатомей зона D-I близка к зоне D-II, отличаясь от нее чрезвычайной бедностью диатомовых комплексов.

Изученные диатомовые комплексы колонки озера Гольцовое позволяют восстановить условия существования озерного бассейна в период накопления верхних 22.5 см донных отложений. Характерным является низкая численность диатомей, постоянное присутствие переотложенных морских палеогеновых форм, а также золотистых водорослей, зафиксированных в большинстве образцов. Соотношение между доминирующими видами, а также между группами диатомей с различным местообитанием позволили выделить четыре этапа осадконакопления. Изменение соотношений между донными видами и обрастателями – уменьшение количества обрастателей снизу вверх по колонке внутри каждого этапа, позволяет говорить о колебаниях уровня озера – некотором увеличении глубины озера в каждом из выделенных этапов осадконакопления.

На первом этапе (D-I) диатомовые комплексы характеризуют условия формирования литоральной зоны с нейтральной-слабощелочной реакцией среды. На втором этапе (D-II) возрастает эвтрофированность бассейна. На третьем этапе (D-III) в большинстве горизонтов отмечены представители золотистых водорослей, обилие которых превышает количество пресноводных диатомей. В составе диатомового комплекса увеличивается количество видов – индифферентов и галофилов. Возможно увеличение площади озера и одновре-

менное повышение его трофического статуса. Наконец, на четвертом этапе (D-IV) снижается и без того невысокая численность диатомей. Вероятно, это связано с ухудшением условий их существования – похолоданием или осолонением бассейна. Во время всего изученного периода осадконакопления отмечен занос в осадки переотложенных диатомей – морских палеогеновых (вероятно, эоценовых) форм.

Распределения экологических групп водорослей по длине колонок из озер Лангтибейто и Гольцовое приведены на рис. 8. Сопоставление данных диатомового анализа с результатами гранулометрии показало, что в гранулометрическом составе озерных осадков исследуемых озер на рубеже 50–60 годов XX столетия отмечено выраженное уменьшение мелкодисперсной фракции и увеличение крупнодисперсной, в том числе грубообломочной фракции. Данное явление сопряжено с выраженной перестройкой в экосистемах обоих озер, которое характеризуется значительным уменьшением относительной численности планктонных форм, и увеличением процентной доли обрастателей и донных форм.

Обычно, подобные процессы перестройки экосистемы, связаны с обмелением озера. Вероятно, оба процесса имеют климатические причины, поскольку озера имеют различный размер и достаточно отдалены друг от друга. Поскольку оба озера расположены в зоне вечномерзлотных пород, закономерно предположить кратковременную аридизацию климата, с одновременным размывом обрамляющих озера пород и их последующим поступлением на обмелевшие озерные акватории.

Предположение, о региональных климатических причинах этих, локальных по времени, процессов, так же подтверждается различной длительностью и скоростью “отклика” экосистем этих озер. В оз. Лонгтийейто, более крупном, изменения в гранулометрическом составе происходили несколько позже, а фитопланктонные комплексы не исчезали полностью. В оз. Гольцовое исчезновение мелкодисперсной фракции произошло несколько ранее, а фитопланктонная составляющая в диатомовых комплексах отсутствует.

Следует также учитывать многофакторность этих процессов, обоснованных, в том числе, различной удаленностью озер от прибрежных, морских заливов.

Оценка динамики окружающей среды и новейшей эволюции озер. Помимо классических форм диатомового анализа, в работе был применен принцип унификации биоиндикационных методов (УБМ) (Моисеенко, Разумовский, 2009).

Принцип УБМ состоит в следующем: в качестве образца реконструкции численных значе-

ний рН взята методика расчета индекса сапробности (S) согласно Sládeček (1973).

$$S = \frac{\sum s_i k}{\sum k},$$

где s_i — индивидуальное численное значение сапробности для каждого таксона-индикатора, а k — коэффициент относительного обилия каждого таксона-индикатора, рассчитанный по шестиступенчатой шкале (Руководство..., 1992).

Соответственно, при расчете рН и температуры (T°) применен аналогичный метод, что и при расчете численных значений S :

$$\text{pH} = \frac{\sum ph_i k}{\sum k}; \quad T^\circ = \frac{\sum t_i k}{\sum k},$$

где ph_i и t_i — индивидуальные численные значения для каждого таксона-индикатора.

При наличии данных, представленных для данного таксона в виде численного интервала, рассчитывается его среднее значение:

$$ph_i = \frac{(ph_{\min} + ph_{\max})}{2}; \quad t_i = \frac{(t_{\min} + t_{\max})}{2}.$$

Исходной информационной базой данных для расчета численных значений рН и T° послужила работа (Барина и др., 2006).

Следует особо подчеркнуть, что основной положительной стороной авторской методики является достоверная реконструкция темпов и направленности изменения рН и T° , а не расчет численных значений как таковых.

В образцах донных отложений из оз. Лангтибейто было идентифицировано 57 таксонов, входящих в группу индикаторов сапробности. В группу по рН-приуроченности включен 71 таксон-индикатор; в группу по температурной приуроченности — 13 таксонов.

Расчет численных значений палеотемператур установил их изменение в интервале 19.7–15.8°C (рис. 9а). Это свидетельствует о высокой степени прогрева водных толщ в периоды “открытой воды” и деградации ледяного покрова. Никаких значимых изменений показателя индекса сапробности (S) не зарегистрировано (1.24–0.99). Озеро характеризуется как олиго-сапробный водоем, что типично для этих широт.

Расчет численных значений рН подтвердил выводы, сделанные на основе классических методов диатомового анализа: водоем характеризуется

слабощелочной или нейтральной реакцией среды, значения рН меняются в интервале 6.93–7.2.

Между характером изменения численных значений сапробности, температуры и рН не было выявлено значимых корреляционных связей.

В образцах донных отложений из оз. Гольцовое было идентифицировано 47 таксонов, входящих в группу индикаторов сапробности. В группу по рН-приуроченности включено 70 таксонов, в группу по температурной приуроченности — 17 таксонов. Расчет численных значений палеотемператур характеризует озеро, как холодноводный водоем (16.75–10.0°C) (рис. 9б). Для холодноводного, заполярного водоема, у оз. Гольцового установлен достаточно высокий трофический статус: среднее значение индекса сапробности ($S_{\text{cp.}}$) равно 1.46, что находится, практически, на границе между олигосапробной и β -мезосапробной зонами. Изменение значений рН меняется в интервале: 7.34–6.16. Характер изменения значений рН может определяться трансгрессивными воздействиями на акваторию озера.

Между характером изменения численных значений сапробности, температуры и рН не было выявлено значимых корреляционных связей. Однако между выделенными классическими методами диатомового анализа экосонами и характером изменения реконструированных гидрологических параметров прослеживается определенная сопряженность.

Результаты исследования озерных отложений наглядно продемонстрировали перспективность применения биоиндикационных методов на основе диатомового анализа для реконструкции новейших климатических изменений в арктических районах Западной Сибири.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования колонок донных отложений двух арктических озер — Лангтибейто (полуостров Ямал) и Гольцовое (полуостров Гыдан) показал, что литологические особенности осадка, который в обоих случаях четко разделяется на два слоя — суглинок в верхней части колонок и песок в основании, существенно не влияют на распределение элементов в колонках.

Исследованные донные отложения характеризуются крайне низким содержанием органического вещества (по результатам потерь при прокаливании) даже в верхних суглинистых частях колонок. Факторы обогащения, рассчитанные относительно средних содержаний в глинистых сланцах, не превышают значение 2 даже для максимальных концентраций, что позволяет рассматривать обследованные озера как фоновые.

Ртуть, в отличие от остальных элементов, показала существенное превышение локального

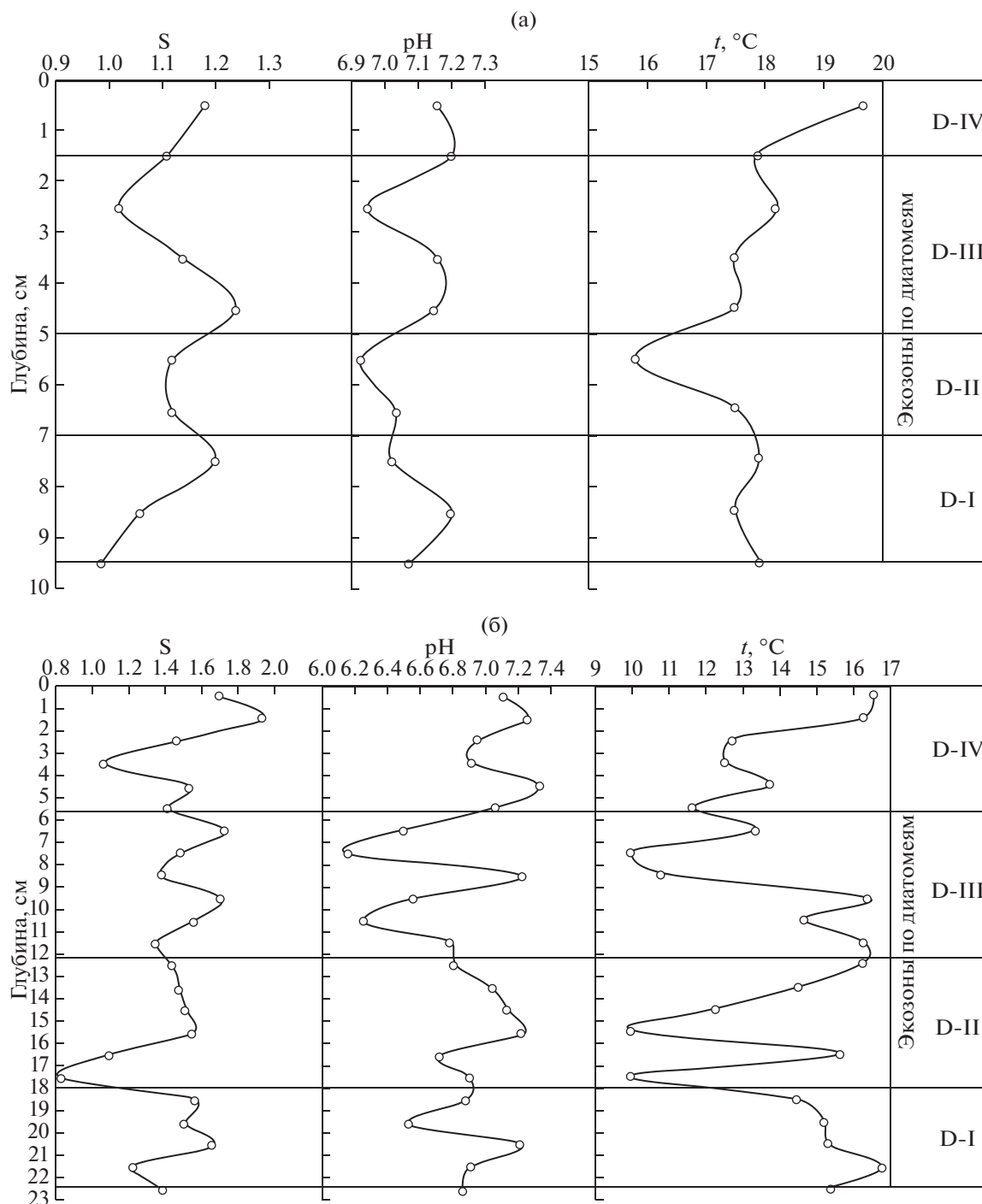


Рис. 9. Изменение численных значений параметров гидросреды – сапробности, рН и температуры в озерах Лангтйбейто (а) и Гольцовое (б).

фона в приповерхностных слоях донных отложений обоих озер. Возможная причина – поступление металла из атмосферы за счет трансграничного переноса.

Скорость осадконакопления, оцененная по активности изотопов ^{210}Pb и ^{137}Cs , составила 0.17 и 0.20 см/год.

Сопоставление данных диатомового анализа и гранулометрии выявило процессы перестройки экосистем озер, которое характеризуется существенным изменением соотношения различных групп диатомей. Это может быть связано с обмелением озер в результате климатических изменений. Для реконструкции новейших климатических

ских изменений в арктических районах перспективно использование биоиндикационных методов на основе диатомового анализа.

Исследования выполнены в рамках Госзаданий ГЕОХИ РАН № 0137-2019-0008 и ИВР РАН № 0147-2019-0004, п. 4.2 и при финансовой поддержке грантов РФФИ № 18-05-60012 и № 17-05-00673/19.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Барина С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. (2006) *Биоразнообразие водорослей – индикаторов окружающей среды*. Тель-Авив, 500 с.

Геокриология СССР. *Западная Сибирь* (1989) М.: Недра, 454 с.

Давыдова Н.Н. (1985) *Диатомовые водоросли – индикаторы природных условий водоемов в голоцене*. Л.: Наука, 244 с.

Даувальтер В.А. (1995) Концентрации тяжелых металлов в донных отложениях озер Кольского полуострова как индикатор загрязнения водных экосистем. *Проблемы химического и биологического мониторинга экологического состояния водных объектов Кольского Севера*. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 24-35.

Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал: в 3 томах. Т. 2. Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения / Под общ. ред. Баду Ю.Б., Гафарова Н.А., Подборного Е.Е. М.: ООО “Газпром Экспо”, 2013, 424 с.

Масленникова А.В., Удачин В.Н., Дерягин В.В. (2014) *Палеоэкология и геохимия озерной седиментации голоцена Урала*. Екатеринбург: РИО УрО РАН. 136 с.

Моисеенко Т. И., Разумовский Л.В. (2009) Новая методика реконструкции катионно-анионного баланса в озерах (диатомовый анализ). *ДАН. Общая биология* **427**(1), 132-135.

Моисеенко Т.И., Даувальтер В.А., Ильяшук Б.П., Каган Л.Я., Ильяшук Е.А. (2000) Палеоэкологическая реконструкция антропогенной нагрузки. *ДАН* **370**(1), 115-200.

Моисеенко Т.И., Даувальтер В.А., Родюшкин И.В. (1998) Механизмы круговорота природных и антропогенно привнесенных металлов в поверхностных водах арктического бассейна. *Водные ресурсы* (2), 231-243.

Моисеенко Т.И., Даувальтер В.А., Лукин А.А., Кудрявцева Л.П., Ильяшук Б.П., Ильяшук Л.И., Сандмиров С.С., Каган Л.Я., Вандыш О.М., Шарова Ю.Н., Королева И.Н., Шаров А.Н. (2002) *Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра*. М.: Наука, 476 с.

Морозова Н.В., Ларина Н.С., Котова Т.П., Шайхутдинова Д.З. (2015) Особенности геохимического распределения валового содержания ртути в донных отложениях озер Западной Сибири. *Вестник ТюмГУ. Экология и природопользование* **1**(1), 65-73.

Отчет о научном исследовании № 11.G34.31.0036 от “25” ноября 2010 г. (промежуточный – 2 этап) “Качество вод в условиях антропогенных нагрузок и изменения

климата в регионах Западной Сибири”. Тюмень 2011. <https://ecotoxlab.files.wordpress.com/2011/11/result2011.pdf>

Разумовский Л.В. (2012) *Оценка трансформации озерных экосистем методом диатомового анализа*. М.: Геос, 200 с.

Разумовский Л.В., Моисеенко Т.И. (2009) Оценка пространственно-временных трансформаций озерных экосистем методом диатомового анализа. *ДАН. Общая биология* **429**(2), 274-277.

Ронов А.Б., Ярошевский А.А., Мигдисов А.А (1990) *Химическое строение земной коры и геохимический баланс главных элементов*. М.: Наука, 180 с.

Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем. (1992) Под ред. Абакумова В.А. СПб. Гидрометеиздат, 320 с.

Степанец О.В., Борисов А.П., Травкина А.В., Соловьева Г.Ю., Владимиров М.В., Алиев Р.А. (2010) Использование радионуклидов ²¹⁰Pb и ¹³⁷Cs для геохронологии современных осадков арктического бассейна в местах захоронения твердых радиоактивных отходов. *Геохимия* (4), 424-429.

Stepanets O.V., Borisov A.P., Travkina A.V., Solov'eva G.Yu., Vladimirov M.V., Aliev R.A. (2010) Application of the ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs Radionuclides in the Geochronology of Modern Sediments at the Storage Sites of Solid Radioactive Wastes in the Arctic Basin. *Geochem. Int.* **48**(4), 398

Страхов Н.М. (1963) *Типы литогенеза и их эволюция в истории Земли*. М.: Гостоптехиздат, 535 с.

Харитонов В.Г. (2010) Диатомовые водоросли в отложениях трех горных олиготрофных озер бассейна реки Амгуэма (Чукотка). *Сибирский экологический журнал* (4), 609-622.

Таций Ю.Г., Стахеев Ю.И. (2001) Определение содержания ртути в пробах сложного состава. *Партнеры и конкуренты* (4), 29-34.

Ямал СПГ. *Оценка воздействия на окружающую среду и социальную сферу: краткое изложение результатов оценки* (2014) ЭНВАЙРОН. 953 с.

Battarbee R.W., Grytnes J.A., Thompson R., Appleby P., Catalan J., Korhola A., Birks H.J.B., Heegaard E., Lami A. (2002) Comparing palaeolimnological and instrumental evidence of climate change for remote mountain lakes over the last 200 years. *J. Paleolimn.* **28**, 161-179.

Cremer H., Andreev A., Hubberten H.W. (2004) Paleolimnological Reconstruction of Holocene Environments and Climate from Lake Lyadhej-To, Ural Mountains, Northern Russia. *Arctic Antarctic Alpine Res.* **36**(2), 147-155.

Kamenik C., Schmidt R., Kum G., Psenner R. (2001) The influence of catchment characteristics on the water chemistry of mountain lakes. *Arctic Antarctic Alpine Res.* **33**, 404-409.

Laing T.E., Pienitz R., Smol J.P. (1999) Freshwater diatom assemblages from 23 lakes located near Norilsk, Siberia: a comparison with assemblages from other circumpolar treeline regions. *Diatom Res.* **14**(2), 285-305.

Laing T.E., Smol J.P. (2000) Factors Influencing Diatom Distributions in Circumpolar Treeline Lakes of Northern Russia. *Journal of Phycology* **36**(6), 1035-1048.

- Lotter A.F., Hofmann G. (2003) The development of the lateglacial and Holocene diatom flora in Lake Sedmo Rilsko (Rila mountains, Bulgaria). *Aspects of Paleoecology* (Ed. Tonkov S.). Sofia; Moscow: Pensoft Publishers, 171-183.
- Mackereth F.J.H. (1966) Some chemical observations on post-glacial lake sediments. *Phil. Trans. R. Soc.* **B250**, 165-213.
- Renberg I. (1978) Paleolimnology and varve counts of the annually laminated sediment of Lake Rudetjärn, Norten Sweden. *Early Norrland*. **11**, 63-92.
- Renberg I. (1990) A procedure for preparing large sets of diatom slides from sediment cores. *J. Paleolimnology* **4**, 87-90.
- Schmidt R., Koinig K.A., Thompson R., Kamenik C. (2002) A multi proxy core study of the last 7000 years of climate and alpine land-use impacts on an Austrian mountain lake (Unterer Landschitzsee, Niedere Tauern). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **187**, 101-120.
- Solovieva N., Jones V.J. (2002) A multiproxy record of Holocene environmental changes in the central Kola Peninsula, northwest Russia. *J. Quaternary Sci.* **17**, 303-318.
- Sládeček V. (1973) System of water quality from biological point of view. *Arch. Hydrobiol. Ergeb. Limnol.* **7**(7), 1-218.
- Stockner J.G. (1975) Phytoplankton heterogeneity and paleolimnology of Babine Lake, British Columbia, Canada. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **19**, 2236-2250.
- Stockner J.G., Benson W.W. (1967) The succession of diatom assemblages in the recent sediments of Lake Washington. *Limnol. Oceanogr.* **12**, 513-532.
- Tolonen M. (1978) Paleoecology of annually laminated sediments in Lake Ahvenainen, S. Finland III. human influence in the lake development. *Ann. Bot. Fen.* **15**, 223-240.
- Turekian K.K., Wedepohl K.H. (1961) Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geol. Soc. Amer. Bull.* **72**, 175-192.
- Walker T.R., Crittenden P.D., Dauvalter V.A., Jones V., Kuhry P., Loskutova O., Mikkola K., Nikula A., Patova E., Ponomarev V.I., Pystina T., Rätti O., Solovieva N., Stenina A., Virtanen T., Young S.D. (2009) Multiple indicators of human impacts on the environment in the Pechora Basin, north-eastern European Russia. *Ecol. Indic.* **9**, 765-779.