УДК 561.26:551.894(571.63)

ГОЛОЦЕНОВЫЕ СУКЦЕССИИ ДИАТОМОВЫХ ВОДОРОСЛЕЙ ОЗЕРА ЗЕРКАЛЬНОЕ (Южное Приморье)

Ложкин А. В.[1], Черепанова М. В.[2], Андерсон П. М.[3], Гребенникова Т. А.[4], Цыганкова В. И.[1]

[1]ФГБУН Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н. А. Шило ДВО РАН, г. Магадан
[2] ФГБУН Центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, г. Владивосток
[3]Вашингтонский университет, Факультет наук о Земле и Космосе, Центр четвертичных исследований, г. Сиэтл, США
[4]ФГБУН Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Владивосток
E-mail: lozhkin@neisri.ru, pata@uw.edu

Для реконструкции природной среды голоцена по данным диатомового анализа и изучения смены экологических условий в прибрежных озерах Южного Приморья было выбрано оз. Зеркальное, расположенное у юго-восточного склона хребта Сихотэ-Алинь. Соотношение диатомей различных экологических групп (морских и пресноводных, бентосных и планктонных) в его осадках определяет этапы развития водоема, обусловленные флуктуациями климата и колебаниями уровня моря. На основании изменений численности видов и экологической структуры диатомовых комплексов установлены две зоны диатомовых водорослей: ДЗ 1 и ДЗ 2. Комплекс диатомей зоны ДЗ 1 (6350–3540 калиброванных лет до н. э.) указывает на то, что оз. Зеркальное возникло как относительно мелководный залив или прибрежная лагуна. Диатомовые сукцессии зоны ДЗ 2 (3540–1780 кал. лет до н. э.) свидетельствуют о снижении морского влияния и образовании пресноводного озера. Установленные в ДЗ 2 подзоны отражают изменчивость этого воздействия на пресный бассейн. Диатомовый анализ также зафиксировал похолодание климата в интервале 2900–2580 кал. лет до н. э. Современное пресноводное оз. Зеркальное может находиться под влиянием морских вод, поступающих через протоку, соединяющую озеро с морем, а также сильных прибрежных ветров, переносящих соленые брызги на акваторию.

***Ключевые слова*: диатомовый анализ, радиоуглеродное датирование, голоцен, палеоэкологические реконструкции, колебания уровня моря, флуктуации климата, Южное Приморье, озеро Зеркальное.**

DOI: 10.34078/1814-0998-2026-4--

ВВЕДЕНИЕ

Для реконструкции динамики природной среды и разработки прогнозных моделей ее развития проводится анализ сигналов вариаций экологических параметров, отраженных в естественных архивах, таких как озерные отложения. В них сохраняются практически непрерывные летописи эволюции конкретного водоема и прилегающей к нему территории. Одним из ключевых инструментов подобных исследований является диатомовый анализ. Изучение изменений в ископаемых сообществах диатомовых водорослей, находящихся на нижнем уровне трофических пирамид, позволяет восстановить состояние экосистем озер и характер осадконакопления на определенных временных срезах, установленных радиоуглеродным методом.

Особый интерес вызывают водные экосистемы, расположенные в контактной зоне суши и моря, что обусловливает многообразие факторов, влияющих на них. Флуктуации климата и связанные с ними колебания уровня Мирового океана в голоцене, несомненно, сказывались на этих водоемах. Выявление особенностей реакции прибрежных лентических экосистем на динамически меняющуюся среду в относительно недалеком прошлом и изучение их эволюции — актуальная научная задача.

© Ложкин А. В., Черепанова М. В., Андерсон П. М., Гребенникова Т. А., Цыганкова В. И., 2026
https://orcid.org/0009-0008-0228-1578
https://orcid.org/0000-0002-6530-0093
https://orcid.org/0000-0003-2179-4025

В Приморском крае озер, расположенных в прибрежной зоне и сохраняющих сигналы влияния как глобальных, так и региональных факторов, достаточно много (рис. 1), но комплексное изучение надежно хронологически датированных осадков проведено пока только в двух: оз. Латвия (Lozhkin et al., 2021) и оз. Птичье (Микишин и др., 2024).

Для воссоздания палеосреды юга Приморья в голоцене и отслеживания последовательной смены экологических условий водоемов по данным диатомового анализа, опирающегося на надежный хроностратиграфический контроль, было выбрано озеро Зеркальное (рис. 1). Благодаря своему географическому положению в прибрежной зоне Японского моря, оно является оптимальным объектом для подобных изысканий.

Цель настоящего исследования заключалась в изучении реакции сообществ диатомовых водорослей озера Зеркального (Южное Приморье) на динамичные изменения глобальных и региональных факторов для реконструкции палеоэкологических условий этого водоема.

МЕСТОПОЛОЖЕНИЕ И ПАРАМЕТРЫ ОЗЕРА ЗЕРКАЛЬНОЕ

Оз. Зеркальное расположено в долине одноименной реки, в 2,5 км от побережья Японского моря. Координаты водоема: 44°10′00″ с. ш., 135°36′00″ в. д. Максимальная длина озера составляет 1,5 км, максимальная ширина – 0,9 км, длина береговой линии – 3,4 км, а площадь зеркала – 0,99 км². Водоем является пресноводным; его максимальная глубина составляет 1,2 м, а во время паводков она может возрастать до 1,6 м. Абсолютная высота уреза воды – 0.3 м над уровнем моря.

В озеро впадает несколько небольших водотоков, наиболее крупными из которых являются ручьи Зеркальная Падь (7 км) и Овсянникова Падь (13 км). Связь с морем осуществляется через протоку длиной 3,05 км.

Оз. Зеркальное расположено в муссонной области умеренного пояса. Климатические условия характеризуются сезонной сменой воздушных потоков, обусловленной термическими контрастами между континентом и океаном, а также

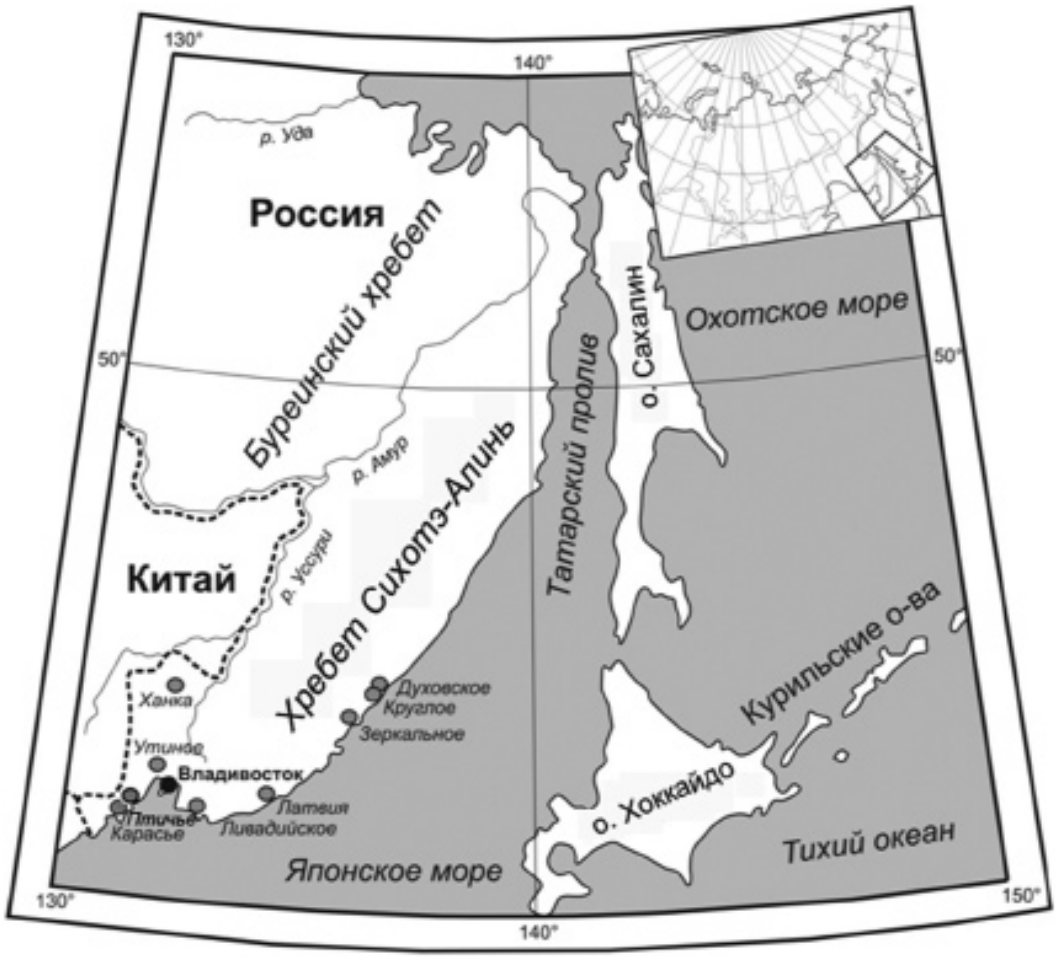


Рис. 1. Географическое положение оз. Зеркальное и озер Южного Приморья, расположенных в прибрежной зоне

Fig. 1. Geographical location of the Zerkalnoye Lake and coastal lakes of the Southern Primorye

динамикой смещения Северо-Тихоокеанского антициклона.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Бурение донных отложений озера Зеркальное проводилось в рамках совместных российско-американских исследований позднечетвертичных климатов и растительности Берингии и Северо-Восточной Азии (координаторы исследований: с российской стороны – А. В. Ложкин, СВКНИИ ДВО РАН; со стороны США – П. М. Андерсон, Вашингтонский университет). Целью полевых работ являлось получение непрерывных колонок осадков для палеогеографических и палеоклиматических реконструкций в позднем плейстоцене и голоцене.

Керн донных отложений мощностью 929 см был отобран в июле 2015 года в центральной части оз. Зеркального (координаты точки бурения: 44°10′02″ с. ш., 135°36′05″ в. д.). Отбор проб осуществлялся с помощью поршневого пробоотборника конструкции Райта (Wright et al., 1984) с деревянной платформы, смонтированной на базе двух надувных резиновых лодок (катамарана). Для стабилизации положения над точкой бурения катамаран фиксировался четырьмя якорями. Вертикальное направление движения пробоотборника задавалось обсадной трубой, частично погруженной в донные осадки. Извлечение керна выполнялось последовательными метровыми интервалами; на участках с высокой плотностью грунта шаг проходки сокращался до нескольких десятков сантиметров.

Литологическое описание керна:

0–140 см – алеврит серый пластичный с тонкой горизонтальной слоистостью, с включением обломков древесины и раковин моллюсков;

140–420 см – алеврит горизонтально-слоистый с раковинами моллюсков и фрагментами древесины; на глубине 235 см наблюдается примесь органики черного цвета с запахом сероводорода;

420–860 см – алеврит горизонтально-слоистый с раковинами моллюсков и ветвями кустарников.

860–908 см – алеврит серый пластичный со слабоокатанной галькой, дресвой и щебнем;

908–929 см – песок серый среднезернистый с примесью алеврита (до 30-40%), что придает осадку пластичность.

Отбор проб на различные виды анализов, включая радиоуглеродное датирование и диатомовый анализ, проводился в лабораторных условиях.

Радиоуглеродное датирование выполнено методом акселеративной масс-спектрометрии (AMS) в Ливерморской Национальной лаборатории им. Лоуренса (Калифорния, США). Получена серия из 20 AMS-дат (таблица 1). Построение возрастной модели осуществлялось с помощью программного пакета BACON (Blaauw, Christen, 2011) (рис. 2). Радиоуглеродные даты откалиброваны с использованием калибровочной

Таблица. **Радиоуглеродные и калиброванные датировки осадков оз. Зеркальное**
Table. **Radiocarbon and calibrated dates of sediments from Lake Zerkalnoye**

Глубина, см	^{14}C дата, л. н.	Калибр. дата	Лаб. номер	Материал
38–39	640±40	600	CAMS-66768	4 семени
97–98	670±40	630	CAMS-66769	Семена, мох
139–141	2 620±40	2 750	CAMS-69492	Семена
155–159	2 530±40	2 600	CAMS-76801	Семена
177	2 560±50	2 630	CAMS-62171	Семена злаков
251–254	3 080±90	3 270	CAMS-69493	Раст. остатки
306–307	3 050±80	3 280	CAMS-74332	Раст. остатки
341–342	3 060±40	3 270	CAMS-66770	Мох
407–408	3 150±50	3 370	CAMS-74331	Раст. остатки
458–461	3 130±60	3 340	CAMS-69559	Раст. остатки
458–461	3 220±80	3 440	CAMS-69491	Раст. остатки
56–563	3 770±40	4 140	CAMS-69495	Раст. остатки
641–643	4 460±60	5 110	CAMS-74330	Раст. остатки
726	4 910±40	5 640	CAMS-59796	Древесина
726B	5 250±40	6 020	CAMS-59798	Древесина
756A	5 280±50	6 070	CAMS-59797	Древесина
809-810	5 250±70	6 040	CAMS-69496	Раст. остатки
827-829	6 120±40	7 000	CAMS-75548	Древесина
851-852	6 460±50	7 370	CAMS-69497	Раст. остатки
857-864	6 320±170	7 280	CAMS-75546	Раст. остатки
877-879	7 290±110	8 110	CAMS-63995	Раст. остатки

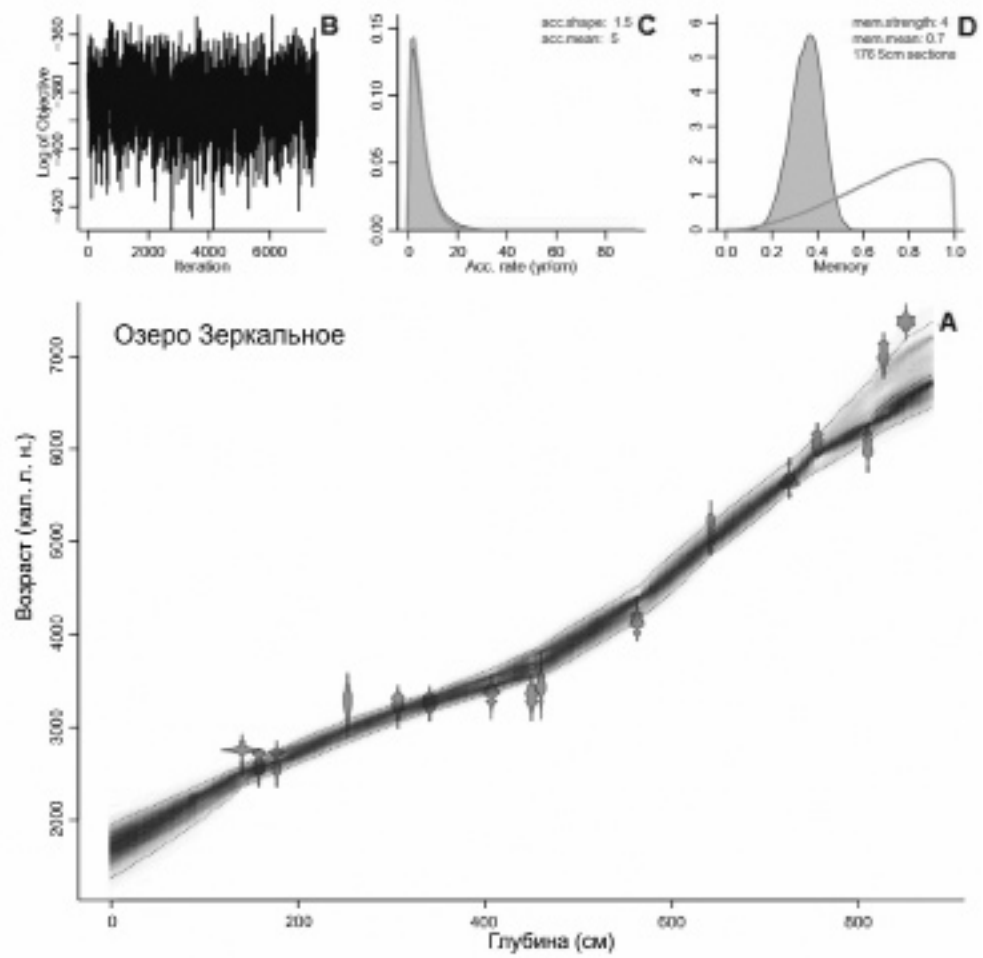


Рис. 2. Возрастная модель озера Зеркальное, основанная на 20 радиоуглеродных AMS-датах, которые были откалиброваны и обработаны с помощью программного пакета BACON (Blaauw, Christen, 2011). Черная кривая (a) показывает оптимальную модель, основанную на средневзвешенных возрастах, а серая пунктирная часть отражает 95% доверительные интервалы. Верхние панели показывают: (b) историю итераций метода Монте-Карло с цепями Маркова; (c) распределения скорости накопления и (d) распределения памяти, иллюстрирующие априорное (черная линия) и апостериорное (серая кривая) распределения.

Fig. 2. Age model for the Zerkalnoye Lake based on 20 AMS radiocarbon dates, which were calibrated and processed with the BACON software package (Blaauw, Christen, 2011). The black curve (a) indicates the optimal model based on weighted mean ages, whereas the gray stippled portion reflects 95% confidence intervals. The upper panels indicate: (b) history of the Markov Chain Monte Carlo iterations; (c) the distributions for the accumulation rate and (d) the distributions for memory illustrating prior (black line) and posterior (gray curve) distributions.

кривой IntCal20 (calib.org/calib/; Stuiver, Reimer, 1993).

Диатомовый анализ выполнялся в Тихоокеанском институте географии ДВО РАН и Федеральном научном центре биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН. Образцы осадка обрабатывались в соответствии со стандартной методикой (Прошкина-Лавренко, 1974). Для каждого образца объемом 1 см³ подсчитывали 250–300 створок диатомовых водорослей с помощью микроскопа Axio Scope при увеличении x1000. Идентификация таксонов и анализ их экологических характеристик проводились согласно: Krammer, Lange-Bertalott (1986, 1988, 1991), Баринова с соавторами (2006), Цой, Обрезкова (2017), Witkowski et al. (2000) и Hendey (1964). Расчет процентного содержания диатомовых водорослей и построение диаграмм выполнены с помощью программ Tilia и Tilia-graph (http://museum.state.il.us/pib/grimm/tilia) (рис. 3). Диатомеи были распределены по четырем экологическим группам: морские, солоноватоводно-морские, солоноватоводные и пресноводные.

Выделение локальных диатомовых зон проведено на основе CONISS — кластерного анализа методом минимальной дисперсии с соблюдением стратиграфической последовательности (Grimm, 1987).

Для анализа полученных данных был также использован метод главных компонент (Principal Component Analysis, PCA) на основе

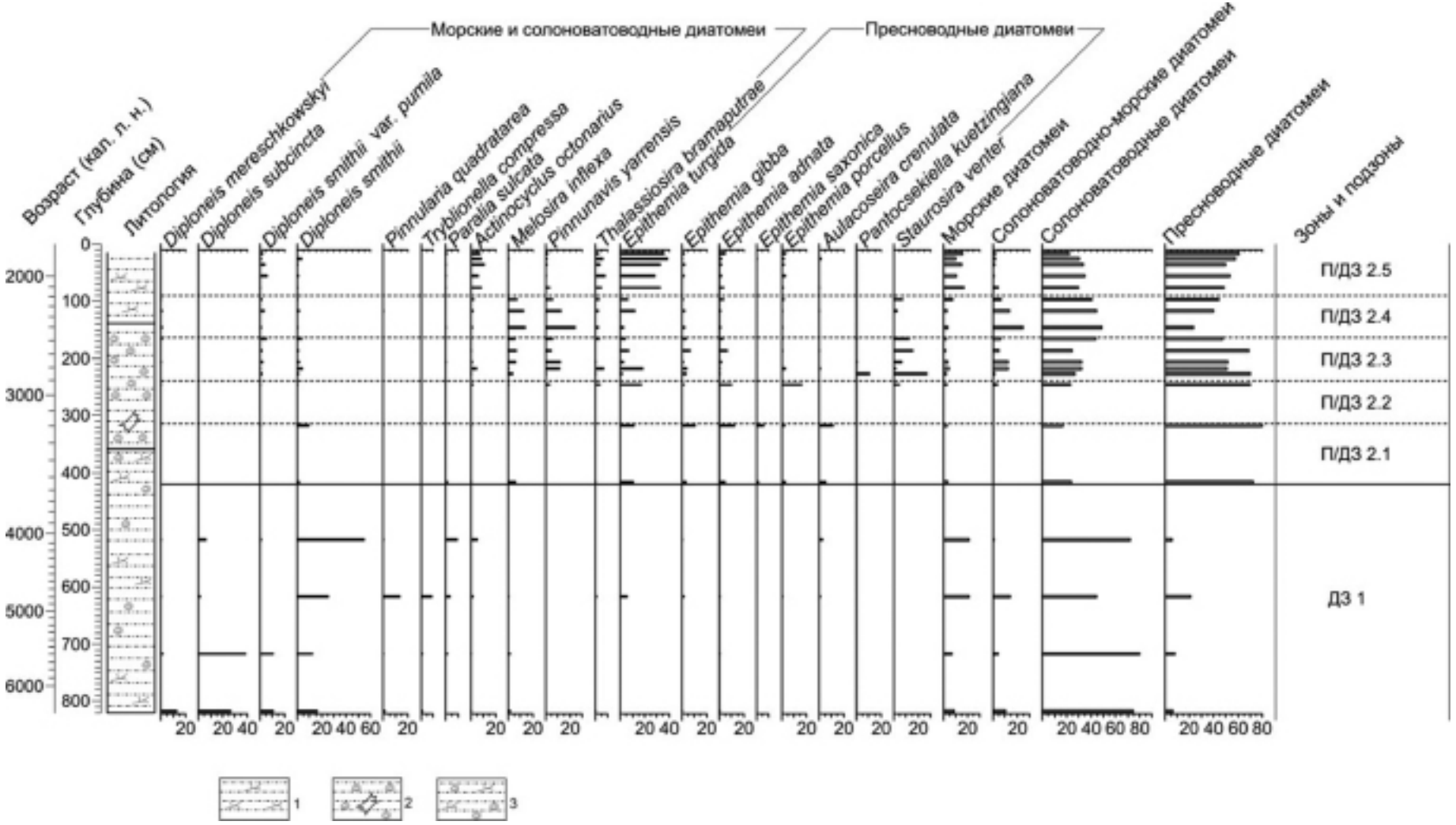


Рис. 3. Диаграмма результатов диатомового анализа из керна осадков оз. Зеркальное, показывающая процентное содержание и распределение основных таксонов диатомовых водорослей и экологических групп. Условные обозначения: 1 (0–140 см) – алеврит с растениями; 2 (140–420 см) – горизонтально слоистый алеврит с раковинами моллюсков и фрагментами древесины; 3 (420–820 см) – алеврит с раковинами моллюсков и фрагментами ветвей кустарников.

Fig. 3. Diagram of the diatom data from the sedimentary core of the Zerkalnoye Lake, showing the percentage content and distribution of the main taxa of diatoms and ecological groups. Legend: 1 (0–140 cm) – silt with plants; 2 (140–420 cm) – horizontally layered silt with mollusk shells and wood fragments; 3 (420–820 cm) – silt with mollusk shells and fragments of shrub branches.

ковариационной матрицы, который позволяет выделить факторы, оказывавшие наибольшее влияние на пространственно-временное распределение микрофоссилий по разрезу. Статистический анализ выполнялся с помощью программы PAST (Hammer et al., 2001). Исходными данными для PCA послужило распределение по колонке таксонов, содержание которых составляло более 2% хотя бы в одной пробе.

Из-за крайне низкого содержания и плохой сохранности створок диатомей в интервалах 0–16 см и 829–929 см провести качественный таксономический и статистический анализы не удалось.

ЗОНЫ ДИАТОМОВЫХ ВОДОРОСЛЕЙ ОЗЕРА ЗЕРКАЛЬНОЕ

В отложениях оз. Зеркального обнаружена богатая диатомовая флора, включающая 231 таксон. Из них 146 являются пресноводными, а 85 – отнесены к экологическим группам морских, солоноватоводно-морских и солоноватоводных форм. Соотношение представителей различных групп диатомей позволило выявить смену экологических условий, определить этапы развития озера в результате изменения климата и колебания уровня моря. На основании изменений численности видов и их экологических требований были выделены две зоны диатомовых водорослей: ДЗ 1 и ДЗ 2 (рис. 3).

Отложения зоны ДЗ 1 (820–420 см; 6350–3540 кал. л. н.) характеризуются низкой концентрацией створок диатомовых водорослей. В таксономическом составе преобладают бентосные виды *Diploneis smithii* (до 54%) и *D. subcincta* (до 38%), являющиеся морскими таксонами, обитающими на поверхности донных осадков. Доля пресноводных диатомовых водорослей составляет менее 10%.

Зона ДЗ 2 (420–16 см), включающая пять подзон, охватывает интервал 3540–1780 кал. л. н., и указывает на трансформацию водоема в условиях снижения влияния моря. Подзоны отражают изменения степени влияния таких факторов как: приток морской воды через канал, соединяющий водоем и море; сильные прибрежные ветры, способные обеспечивать аэральный перенос морских видов диатомей в озеро.

В подзоне П/ДЗ 2.1 (420–314 см; 3540–3190 кал. л. н.) наблюдается наибольшее разнообразие пресноводных диатомей. Их содержание достигает 81%. Наиболее многочисленны пресноводные планктонные виды *Aulacoseira crenulata* (до 11%), эпифитные виды *Epithemia adnata* (до 12%), *E. gibba* и *E. turgida* (оба вида до 10%).

В комплексе подзоны П/ДЗ 2.2 (314–240 см; 3190–2900 кал. л. н.) наиболее многочисленны эпифитные виды *Epithemia turgida* (до 18%), *E. porcellus* (до 15%) и *E. adnata* (до 9%). Сравнительно высокий процент имеет донный морской вид *Pinnunavis yarrensis* (до 11%).

Для подзоны П/ДЗ 2.3 (240–164 см; 2900–2580 кал. л. н.) характерно доминирование холодноводных видов диатомей (*Staurosira venter* – 15% и др.).

Отличительной особенностью подзоны П/ДЗ 2.4 (164–90 см; 2580–2190 кал. л. н.) является преобладание морского вида *Pinnunavis yarrensis* (до 24%) и солоноватоводного *Melosira inflexa* (до 14%). Оба таксона широко распространены в прибрежных водах. Разнообразие галофильных видов (включая морские таксоны) достигает 75%.

В зоне П/ДЗ 2.5 (90–16 см; 2190–780 кал. л. н.) доминирует *Epithemia turgida* (до 39%). Из других относительно многочисленных видов следует отметить морской *Actinocyclus octonarius* (до 11%).

РЕЗУЛЬТАТЫ ОРДИНАЦИИ ДИАТОМОВЫХ ДАННЫХ МЕТОДОМ ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ (PCA)

Вклад каждой из четырех выбранных главных компонент (собственных значений осей PC) составил: PC 1 — 40,15%, PC 2 — 22,36%, PC 3 — 13,24% и PC 4 — 7,41% (рис. 4). Для максимально информативной PC 1 (рис. 4) самые высокие положительные нагрузки имеют морские сублиторальные *Diploneis smithii* (0,585) и *D. subcincta* (0,362), а самую низкую пресноводный обрастатель *Epithemia turgida* (−0,666). Вид *D. smithii* отмечен с высокой нагрузкой и для PC 2 — 0,561, в то время как *E. turgida* в данном случае приобретает положительное значение — 0,550. В группу диатомей с положительными нагрузками по этой компоненте вошел и морской планктонный *Actinocyclus octonarius* (0,186). Самые низкие нагрузки для PC 2 имеют пресноводная, относительно холодноводная *Staurosira venter* (−0,342) и морской эвригалинный представитель бентоса — *Pinnunavis yarrensis* (−0,274), часто встречающийся в субтропических и тропических прибрежных экосистемах (Lobban, 2015). Для PC 3 положительные нагрузки зафиксированы у *D. subcincta* (0,789) и морфологических вариететов: *D. smithii* var. *pumila* (0,263) и *D. smithii* var. *rhombica* (0,153), в то время как сам номинативный вид *Diploneis smithii* имеет минимальную нагрузку (−0,435). Компонента PC 4 поддерживается *P. yarrensis* (0,656) и морскими сублиторальными видами: *Melosira moniliformis* (0,304), *Melosira inflexa* (0,190) и *Achnanthes brevipes* var. *intermedia* (0,186), а замыкает группу с отрицательными значениями — *Staurosira venter* (−0,539).

Самые высокие значения PC 1 отмечены для комплекса зоны ДЗ 1 (рис. 4). Выше по разрезу

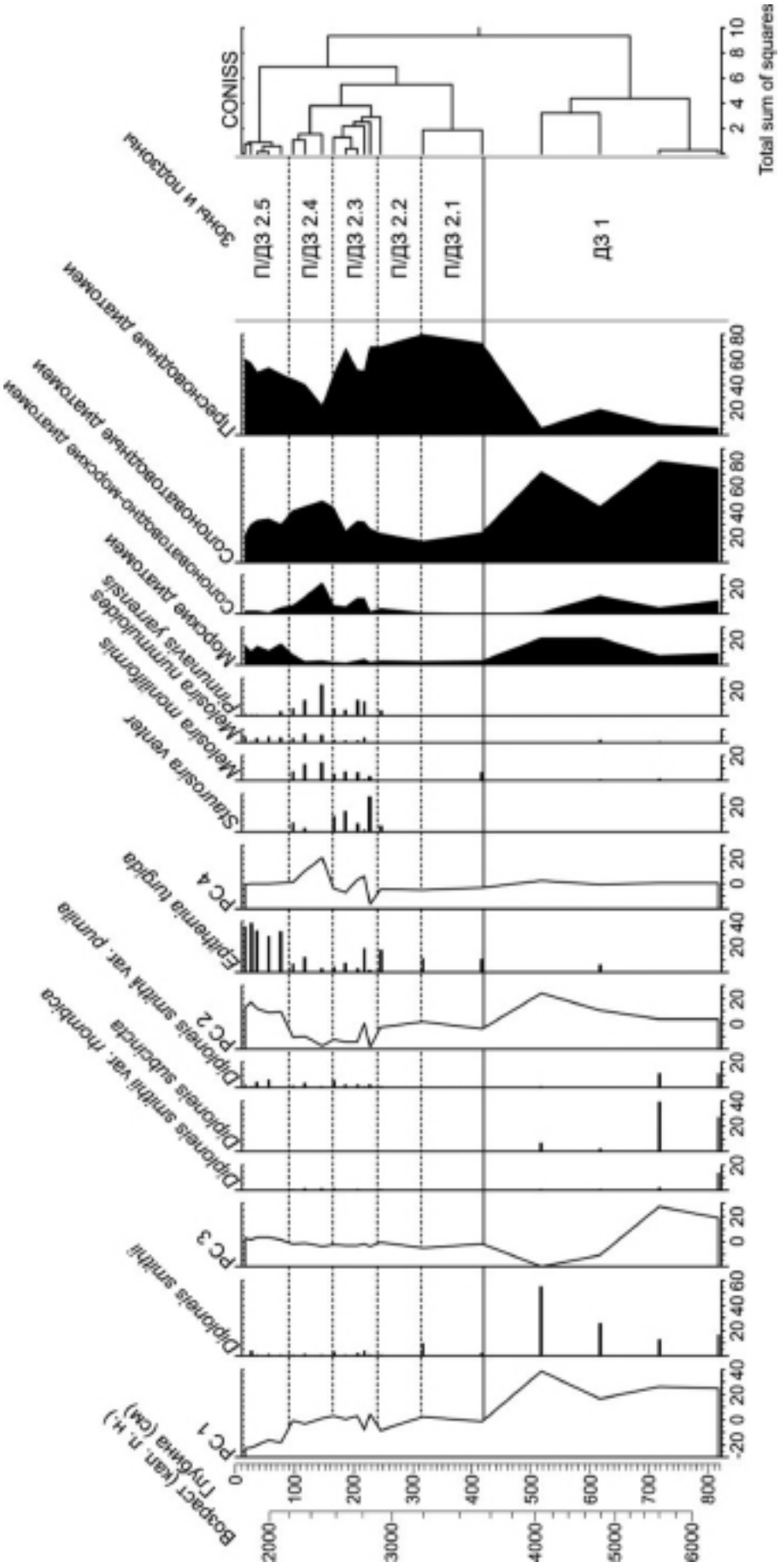


Рис. 4. Распределение нагрузок диатомей по четырем главным компонентам (PC 1–4) и таксонов с экстремальными значениями для выделенных с помощью CONISS диатомовых зон и подзон.

Fig. 4. Diatom loading distribution along the first four principal components (PC 1–4) and taxa with extreme loading values for the diatom zones and subzones identified by CONISS.

значения этой компоненты постепенно снижаются до минимальных в верхней подзоне П/ДЗ 2.5. Максимальные показатели РС 2 зафиксированы в верхней части ДЗ 1 и подзоне П/ДЗ 2.5. Компонента РС 3 имеет высокие значения в нижней части зоны ДЗ 1 и минимальные — в ее верхней части. Показатели РС 4 распределены по разрезу относительно равномерно и имеют всего два пика — в подзонах П/ДЗ 2.3 и П/ДЗ 2.4.

ИСТОРИЯ ОЗЕРА ЗЕРКАЛЬНОЕ

Доминирование алеврита в отложениях оз. Зеркального свидетельствует о том, что осадконакопление большую часть времени существования водоема происходило в низкоэнергетической среде. Это наиболее ярко проявилось в интервале 860–0 см (рис. 3), отложения которого представлены горизонтально-слоистым алевритом. Здесь обнаружены остатки водных растений, развивавшихся на мелководье, и раковин моллюсков. Переход к этому низкоэнергетическому режиму от более высокоэнергетических условий осадконакопления устанавливается по присутствию в алевритах слабо окатанной гальки на глубине 860–908 см и по появлению среднезернистого песка, дресвы и щебня в интервале 908–929 см.

Комплекс диатомей зоны ДЗ 1 свидетельствует о том, что на начальном этапе своего формирования водоем представлял собой мелководный залив или прибрежную лагуну. Встречающиеся в этой зоне створки грубопанцирных бентосных диатомей (например, *Diploneis smithii*, *D. subcincta*) отражают их поступление из сублиторальной зоны моря с активной волновой динамикой. Именно здесь показатели компоненты РС 1 (рис. 4), определяемые высокими нагрузками этих двух видов, достигают максимума (до 38.743). Кроме того, диатомовый комплекс ДЗ 1 включает представителей различных биотопов (морских, речных, ручьевых), что могло быть связано с поступлением в водоем как морских, так и аллохтонных пресноводных компонентов.

Образование оз. Зеркальное в среднем голоцене согласуется с выводами о том, что уровень моря около 6700 кал. л. н. превышал современный на 2–3 м. Море проникало вглубь суши на 1–1,5 км, образуя многочисленные мелководные заливы и лагуны (Короткий, Вострецов, 2002). Высокий уровень моря в оптимум голоцена был установлен во многих регионах (Lambeck et al., 2014). При этом амплитуда глобального повышения уровня моря в течение 9000–4500 кал. л. н. в различных регионах колебалась от менее 1 до 6 м (Mann et al., 2019; Wang et al., 2020). Полагают, что побережье Южного Приморья в течение среднего и позднего голоцена было тектонически стабильным (Кулаков, 1973; Кузьмина и др., 1987), и локальные изменения прибрежных ландшафтов, включая оз. Зеркальное, отражали прежде всего колебания уровня моря, а не тектоническую активность.

Постепенное снижение регионального уровня моря началось после 6700 кал. л. н. (Короткий, Вострецов, 2002). Данные диатомового анализа отложений оз. Зеркальное показали, что как пресноводный водоем оно сформировалось около 3540 кал. л. н.

В интервале 3540–3190 кал. л. н. (подзона П/ДЗ 2.1) влияние моря было наименьшим в истории оз. Зеркальное. Именно для этого времени отмечено самое высокое видовое разнообразие пресноводных форм (до 81% от общего количества идентифицированных таксонов) и снижение значений компоненты РС 1, определяемой морскими, сублиторальными таксонами (рис. 4).

Участие сублиторальных морских таксонов (менее 11%) в подзоне П/ДЗ 2.2 может указывать на существование протоки, соединявшей водоем с морем. Для нижней части интервала этой подзоны (рис. 4) отмечено некоторое увеличение значений компоненты РС 2 (1.8342). В этот период береговая линия моря, вероятно, располагалась ближе к озеру, чем в настоящее время.

Около 2900 кал. л. н. (подзона П/ДЗ 2.3) влияние моря на оз. Зеркальное уменьшилось, что может свидетельствовать о смещении береговой линии дальше от водоема. Доминирование холодноводных видов, таких как, например, *Staurosira venter* – таксона, характерного для относительно холодных озер в лесной зоне и высокогорьях (Cantonati et al., 2021; Michelutti et al., 2001; Paull et al., 2008), предполагает снижение температур. Вместе с тем реакция отдельных таксонов, в том числе *S. venter*, а также некоторых солоноватоводно-морских видов (например, *Melosira inflexa*) не остается постоянной, что нашло отражение в изменениях значений компонент РС 1, РС 2 и РС 4 (рис. 4). По всей видимости, это отражает высокую динамику относительно краткосрочных изменений палеогеографических обстановок. Наиболее низкие температуры наблюдались около 2500 кал. л. н. Аналогичное похолодание установлено для многих районов Южного Приморья (Лящевская и др., 2017; Разжигаева и др., 2020; Razjigaeva et al., 2018, 2019). Наблюдавшееся в это время понижение уровня Японского моря (на 0,8–1,5 м ниже современного) вызывало на юге Приморья активное заполнение лагун и заливов терригенными осадками. Аллювиальные дельты активно расширялись в сторону моря. В устьях рек образовывались острова (Короткий, Вострецов, 2002).

Влияние моря продолжало снижаться до начала подзоны П/ДЗ 2.4 (2580 кал. л. н.),

береговая линия смещалась в мористом направлении. Однако, во время формирования комплекса подзоны П/ДЗ 2.4 морские воды вновь начали проникать в озеро Зеркальное через существовавшую протоку. Эта ситуация нашла отражение в пиковых значениях РС 4 (до 20.481), определяемых высокими нагрузками морских таксонов (рис. 4).

В подзоне П/ДЗ 2.5 (2190–1780 кал. л. н.) оз. Зеркальное приобретает современные характеристики пресноводного водоема, в который морская вода проникает через протоку лишь во время приливов и нагонных штормов. Соленость уменьшается от основания интервала к его верхней границе, что отражено в снижении доли солоноватоводных видов диатомей с 10% в нижней части слоя до 5% у его кровли. И высокие значения компоненты РС 2 (до 16.847), которая определяется положительными нагрузками пресноводного эпифита – *Epithemia turgida*, служит подтверждением этого вывода.

Около 2000 кал. л. н. уровень моря понизился, но оставался выше современного на 0,8–1,2 м. Этот процесс сопровождался осушением мелководных заливов и болот и активным накоплением осадков вдоль побережья (Короткий, Вострецов, 2002).

Время формирования этого диатомового комплекса совпадает с кратковременными климатическими колебаниями, установленными на юго-востоке Приморья между 1865 и 1653 кал. л. н. Климатические условия в тот период были несколько теплее и влажнее, чем в настоящее время (Микишин и др., 2024; Микишин, Гвоздева, 2014).

Поскольку оз. Зеркальное находится на побережье Японского моря, нельзя исключить аэрального заноса морских брызг, особенно в период действия летнего муссона. Кроме того, морские диатомовые водоросли могли попадать в водоем с мигрирующими лососевым рыбам, перемещающимся из моря в озеро через протоку. Высокое содержание планктонного вида *Actinocyclus octonarius* может указывать также на локальное сокращение морской мелководной зоны: уменьшение расстояния до литоральной/сублиторальной границы и, как результат, поступление через канал морских вод с больших глубин. Возможно, в это время в бухте Зеркальная изобата резкого нарастания глубин располагалась ближе к побережью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение реакции диатомовых водорослей в отложениях оз. Зеркальное (Южное Приморье), прежде всего на колебания климата и уровня моря в голоцене, позволило установить основные этапы эволюции озерной экосистемы.

- *Возникновение водоема в период трансгрессии голоценового оптимума.* Доминирование морских и солоноватоводных таксонов в нижней части изученной колонки свидетельствует о возникновении водоема в условиях высокого стояния уровня моря. Согласно полученным данным радиоуглеродного датирования, озерная экосистема непрерывно развивалась на протяжении последних 8100 лет.

- *Отражение динамики условий среды в сукцессионных рядах.* Выделенные локальные зоны и подзоны отражают последовательную смену диатомовых сообществ в среднем и позднем голоцене. Трансформация экологической структуры диатомовых комплексов определялась переменным влиянием моря на экосистему. Этот фактор зависел от колебаний уровня моря, интенсивности интрузий морских вод через протоку, а также от аэрального заноса морских видов прибрежными ветрами в периоды летнего муссона.

- *Переход к пресноводной стадии развития около 3540 кал. л. н.* Рост обилия и разнообразия пресноводных таксонов ознаменовал изоляцию бассейна. Высокое видовое разнообразие пресноводных форм в интервале 3540–3190 кал. л. н. свидетельствует о том, что на данном этапе влияние моря на гидрологический режим водоема было минимальным за всю его историю.

- *Регистрация регионального похолодания в позднем голоцене.* Доминирование в отложениях на глубине 164–240 см холодноводных видов диатомей (таких как *Staurosira venter*), при незначительном участии морских таксонов указывает на формирование диатомовых сообществ в условиях похолодания около 2900–2580 кал. л. н. и свидетельствует о слабой связи водоема с морем в этот период.

- *Объективизация палеореконструкций методами многомерной статистики.* Применение метода главных компонент послужило надежным инструментом верификации качественных выводов. Выделенные главные компоненты (РС 1–4), определяемые высокими нагрузками морских и пресноводных таксонов, эффективно отражают ситуационную картину существования водоема на определенных этапах его эволюции, а также отклик альгофлоры на совместное влияние морских и континентальных факторов.

- *Региональное значение полученных результатов.* Анализ диатомовых сукцессий в надежно датированных отложениях озера Зеркальное определяет вектор дальнейших исследований прибрежных водоемов Дальнего Востока. Результаты важны для высокоразрешающих палеогеографических реконструкций и корреляции голоценовых событий Южного Приморья с сопредельными территориями.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы признательны Ю.А. Корзун за помощь в подготовке публикации.

Работа выполнена в рамках тем госзаданий Минобрнауки: СВКНИИ ДВО РАН – № 121031700311, ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН – № 124012200182-1, ТИГ ДВО РАН – № 125021302113-3. Отбор керна проводился при частичной финансовой поддержке Национального фонда фундаментальных исследований США (долгосрочный договор 2008–2015 гг.)

ЛИТЕРАТУРА

Баринова С. С., Медведева Л. А., Анисимова О. В. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: Русское издательство “Pilies Studio”, 2006. 498 с.

Короткий А. М., Вострецов Ю. Е. Особенности развития природной среды в позднем вюрме-голоцене в нижнем течении реки Аввакумовки и сопредельных территориях / В сб. Андреева Ж.В. (отв. ред.) Синие Скалы – археологический комплекс: опыт описания многослойного памятника. Ч. 1. Гл. 3. Владивосток: Дальнаука, 2002. С. 45–72.

Кузьмина Н. Н., Шумова Г. М., Полякова Е. И., Недешева Г. Н. Палеогеографическая реконструкция северо-западного побережья и шельфа Японского моря // Известия АН СССР. Серия географическая. 1987. № 4. С. 78–89.

Кулаков А. П. Четвертичные береговые линии Охотского и Японского морей / Г.И. Худяков (ред.). Новосибирск: Наука, 1973. 187 с.

Лящевская М. С., Пшеничникова Н. Ф., Макарова Т. Р. Реакция растительности на климатические изменения в среднем-позднем голоцене (на примере участка побережья Юго-Восточного Приморья) // Успехи современного естествознания. 2017. № 12. С. 184–194.

Микишин Ю. А., Гвоздева И. Г., Элбакидзе Е. А. Морское осадконакопление на побережье юго-западной окраины Приморья в среднем голоцене // Тихоокеанская геология. 2024. Т. 43, № 5. С. 39–53. DOI: 10.30911/0207-4028-2024-43-5-39-53

Микишин Ю. А., Гвоздева И. Г. Палеосреда острова Русский (Южное Приморье) в среднем-позднем голоцене // Фундаментальные исследования. 2014. № 3. С. 516–522.

Прошкина-Лавренко А. И. (глав. ред.). Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Т. 1. Ленинград: Наука, 1974. 403 с.

Разжигаева Н. Г., Ганзей Л. А., Гребенникова Т. А., Корнюшенко Т. В., Ганзей К. С., Кудрявцева Е. П., Гридасова И. В., Клюев Н. А., Прокопец С. Д. Соотношение природных и антропогенных факторов в развитии ландшафтов бассейна реки Раздольная, Приморье // Известия РАН. Сер. геогр. 2020. Т. 84, № 2. С. 246-258. DOI: 10.31857/S2587556620020119

Цой И. Б., Обрезкова М. С. Атлас диатомовых водорослей и силикофлагеллат голоценовых осадков морей Восточной Арктики России. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2017. 146 с.

Blaauw M., Christen J. A. Flexible paleoclimate age depth models using an autoregressive gamma process // Bayesian Analysis. 2011. Vol. 6. P. 457–474.

Cantonati M., Zorza R., Bertoli M., Pastorino P., Salvi G., Platania G., Prearo M., Pizzul E. Recent and subfossil diatom assemblages as indicators of environmental change (including fish introduction) in a high-mountain lake // Ecological Indicators. 2021. Vol. 125. 107603.

Grimm E. C. CONISS: a FORTRAN 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares // Comp. Geosci. 1987. Vol. 13. P. 13–35.

Hammer Ø., Harper D. A. T., Ryan P. D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis // Palaeontol. Electronica. 2001. Vol. 4. P. 1–9.

Hendey N. I. An Introductory Account of the Smaller Algae of British Coastal Waters. Part V: Bacillariophyceae (Diatoms). Fishery Investigations Series IV. London: Her Majesty’s Stationery Office, 1964. 317 p.

Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. 1 Teil: Naviculaceae / In: Ettl H., Gerloff H., Heynig D., Mollenhauer D. (eds). Süβwasserflora von Mitteleuropa. Band 2/1. Jena: VEB Gustav Fischer Verlag, 1986. 876 p.

Krammer K., Lange-Bertalott H. Bacillariophyceae. 2 Teil: Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae / In: Ettl H., Gerloff H., Heynig D., Mollenhauer D. (eds). Süβwasserflora von Mittleeuropa. Band 2/2. Stuttgart, New York: Gustav Fischer Verlag, 1988. 598 p.

Krammer K., Lange-Bertalott H. Bacillariophyceae. 3 Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae / In: Ettl H., Gerloff H., Heynig D., Mollenhauer D. (eds). Süβwasserflora von Mittleeuropa. Band 2/3. Stuttgart, Jena: Gustav Fischer Verlag, 1991. 576 p.

Lambeck K., Rouby H., Purcell A., Sun Y., Sambridge M. Sea level and global ice volumes from the last glacial maximum to the Holocene. Proceedings of the National Academy of Sciences United States of America. 2014. Vol. 111. P. 15296–15303.

Lobban, C. S., Benthic marine diatom flora of Guam: new records, redescription of Psammodictyon pustulatum n. comb., n. stat., and three new species (*Colliculoamphora gabgabensis, Lauderia excentrica,* and *Rhoiconeis pagoensis*) // Micronesica, 2015. 49 p.

Lozhkin A. V., Anderson P. M., Brown T. A., Grebennikova T. A., Korzun J. A., Tsigankova,V. I. Lake development and vegetation history in coastal Primor’ye: implications for Holocene climate of the southeastern Russian Far East // Boreas. 2021. Vol. 50. P. 983–997.

Mann T., Bender M., Lorscheid T., Stocchi P., Vacchi M., Switzer A. D., Rovere A. Holocene sea levels in southeast Asia, Maldives, India and Sri Lanka: The SEAMIS database // Quaternary Science Reviews. 2019. Vol. 219. P. 112–125.

Michelutti N., Laing T. E., Smol J. P. Diatom assessment of past environmental changes in lakes located near the Noril’sk (Siberia) smelters // Water Air & Soil Pollution. 2001. Vol. 125. P. 231–241.

Paull T. M., Hamilton P. B., Gajewski K., LeBlanc M. Numerical analysis of small arctic diatoms (Bacillariophyceae) representing the *Staurosira* and *Staurosirella* species complexes // Phycologia. 2008. Vol. 47. P. 213–224.

Razjigaeva N. G., Ganzey L. A., Grebennikova T. A., Mokhova L. M., Kudryavtseva E. P., Arslanov Kh. A., Maksimov F. E., Starikova A. A. Landscape and

environmental changes along the Eastern Primorye coast during the middle to late Holocene and human effects // Journal of Asian Earth Sciences. 2018. Vol. 158. P. 160–172.

Razjigaeva N. G., Ganzey L. A., Lyaschevskaya M. S., Makarova T. R., Kudryavtseva E. P., Grebennikova T. A., Panichev A. M., Arslanov Kh. A., Maksimov F. E., Petrov A. Yu., Malkov S. S. Climatic and human impacts on landscape development of the Murav'ev Amursky Peninsula (Russian South far East) in the Middle/Late Holocene and historical time // Quaternary International. 2019. Vol. 516. P. 127–140.

Stuiver M., Reimer P. J. Extended ^{14}C data base and revised CALIB 3.0 ^{14}C age calibration program // Radiocarbon. 1993. Vol. 3. P. 215-230.

Wang F., Zong Y., Mauz B., Li J., Fang J., Tian L., Chen Y., Shang Z., Jiang X., Spada G., Melini D. Holocene sea-level change on the central coast of Bohai Bay, China // Earth Surface Dynamics. 2020. Vol. 8. P. 679–693.

Witkowski A., Lange-Bertalot H., Metzeltin D. Diatom flora of marine coasts I / In: Lange-Bertalot H. (ed.). Iconographia Diatomologica. Annotated Diatom Micrographs. Königstein: A.R.G. Gantner Verlag, 2000. 725 p.

Wright H. E., Mann D. H., Glaser P. H. Piston corers for peat and lake sediments // Ecology. 1984. Vol. 65. P. 657–659.

Поступила в редакцию 22.08.2026.
Поступила после доработки 11.09.2026.

DIATOM SUCCESSIONS IN THE ZERKALNOYE LAKE (Southern Primorye) IN THE HOLOCENE

A. V. Lozhkin[1], M. V. Cherepanova[2], P. M. Anderson[3], T. A. Grebennikova[4], V. I. Tsygankova[1]

[1]North-East Interdisciplinary Research Institute n. a. N. A. Shilo, FEB RAS, Magadan, Russia
[2]Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, FEB RAS, Vladivostok, Russia
[3]University of Washington, Department of Earth and Space Sciences and Quaternary Research Center, Seattle, WA, USA
[4]Pacific Geographical Institute, FEB FEB RAS, Vladivostok, Russia

Zerkalnoye Lake, located on the southeastern slope of the Sikhote-Alin Mountains, was chosen to reconstruct the natural environment in the coastal zone of Southern Primorye during the Holocene based on diatom analysis data and to study changes in environmental conditions in the region's lakes. The ratio of diatoms of various ecological groups (marine and freshwater, benthic and planktonic) in lake sediments determines the stages of the reservoir's development, caused by climate and sea level fluctuations. Based on changes in species abundance and the ecological structure of diatom assemblages, two diatom zones were established: DZ 1 and DZ 2. The diatom assemblage of the DZ 1 zone (6,350–3,540 cal yr BP) indicates that the Zerkalnoye Lake formed as a relatively shallow bay or coastal lagoon. Diatom successions in the DZ 2 zone (3,540–1,780 cal yr BP) indicate a decline in marine influence and the formation of a freshwater lake. The subzones identified in the DZ 2 zone reflect the changing influence of the sea on the freshwater basin. Diatom analysis data indicate a cooling of the climate in the interval 2,900–2,580 cal yr BP. Although currently fresh, the Zerkalnoye Lake may experience marine influence due to seawater influx through a connecting channel, as well as the aeolian transport of sea spray during strong coastal winds.

***Keywords*: diatom analysis, radiocarbon dating, Holocene, paleoecological reconstructions, sea level fluctuations, climate fluctuations, Southern Primorye, Lake Zerkalnoye.**

REFERENCES

Barinova, S. S., Medvedeva, L. A., O. V. Anisimova, 2006. Diversity of Algal Indicators in Environmental Assessment. Tel Aviv: Russian publishing house "Pilies Studio", 2006. 498 p. [In Russian]

Blaauw, M., Christen, J. A., 2011. Flexible paleoclimate age depth models using an autoregressive gamma process, *Bayesian Analysis.* 6(3), 457–474. DOI: 10.1214/ba/1339616472

Cantonati, M., Zorza, R., Bertoli, M., Pastorino, P., Salvi, G., Platania, G., Prearo, M., Pizzul, E., 2021. Recent and subfossil diatom assemblages as indicators of environmental change (including fish introduction) in a high-mountain lake, *Ecological Indicators.* 125, 107603. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107603

Grimm, E. C. CONISS: a FORTRAN 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares // Comp. Geosci. 1987. Vol. 13. P. 13–35.

Hammer, Ø., Harper, D. A. T., Ryan, P. D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis // Palaeontol. Electronica. 2001. Vol. 4. P. 1–9.

Hendey, N. I., 1964. An Introductory Account of the Smaller Algae of British Coastal Waters. Part V: Bacillariophyceae (Diatoms). Fishery Investigations Series IV. London: Her Majesty's Stationery Office.

Korotky, A. M., Vostretsov, Y. E., 2002. Features of the development of the natural environment in the Late Wurm-Holocene in the lower reaches of the Avvakumovka River and adjacent territories, *Sinie Skaly – arkheologicheskiy kompleks: Opyt opisaniya mnogosloynogo pamyatnika.* Vladivostok, Dalnauka, 45–72 [In Russian]

Krammer, K., Lange-Bertalot, H., 1986. Bacillariophyceae. 1 Teil: Naviculaceae, *Süßwasserflora von Mitteleuropa. Band 2/1.* Jena: VEB Gustav Fischer Verlag.

Krammer, K., Lange-Bertalott, H., 1988. Bacillariophyceae. 2 Teil: Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae, *Süßwasserflora von Mittleeuropa. Band 2/2.* Stuttgart, New York: Gustav Fischer Verlag.

Krammer, K., Lange-Bertalott, H. 1991. Bacillariophyceae. 3 Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae, *Süßwasserflora von Mittleeuropa. Band 2/3.* Stuttgart, Jena: Gustav Fischer Verlag.

*Kulakov, A. P.,*1973. Quaternary Coastlines of the Okhotsk and Japan Seas. Novosibirsk, Nauka [In Russian]

Kuzmina, N. N., Shumova, G. M., Polyakova, E. I., Nedesheva G. N., 1987. Paleogeographic reconstruction of the northwestern coast and shelf of the Sea of Japan, *Izvestiya AN USSR Geographical Series*. 4, 78–89 [In Russian]

Lambeck, K., Rouby, H., Purcell, A., Sun, Y., Sambridge, M., 2014. Sea level and global ice volumes from the last glacial maximum to the Holocene, *Proceedings of the National Academy of Sciences United States of America.* 111(43), 15296–15303. DOI: 10.1073/pnas.1411762111

Lobban, C. S., 2015. Benthic marine diatom flora of Guam: new records, redescription of Psammodictyon pustulatum n. comb., n. stat., and three new species (*Colliculoamphora gabgabensis, Lauderia excentrica,* and *Rhoiconeis pagoensis*), *Micronesica*, 49 p.

Lozhkin, A. V., Anderson, P. M., Brown, T. A., Grebennikova, T. A., Korzun, J. A., Tsigankova, V. I., 2021. Lake development and vegetation history in coastal Primor'ye: implications for Holocene climate of the southeastern Russian Far East, *Boreas*. 50, 983–997. DOI: 10.1111/bor.1247

Lyashchevskaya, M. S., Pshenichnikova, N. F., Makarova, T. R., 2017. Reaction of vegetation to climatic changes in Middle-Late Holocene (the example of a coastal site in South-East Primorye), *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 12, 184–194 [In Russian]

Mann, T., Bender, M., Lorscheid, T., Stocchi, P., Vacchi, M., Switzer, A. D., Rovere, A., 2019. Holocene sea levels in southeast Asia, Maldives, India and Sri Lanka: The SEAMIS database, *Quaternary Science Reviews.* 219, 112–125. DOI: 10.1016/j.quascirev.2019.07.007

Michelutti, N., Laing, T. E., Smol, J. P., 2001. Diatom assessment of past environmental changes in lakes located near the Noril'sk (Siberia) smelters, *Water Air & Soil Pollution*. 125, 231–241. DOI: 10.1023/A:1005274007405

Mikishin, Y. A., Gvozdeva, I. G., Elbakidze, E. A., 2024. Middle Holocene marine sedimentation on the southwestern coastal margin in Primorye, Russia, *Russian Journal of Pacific Geology.* 43(5), 39–53[In Russian]. DOI: 10.30911/0207-4028-2024-43-5-39-53.

Mikishin, Yu. A., Gvozdeva, I. G., 2014. Paleoenvironment of Russian Island (southern Primorye) in the middle-late Holocene, *Fundamental'nye issledovaniya*. 3(3), 516–522 [In Russian].

Paull, T. M., Hamilton, P. B., Gajewski, K., LeBlanc, M., 2008. Numerical analysis of small arctic diatoms (Bacillariophyceae) representing the *Staurosira* and *Staurosirella* species complexes, *Phycologia*. 47(2), 213–224. DOI: 10.2216/07-17.1

Proshkina-Lavrenko, A. I. (red.), 1974. Diatom Algae of the USSR. Fossil and Modern. Leningrad, Nauka [In Russian]

Razjigaeva, N. G., Ganzey, L. A., Grebennikova, T. A., Mokhova, L. M., Kudryavtseva, E. P., Arslanov, Kh. A., Maksimov, F. E., Starikova, A. A., 2018. Landscape and environmental changes along the Eastern Primorye coast during the middle to late Holocene and human effects, *Journal of Asian Earth Sciences*. 158, 160–172. DOI: 10.1016/j.jseaes.2018.02.013

Razjigaeva, N. G., Ganzey, L. A., Lyaschevskaya, M. S., Makarova, T. R., Kudryavtseva, E. P., Grebennikova, T. A., Panichev, A. M., Arslanov, Kh. A., Maksimov, F. E., Petrov, A. Yu., Malkov, S. S., 2019. Climatic and human impacts on landscape development of the Murav'ev Amursky Peninsula (Russian South far East) in the Middle/Late Holocene and historical time, *Quaternary International.* 516, 127–140. DOI: 10.1016/j.quaint.2017.12.007

Razjigaeva, N. G., Ganzey, L. A., Grebennikova, T. A., Kornyushenko, T. V., Ganzey, K. S., Kudryavtseva, E. P., Gridasova, I. V., Klyuev, N. A., Prokopets, S. D., 2020. Interaction of natural and anthropogenic factors in landscape development of Razdolnaya River Basin, Primorye, *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya,* 84(2), 246–258 [In Russian] DOI: 10.31857/S2587556620020119

Stuiver, M., Reimer, P. J., 1993. Extended ^{14}C data base and revised CALIB 3.0 ^{14}C age calibration program, *Radiocarbon*. 3(1), 215-230. DOI: doi:10.1017/S0033822200013904

Tsoy, I. B., Obrezkova, M. S., 2017. Atlas of Diatom Algae and Silicoflagellates From Holocene Sediments of the Russian East Arctic Seas. Vladivostok: POI FEB RAS [In Russian]

Wang, F., Zong, Y., Mauz, B., Li, J., Fang, J., Tian, L., Chen, Y., Shang, Z., Jiang, X., Spada, G., Melini, D., 2020. Holocene sea-level change on the central coast of Bohai Bay, China, *Earth Surface Dynamics.* 8(3), 679–693. DOI: 10.5194/esurf-2020-21

Witkowski, A., Lange-Bertalot, H., Metzeltin, D., 2000. Diatom flora of marine coasts. *Iconographia Diatomologica. Annotated Diatom Micrographs.* Königstein: A.R.G. Gantner Verlag.

Wright, H. E., Mann, D. H., Glaser, P. H., 1984. Piston corers for peat and lake sediments, *Ecology*. 65, 657–659. DOI: 10.2307/1941430