

Научная статья  
УДК 561.26:551.89 (571.63)  
DOI: 10.31857/S0869769824050086  
EDN: HPFCNW

## Использование метода главных компонент при интерпретации данных диатомового анализа голоценовых осадков озера Птичье (Южное Приморье)

Е. А. Элбакидзе<sup>✉</sup>, А. В. Романова

*Екатерина Александровна Элбакидзе*  
младший научный сотрудник  
Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия  
ekato21@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0009-3241-4420>

*Александра Владимировна Романова*  
кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник  
Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия  
sandra\_ru@bk.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-2884-1197>

**Аннотация.** Проведен анализ диатомовой флоры в среднеголоценовых отложениях оз. Птичье, расположенного на южном побережье Приморья, методом главных компонент с целью выявления основных палеоэкологических факторов, влияющих на распределение видов. Многофакторный анализ матрицы содержания диатомовых видов, встречающихся в палеосообществах, позволил выделить 3 ведущие компоненты, на которые приходится 78% дисперсии, что свидетельствует о высокой результативности применения данного метода. Большая часть дисперсии (58%) объясняется первой компонентой, для которой высокие положительные нагрузки имеет бореальный неритический вид *Actinoptychus senarius* Ehrenberg (Ehrenberg). Результаты диатомового анализа с использованием метода главных компонент в сопоставлении с результатами литологического анализа позволили выявить закономерности изменения палеосообществ диатомовых водорослей в отложениях оз. Птичье в условиях завершающей стадии трансгрессии и последовавшей за ней регрессии в среднем голоцене.

**Ключевые слова:** диатомовые водоросли, PCA, метод главных компонент, Японское море, голоцен, Южное Приморье

**Для цитирования:** Элбакидзе Е.А., Романова А.В. Использование метода главных компонент при интерпретации данных диатомового анализа голоценовых осадков озера Птичье (Южное Приморье) // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 5. С. 124–135.  
<http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824050086>

**Благодарности.** Авторы выражают глубокую благодарность Ю.А. Микишину (Дальневосточный геологический институт ДВО РАН) за предоставленные образцы и обсуждение результатов,

М.В. Черепановой (Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН) за помощь и ценные советы в процессе работы.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания Дальневосточного геологического института ДВО РАН (тема № 122040800201-8).

Original article

# Data interpretation of principal component and diatom analyses of Holocene sediments from Ptichye Lake (Southern Primorye)

E. A. Elbakidze, A. V. Romanova

*Ekaterina A. Elbakidze*

Junior Researcher

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

ekato21@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0009-3241-4420>

*Alexandra V. Romanova*

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Senior Researcher

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

sandra\_ru@bk.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2884-1197>

**Abstract.** The diatom flora of the middle Holocene sediments from Ptichye Lake, located on the southern coast of Primorye, was studied through the principal component analysis to determine the main paleoecological factors affecting the species distribution. Multivariate analysis of the diatom taxa matrix enabled us to determine three principal components accounting for 78% of the variance, thus proving the analysis to be highly efficient. The first component explains the most variance (58%) and has high values associated with the Boreal neritic species of *Actinoptychus senarius* Ehrenberg (Ehrenberg). Comparing the results of diatom and principal component analyses, on the one hand, and lithological analysis, on the other hand, we identified the changes in diatom paleocommunities that occurred as transgression was being replaced by regression during the middle Holocene.

**Keywords:** diatoms, PCA, principal component analysis, Sea of Japan, golocene, Southern Primorye

**For citation:** Elbakidze E.A., Romanova A.V. Data interpretation of principal component and diatom analyses of Holocene sediments from Ptichye Lake (Southern Primorye) *Vestnik of the FEB RAS*. 2024;(5):124–135. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824050086>

**Acknowledgments.** The authors express their gratitude to Yuri A. Mikishin (Far East Geological Institute, FEB RAS) for providing samples and discussion of the results, Marina V. Cherepanova (Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, FEB RAS) for help and valuable advice during the work.

**Funding.** The work was carried out within the framework of the state assignment of the Far East Geological Institute, FEB RAS (subject № 122040800201-8).

## Введение

В последнее время для повышения объективности результатов интерпретаций данных при реконструкции условий осадконакопления широко применяются различные методы статистической обработки, позволяющие выявлять и количественно представлять

модели развития бассейнов формирования осадков с учетом взаимосвязей, определяющих их функционирование. Одним из наиболее эффективных и наиболее часто используемых методов является факторный анализ и его разновидность – метод главных компонент, или PCA (Principal Component Analysis), который, как и другие методы многомерного анализа, опирается на исследования корреляционной матрицы [1]. Метод главных компонент позволяет найти гипотетические переменные (компоненты), на которые приходится наибольшая часть дисперсии многомерных данных [2, 3]. Эти новые переменные являются линейными комбинациями исходных переменных. Другими словами, данный метод аппроксимирует  $n$ -размерное облако наблюдений до эллипсоида (тоже  $n$ -мерного), полуоси которого и будут являться будущими главными компонентами. И при проекции на такие оси (снижении размерности) сохраняется наибольшее количество информации.

Метод главных компонент широко используется в биоинформатике, нейробиологии, океанологии, геологии, существует ряд работ, посвященных его использованию для морфометрических исследований в микропалеонтологии, гораздо больше для экологических целей [4–10].

PCA становится особо актуальным при проведении палеогеографических исследований, поскольку указывает на доминирующие закономерности временной и пространственной изменчивости палеоиндикаторов среды и позволяет идентифицировать определенные климатические периоды [10, 11].

Осадки водоемов, находящихся в контактной зоне суши и моря, являются наиболее информативными объектами исследования для выявления особенностей трансгрессивно-регрессивных циклов в разных регионах. И здесь важную роль в предоставлении сведений о состоянии водоемов на определенных этапах этой ритмики играют диатомовые водоросли, чутко реагирующие на изменения таких экологических факторов, как соленость, глубина обитания, гидрологическая активность и др. Известно, что период среднего голоцена характеризовался не только максимальным потеплением, но и повышением уровня моря до 2–2,5 м [12–14], поэтому изменения в палеосообществах диатомей из осадков озера, расположенного на побережье моря, могут фиксировать смену состояний озерной экосистемы. Таким подходящим объектом для изучения трансгрессивно-регрессивных циклов является оз. Птичье (см. рис. 1). Это самое крупное солоноватое озеро в Хасанском районе и второе по величине в Приморском крае (глубины не превышают 1,5–2 м) [15]. Оно расположено в междуречье рек Болотная и Туманная. Водоем отделен от моря песчаной косой и сообщается с ним системой проток, благодаря чему вода в оз. Птичье имеет солоноватый вкус. Береговая линия сильно изрезанная и заболоченная, имеются два небольших островка и два больших залива. Во время половодий водоем обменивается водой с р. Туманная [15].

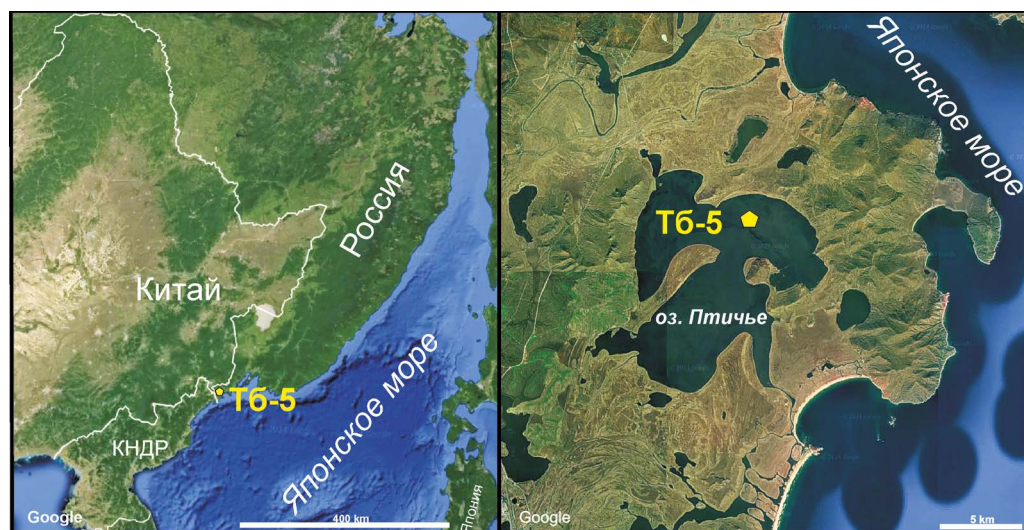


Рис. 1. Расположение изученной колонки Т6-5: оз. Птичье в Южном Приморье

Целью данной работы было проанализировать возможность применения метода главных компонент для интерпретации данных диатомового анализа среднеголоценовых отложений оз. Птичье, расположенного на южном побережье Приморского края.

## Материалы и методы

Материалом для исследования послужила колонка Т6-5 (42°31'37"N; 130°44'27"E, длина – 1350 см), пробуренная в северной части оз. Птичье (7,5 км от береговой линии) (рис. 1). Вскрытые отложения представлены синевато-черными глинами алевроито-пелитового состава и глинистыми песками (верхние 2,5 м) с включением раковин моллюсков.

Из осадков скважины методом диатомового анализа изучено 40 проб. Техническая обработка проводилась по стандартной методике с использованием перекиси водорода и обогащением тяжелой жидкостью с плотностью 2,6 [16]. Определение видового состава водорослей и подсчет створок в препарате проводили с помощью светового микроскопа ZEISS Axio Lab. A1 с иммерсионной жидкостью при увеличении  $\times 1000$ , а микрофотографирование створок – на микроскопе Carl Zeiss EVO 40 в Центре коллективного пользования Федерального научного центра биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН. Возрастная модель скважины, пробуренной в центральной части озера, была построена на основе данных радиоуглеродного датирования по раковинам моллюсков [17].

В осадках скважины встречены как целые створки диатомей, так и их обломки. В каждом изученном препарате с покровным стеклом  $18 \times 18$  мм, было подсчитано не менее 300 створок, для набора которых просмотрено от 1 до 17 горизонтальных рядов. Количество рядов использовано для оценки обилия диатомей в препарате. Для идентификации и таксономического положения видов диатомей использована программа AlgaeBase [18]. Эколого-географические характеристики таксонов взяты из монографии С.С. Бариновой с соавторами [19] и некоторых других публикаций [20–22].

Изученная диатомовая флора представлена 135 видами и внутривидовыми таксонами, но основой для PCA послужила таблица процентного содержания видов, которое превысило 2% хотя бы в одной пробе по разрезу. Таким образом, матрица включила 36 таксонов, встреченных в отложениях. Статистический анализ выполнялся с помощью программы PAST. Так как все проанализированные переменные имеют одни и те же единицы измерения, была использована матрица дисперсии-ковариации, которая позволила с помощью алгоритма сингулярного разло-

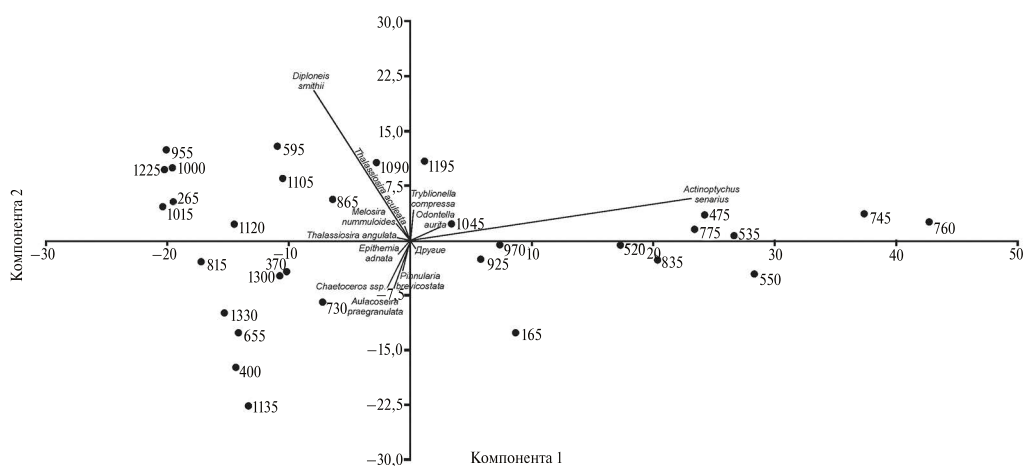


Рис. 2. Результаты анализа главных компонент (PCA), примененного к матрице процентного содержания диатомовых водорослей из голоценовых отложений оз. Птичье. Компонента 1 соответствует оси x, компонента 2 соответствует оси y

жения значений PCA найти ее собственные значения и векторы или компоненты. Собственные значения дают оценку дисперсии, приходящейся на соответствующие компоненты. Нагрузки описывают, какой вклад вносит таксон в определенную главную компоненту. Большая нагрузка указывает на то, что у таксона есть сильная связь с определенной главной компонентой.

### Результаты и обсуждение

В результате проведенного анализа были получены три главные компоненты, оказавшие наибольшее влияние на пространственно-временное распределение диатомей по разрезу. Суммарный вклад главных компонент составил 78% суммарной дисперсии для корреляционной матрицы. Первой, второй и третьей компоненте соответствуют 57, 12 и 9% вариаций соответственно (рис. 2).

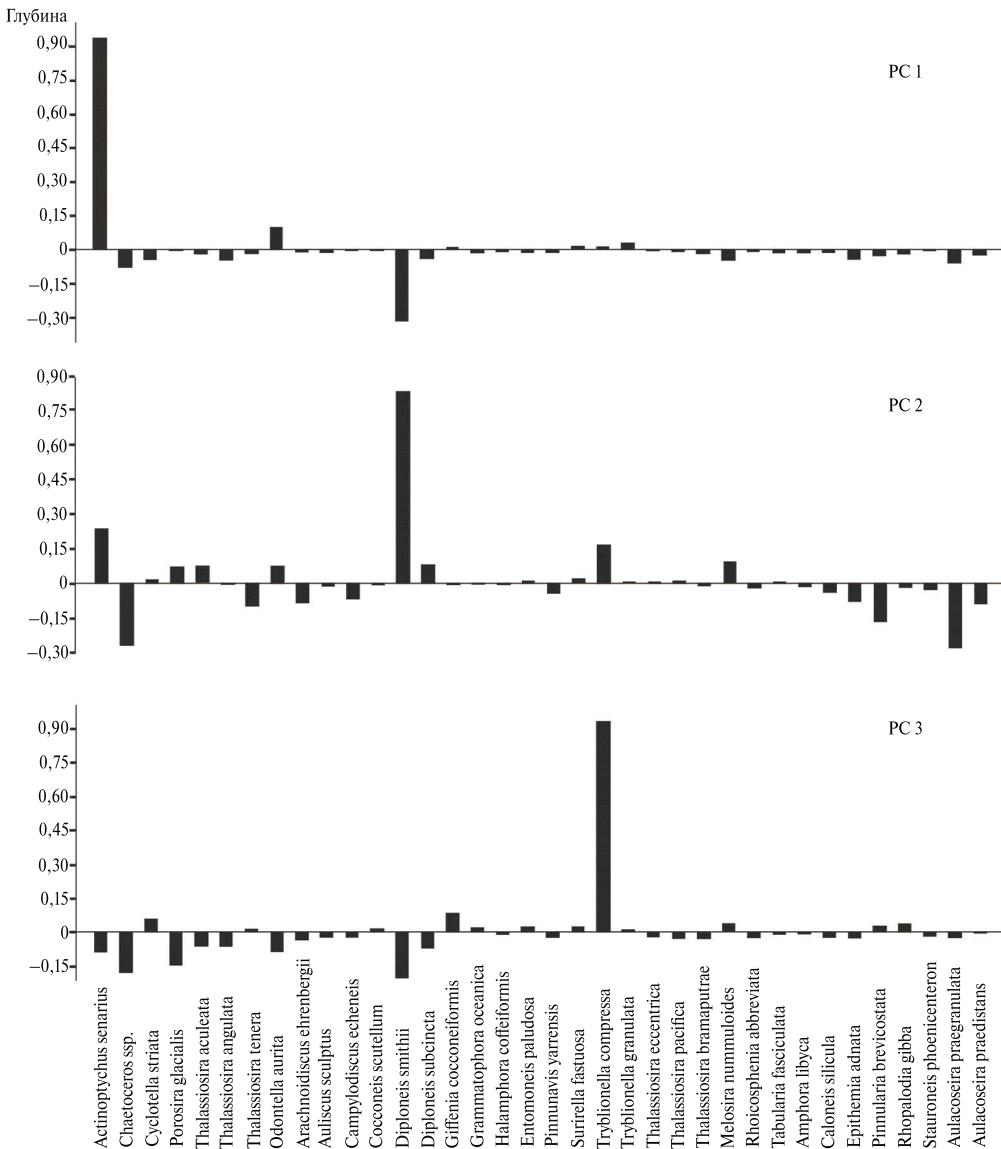


Рис. 3. Распределение нагрузок таксонов, полученных с помощью PCA для трех главных компонент

Максимальную информацию об изменчивости системы признаков несет первая главная компонента (рис. 3), для которой высокие положительные нагрузки имеет вид бореальный неритический *Actinoptychus senarius* Ehrenberg (Ehrenberg) – 0,931, предпочитающий хорошо прогреваемые прибрежные морские воды [23]. Высокую отрицательную нагрузку обеспечил морской сублиторальный бентический *Diploneis smithii* (Brébisson) Cleve (–0,318) (рис. 4).

Высокие положительные нагрузки для компоненты 2 определили *D. smithii* (0,825) и *Tryblionella compressa* (Bailey) Poulin (0,164). Эти виды относятся к эпипелитам, обитающим на илистых грунтах. Они предпочитают морские прибрежные воды, подвергающиеся приливно-отливному воздействию, при котором возможно изменение солености среды, а с повышением уровня воды увеличивается и соматическое давление на створки диатомей [21]. В группу с положительными нагрузками для PC-2 входит также планктонный сублиторальный вид *Odontella aurita* (Lyngbye) Agardh (0,096). Данный вид предпочитает прибрежные участки северных и дальневосточных морей России, а также опресненные бухты и эстуарии рек, впадающих в эти моря [20, 24], в то время как представители планктонных холодноводных спор рода *Chaetoceros* имеют высокие отрицательные нагрузки (–0,263). Данные значения второй компоненты, скорее всего, отражают состояние сообществ диатомовых водорослей, характерное для условий повышения уровня моря (рис. 5).

Высокие положительные нагрузки для компоненты 3 имеет морской сублиторальный бентосный вид *T. compressa* (0,928), в то время как морские неритические виды *Chaetoceros* ssp. (–0,176), *A. senarius* (–0,088), а также морской сублиторальный бентосный *D. smithii* (–0,198) и планктонный мезогалобный *O. aurita* (–0,084) имеют отрицательные нагрузки. Хотя вклад PC-3 был низким (9%), тем не менее эта компонента оказалась весьма информативной, поскольку бентосная *T. compressa* предпочитает прогреваемые морские мелководья. Можно

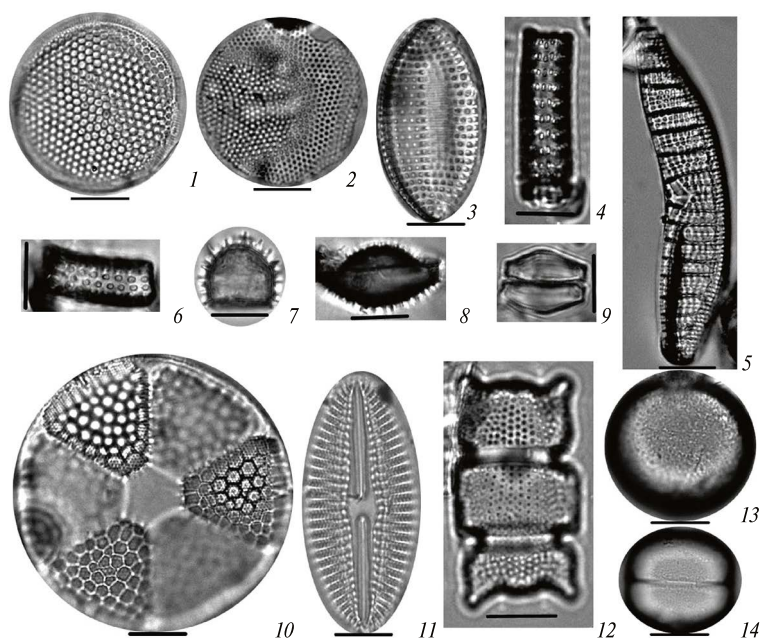


Рис. 4. Виды диатомей с высокими положительными нагрузками в результате PCA: 1 – *Thalassiosira angulata* (Gregory) Hasle; 2 – *Thalassiosira aculeata* Proshkina-Lavrenko; 3 – *Tryblionella compressa* (Bailey) Poulin; 4, 6 – *Aulacoseira praegr anulata* (Jousé) Simonsen; 5 – *Epithemia adnata* (Kützing) Brébisson; 7–9 – *Chaetoceros* ssp.; 10 – *Actinoptychus senarius* Ehrenberg (Ehrenberg); 11 – *Diploneis smithii* (Brébisson) Cleve; 12 – *Odontella aurita* (Lyngbye) Agardh; 13, 14 – *Melosira nummuloides* Agardh. Масштабная линейка – 10 мкм

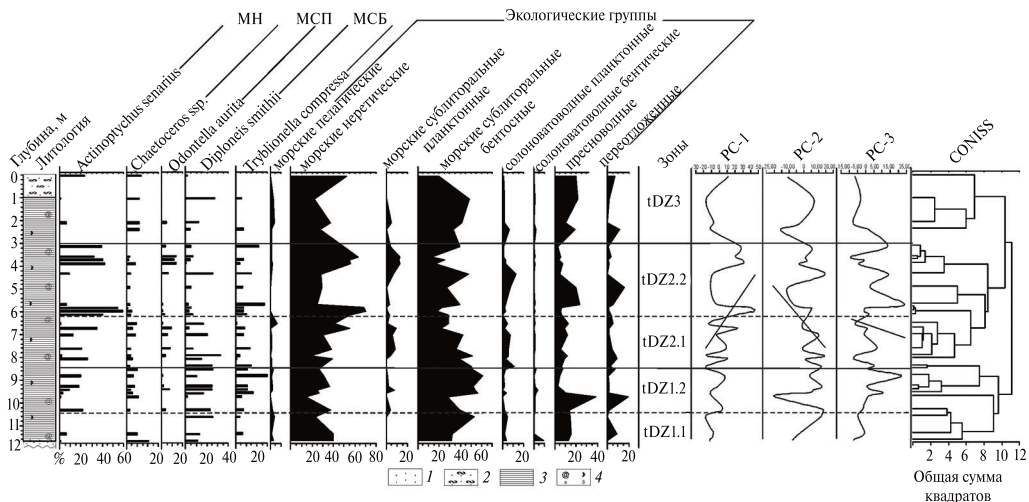


Рис. 5. Распределение представителей экологических групп, виды, имеющие значимые нагрузки по компонентам, и распределение собственных значений трех главных компонент с линией тренда, полученных по колонке Тб-5. Условные обозначения, литология: 1 – пески; 2 – пески мелкозернистые алевритовые; 3 – глина алевритопелитовая; 4 – раковины моллюсков (а) и их обломки (б). МН – морские неритические виды, МСП – морские sublittoralные планктонные, МСБ – морские sublittoralные бентосные

предположить, что третья компонента отражает условия, характерные для тепловодных прибрежных морских обстановок.

Полученные результаты PCA согласуются с данными диатомового и литологического анализов (рис. 5) [25, 26]. Для tDZ 1 (1330–1005 см) в целом характерны низкие собственные значения корреляционной матрицы первой компоненты (до –20), положительные значения второй и третьей варьируют от 1 до 20. В диатомовых палеосообществах зафиксировано преобладание sublittoralных таксонов (до 52,9%) с доминирующим видами *D. smithii* (до 25,4%) и *T. compressa* с процентным участием до 29,7%, которые по результатам PCA имеют максимальные положительные нагрузки для PC-2 и PC-3 соответственно. Осадки данной зоны представлены пелитовой фракцией.

Подзона tDZ 1.1 (1330–1190 см) характеризуется низкими собственными значениями PC-1 и PC-3 и относительно высокими значениями второй компоненты. Для осадков, охарактеризованных комплексом этой подзоны, отмечена самая высокая концентрация створок в изученных отложениях. Данная подзона характеризуется преобладанием sublittoralных таксонов (до 52,9%) с доминантом *D. smithii* (до 25,4%). Палеоэкологическая обстановка, существовавшая во время формирования подзоны tDZ 1.1 с доминированием группы sublittoralных бентосных диатомей, в которой наиболее разнообразен род *Diploneis*, а также присутствием холодноводных спор рода *Chaetoceros* из морской неритической группы, указывает на формирование осадков во время еще не самого высокого стояния уровня моря в период трансгрессии и более прохладного климата.

Подзона tDZ 1.2 (1190–1005 см) характеризуется все еще низкими собственными значениями PC-1 (от –20 до –2), но уже с появлением положительного пика этой компоненты (3), относительно высокими значениями PC-3 (до 20) и максимальными PC-2 (10). Именно в этой подзоне происходит резкий рост видового богатства (49 таксонов) и численности отдельных представителей пресноводной группы (до 38,2%). Еще одним признаком подзоны является увеличение обилия переотложенных видов (до 19,3%), что свидетельствует об интенсивности разливов р. Туманная. В экологической структуре диатомовых палеосообществ происходили изменения – в доминирующей sublittoralной группе на ведущие позиции выходит *T. compressa* (до 29,7%), которая имеет максимальные положительные нагрузки для PC-3. Численность *D. smithii* остается на прежнем уровне. В интервале подзоны зафиксировано увеличение численности планктонной sublittoralной *O. aurita* (до 7,3%)

и *A. senarius* (21,0%), имеющих положительные нагрузки для РС-2. В морской неритической группе сокращается обилие спор рода *Chaetoceros*. Данный род имеет отрицательные нагрузки по всем трем компонентам, тем не менее является очень информативным показателем активного перемешивания прибрежных вод [27, 28]. В современном Японском море представители рода *Chaetoceros* ssp. доминируют в зимне-весеннем фитопланктоне [29, 30]. Максимальные отрицательные нагрузки для данного рода характерны для второй компоненты, значения которой увеличиваются на границе подзон tDZ 1.1 и tDZ 1.2. В подзоне tDZ 1.2 отмечается разнообразие неритических и сублитеральных таксонов, это указывает на то, что произошло потепление климата, но уровень моря еще не стал максимальным.

Зона tDZ 2 (1005–460 см) характеризуется максимальными собственными значениями первой компоненты (до 42) и низкими РС-2 и РС-3 (рис. 3). Самые высокие показатели обилия таксонов морской неритической группы (до 70,2%) определяет *A. senarius* (59,3%), имеющий высокие положительные нагрузки для РС-1. Численность представителей сублитеральной группы снижается (до 50,8%), а вот численность сублитеральных планктонных таксонов возрастает до 13,1%. До 12,9%, увеличивается также обилие представителей солоноватоводных планктонных видов. Отмечается сокращение частоты встречаемости таксонов пресноводных и переотложенных форм (~9 и ~3,8% соответственно). Диатомовый комплекс указывает на активную гидродинамику. Осадки данной зоны характеризуются алевритами.

Особенностью подзоны tDZ 2.1 (1005–780 см) являются высокие собственные значения первой (до 20) и второй компонент (до 12) и низкие – третьей (до –8). Подзона отражает рост численности неритической группы (до 54,8%), особенно *A. senarius* (до 34,6%), имеющей высокие положительные нагрузки для РС-1, и уменьшение участия сублитеральных бентических таксонов (до 50,8%), в частности *D. smithii* (до 32,5%), определяющей низкие нагрузки для РС-1, и *T. compressa* (до 13,5%). Также необходимо отметить увеличение обилия солоноватоводных планктонных видов (до 10,6%). Отмечается рост численности таксонов сублитеральной планктонной группы (до 9,2%), в которой высокими оценками обилия характеризуется мезогалобная *O. aurita* (до 9,2%), имеющая высокие положительные нагрузки для РС-2. Отмечено снижение численности пресноводной и переотложенной групп до 12,6 и до 4,6% соответственно.

Для подзоны tDZ 2.2 (780–460 см) характерны высокие собственные значения корреляционной матрицы первой компоненты (до 42) и низкие – второй (до –12) и третьей (–10) компонент. В данной подзоне зафиксировано максимальное увеличение (до 70,2%) таксонов неритических видов, особенно *A. senarius* (59,3%). Стоит отметить появление в комплексе данной подзоны океанических таксонов из пелагической группы, а также значительное увеличение численности сублитеральных планктонных видов, среди которых выделяется *O. aurita* с показателем до 13,0%. До 23,9% увеличивается обилие представителей пресноводной группы, также возрастает доля переотложенных таксонов до 16,3%, что может свидетельствовать о влиянии реки, размывающей древние, миоценовые отложения. Комплекс диатомей фиксирует доминирование сублитеральных видов, но главная компонента, которая дает положительные нагрузки, определяется неритическими таксонами. Это может указывать на условия формирования осадков в активной фазе трансгрессии в теплых климатических условиях в голоцене и повышении уровня моря выше современного (около 1–1,5 м), что согласуется с результатами исследований коллег [13, 17, 31].

Зона tDZ 3 (460–165 см) характеризуется низкими собственными значениями корреляционной матрицы первой (до –19) и третьей (до –17) компонент, а также отдельным положительным пиком второй компоненты (5). Отмечается снижение количества таксонов морской неритической группы (до 51,9%) и увеличение обилия морской сублитеральной бентосной группы (до 48,8%). Вновь возрастает численность *D. smithii* (до 26,5%) и *T. compressa* (до 7,7%). Постепенно снижается обилие таксонов пресноводной (до 21,7%) и переотложенной групп (до 11,7%). Полученные данные комплексного анализа отложений данной зоны свидетельствуют о постепенном понижении уровня моря и обмелении бухты. Более того, снижение количества таксонов морской неритической группы и увеличение обилия сублитеральной бентосной группы в осадках горизонтов, для которых зафиксированы высокие показатели РС-2, может говорить об увеличении воздействия речного стока (рис. 5). Слои осадков представлены мелкозернистым алевритовым песком с ракушечным детритом.



Необходимо отметить, что в интервалах (1030–1055; 715–720; 625–630; 505–510; 445–450; 310–115; 250–255; 235–240) обнаружены единичные створки диатомей. Бедность осадков диатомеями в данных интервалах может свидетельствовать об активной гидродинамике, а также о высоких скоростях осадконакопления, во время которого происходило образование изученной толщи отложений, о чем говорят и незначительные изменения в видовом составе диатомей. К сожалению, низкая концентрация створок в препаратах данных интервалов является ограничением использования статистических методов, в том числе PCA.

## Заключение

Результаты проведенного исследования показали целесообразность использования метода главных компонент (PCA) в качестве инструмента для установления изменений диатомовых палеосообществ и на этой основе поиска экологических факторов, вызвавших эти трансформации. Результаты PCA упрощают работу исследователя по выявлению главных компонент, указывающих, по сути, на определенные параметры среды или ситуационное состояние экосистемы в конкретный временной промежуток. PCA позволяет представить модель распределения диатомовых водорослей с учетом взаимосвязей, присущих анализируемой системе, а также указать основные тренды изменений палеоусловий и оценить значимость факторов среды, влияющих на эти изменения.

Суммарный вклад главных компонент по результатам анализа диатомей из голоценовых отложений оз. Птичье составил 78% суммарной дисперсии для корреляционной матрицы, что, несомненно, демонстрирует высокую значимость результатов. Полученные данные позволили выявить закономерности изменения палеосообществ диатомовых водорослей в условиях трансгрессивно-регрессивного цикла, соответствующего оптимальной фазе голоцена:

1. Увеличение собственных значений PC-2 (до 10) и PC-3 (до 20), для которых положительные нагрузки обеспечили сублиторальные виды *T. compressa* и *D. smithii*, зафиксировало начальный этап повышения уровня моря в условиях климатического потепления.

2. Максимальные значения PC-1 (до 42), для которой высокие положительные нагрузки определил бореальный неритический вид *A. senarius*, отразили самое высокое стояние уровня моря.

3. Низкие собственные значения PC-1 (до –19) и PC-3 (до –17) и увеличение значений PC-2 (до 5), которые поддержал максимальными нагрузками вид *D. smithii*, отметили начало регрессии.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Harper D.A.T. Numerical paleobiology. Computer-based modeling and analysis of Fossils and their distributions. New York, 1999. 468 p.
2. Davis J.C. Statistics and Data Analysis in Geology. New York: John Wiley & Sons, 1986. P. 238–244.
3. Legendre P., Legendre L. Numerical Ecology. 2nd English Edition, Amsterdam: Elsevier, 1998. Vol. 24. 853 p.
4. Xue J., Lee C. Using principal components analysis (PCA) with cluster analysis to study the organic geochemistry of sinking particles in the ocean // Organic Geochemistry. 2011. № 42 (4). P. 356–367.
5. Gazley M.F., Collins K.S. Application of principal component analysis and cluster analysis to mineral exploration and mine geology // AusIMM New Zeal. Branch Annu. Conf. Dunedin, 2015. P. 131–139.
6. Hammer Ø., Harper D.A.T. Past: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis // Palaeontologia Electronica. 2001. Vol. 4(1), № 4. P. 1–9. URL: [http://palaeo-electronica.org/2001\\_1/past/issue1\\_01.htm](http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm) (date of access: 15.02.2024).
7. Milan M., Albrecht N. et al. Clockwise hysteresis of diatoms in response to nutrient dynamics during eutrophication and recovery // Limnol. Oceanogr. 2022. Bd 6 (9). S. 2088–2100.

8. Edwards M., Beaugrand G. et al. Climate variability and multi-decadal diatom abundance in the Northeast Atlantic. France. P. 1–8. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00492-9>
9. Chipman M.L., Clarke G.H. et al. A 2000 year record of climatic change at Ongoke Lake, southwest Alaska. USA, 2009. DOI: 10.1007/s10933-008-9257-8.
10. Евстигнеева Т.А., Черепанова М.В., Романова А.В. Изменение окружающей среды северо-западного сектора Японского моря в период последней дегляциации // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2023. № 3. С. 3–17.
11. Jewson S. An alternative to PCA for estimating dominant patterns of climate variability and extremes, with application to U.S. and China seasonal rainfall // Atmosphere. 2020. Vol. 11(4). 354 p. <https://doi.org/10.3390/atmos11040354>
12. Пушкарь В.С., Черепанова М.В. Диатомовые комплексы и корреляция четвертичных отложений северо-западной части Тихого океана. Владивосток: Дальнаука, 2008. 174 с.
13. Пушкарь В.С. Биостратиграфия осадков позднего антропогена юга Дальнего Востока (по данным диатомового анализа). М.: Наука, 1979. 140 с.
14. Lozhkin A. V., Cherepanova M. V., Anderson P.M. Glukhoye Lake: Middle to Late Holocene environments of Kunashir Island (Kuril Archipelago, Russian Far East) // Boreas. 2022. Vol. 51, N2. P. 364–384. <https://doi.org/10.1111/bor.12565>
15. Муранов А.П. Ресурсы поверхностных вод СССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 592 с. (Гидрологическая изученность; Т. 18, № 2).
16. Прошкина-Лавренко А.И. Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Т. 1. Практическое руководство / ред. З.И. Глезер, А.П. Жузе, И.В. Макарова, В.С. Шешукова-Порецкая. М.: Наука, 1974. 403 с.
17. Микишин Ю.А., Петренко Т.И., Гвоздева И.Г. и др. Голоцен побережья юго-западного Приморья // Научное обозрение. 2008. № 1. С. 8–27.
18. Guiry M.D., Guiry G.M. AlgaeBase. World-wide electron. publ. Nat. Univ. Ireland, Galway, 2021. URL: <http://www.algaebase.org/search/species/> (date of access: 26.02.2024).
19. Барнинова С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. Биоразнообразии водорослей-индикаторов окружающей среды. Pilies Studio, 2006. 498 с.
20. Диатомовый анализ. Определитель ископаемых и современных диатомовых водорослей. Кн. 2. М.: Госгеолитиздат, 1949. 238 с.
21. Bertolli L.M., Talgatti D.M., Nascimento T.M.S., Torgan L.C. The genus *Tryblionella* W. Smith (Bacillariaceae, Bacillariophyta) in southern Brazil salt marshes // Biota Neotropica. 2020. Vol. 20 (1). P. 1–18. e20190774. <http://dx.doi.org/10.1590/1676-0611-BN-2019-0774>
22. Hasle G.R. Some *Thalassiosira* species with one central process (Bacillariophyceae) // Norw. J. Bot. 1978. Vol. 25, N2. P. 77–110.
23. Черепанова М.В., Лепская Е.В., Андерсон П., Ложкин А.В. Диатомовые водоросли из голоценовых осадков оз. Нерпичье (Камчатка) // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и Северо-западной части Тихого океана. 2013. Вып. 31. С. 89–106.
24. Ольштынская А.П. Диатомеи и кокколитофориды в голоценовых экосистемах Прикерченского сектора Черного моря // Экосистемы, их оптимизация и охрана. Симферополь: ТНУ, 2014. Вып. 11. С. 82–88.
25. Элбакидзе Е.А. Условия осадконакопления озера Птичьего (Южное Приморье) в среднем голоцене по данным диатомового анализа // Геология на окраине континента: материалы II молодежной научной конференции-школы ДВГИ ДВО РАН. Владивосток: ДВФУ, 2022. 231 с. DOI: <https://doi.org/10.24866/7444-5330-5>.
26. Лутаенко К.А. Моллюски из голоценовых отложений Хасанского района (Южное Приморье) // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 1993. Т. 1, № 6. С. 89–91.
27. Suto I., Kawamura K., Nagimoto S., Teraishi A., Tanaka Y., Changes in upwelling mechanisms drove the evolution of marine organisms // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2012. Vol. 339–341. P. 39–51.
28. Lopes C., Mix A.C., Abrantes F. Diatoms in northeast Pacific surface sediments as paleoceanographic proxies // Marine Micropaleontology. 2006. Vol. 60 (1). P. 45–65.
29. Zakharkov S.P., Lobanov V.B., Gordeichuk T.N., Morozova E.A., Shtraikhert E.A. Spatial variability of the chlorophyll a and the specific structure of the phytoplankton in the northwestern part of the Sea of Japan during the winter period // Oceanology. 2012. Vol. 52 (3). P. 354–363.

30. Шевченко О.Г., Орлова Т.Ю., Стоник И.В. Диатомовые водоросли порядка Chaetocerotales // Биота российских вод Японского моря. Т. 11 / под ред. А.В. Адрианова. Владивосток: Дальнаука, 2014. 247 с.
31. Короткий А.М., Гребенникова Т.А., Караулова Л.П., Белянина Н.И. Озерные трансгрессии в позднекайнозойской Усури-Ханкайской депрессии (Приморья) // Тихоокеанская геология. 2007. Т. 26, № 4. С. 53–68.

## REFERENCES

1. Harper D.A.T. Numerical paleobiology. Computer-based modeling and analysis of Fossils and their distributions. New York; 1999. 468 p.
2. Davis J.C. Statistics and Data Analysis in Geology. New York: John Wiley & Sons; 1986. P. 238–244
3. Legendre P., Legendre L. Numerical Ecology. 2nd English Edition. Amsterdam: Elsevier; 1998. Vol. 24. 853 p.
4. Xue J., Lee C. Using principal components analysis (PCA) with cluster analysis to study the organic geochemistry of sinking particles in the ocean. *Organic Geochemistry*. 2011;42(4):356–367.
5. Gazley M.F., Collins K.S. Application of principal component analysis and cluster analysis to mineral exploration and mine geology. In: *AusIMM New Zeal. Branch Annu. Conf.* Dunedin; 2015. P. 131–139.
6. Hammer Ø., Harper D.A.T. Past: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*. 2001;4(1):1–9.  
URL: [http://palaeo-electronica.org/2001\\_1/past/issue1\\_01.htm](http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm) (date of access: 15.02.2024).
7. Milan M., Albrecht N. et al. Clockwise hysteresis of diatoms in response to nutrient dynamics during eutrophication and recovery. *Limnol. Oceanogr.* 2022;6 (9):2088–2100.
8. Edwards M., Beaugrand G. et al. Climate variability and multi-decadal diatom abundance in the Northeast Atlantic. France. P. 1–8. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00492-9>
9. Chipman M.L., Clarke G.H. et al. A 2000 year record of climatic change at Ongoke Lake, southwest Alaska. USA; 2009. DOI: 10.1007/s10933-008-9257-8.
10. Evstigneeva T.A., Cherepanova M.V., Romanova A.V. Izmenenie okruzhayushchei sredy severo-zapadnogo sektora Yaponskogo morya v period poslednei deglyatsiatsii = [Environmental changes in the northwestern sector of the Sea of Japan during the last deglaciation]. *Vestnik Severo-Vostochnogo Nauchnogo Tsentra DVO RAN*. 2023;(3):3–17. (In Russ.).
11. Jewson S. An alternative to PCA for estimating dominant patterns of climate variability and extremes, with application to U.S. and China seasonal rainfall. *Atmosphere*. 2020;11(4):354.  
<https://doi.org/10.3390/atmos11040354>
12. Pushkar V.S., Cherepanova M.V. Diatomovye komplekсы i korrelyatsiya chetvertichnykh otlozhenii severo-zapadnoi chasti Tikhogo okeana = [Diatom assemblages and correlation of Quaternary sediments of the northwestern Pacific Ocean]. Vladivostok: Dalnauka; 2008. 174 p. (In Russ.).
13. Pushkar V.S. Biostratigrafiya osadkov pozdnego antropogena yuga Dal'nego Vostoka (po dannym diatomovogo analiza) = [Biostratigraphy of sediments of the late Anthropocene in the south of the Far East (according to diatom analysis)]. Moscow: Science; 1979. 140 p. (In Russ.).
14. Lozhkin A.V., Cherepanova M.V., Anderson P.M. Glukhoye Lake: Middle to Late Holocene environments of Kunashir Island (Kuril Archipelago, Russian Far East). *Boreas*. 2022;51(2):364–384.  
<https://doi.org/10.1111/bor.12565>
15. Muranov A.P. Resursy poverkhnostnykh vod SSSR: Gidrologicheskaya izuchennost' = [Surface water resources of the USSR: Hydrological Knowledge]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1970. Vol. 18, N2. 592 p. (In Russ.).
16. Proshkina-Lavrenko A.I. Diatoms of the USSR (fossil and modern). L.: Nauka; 1974. Vol. 1. Practical guide. 403 p. (In Russ.).
17. Mikishin Yu.A., Petrenko T.I., Gvozdeva I.G. et al. Golotsen poberezh'ya yugo-zapadnogo Primor'ya = [Holocene coast of southwestern Primorye]. *Scientific Review*. 2008;(1):8–27. (In Russ.).
18. Guiry M.D., Guiry G.M. AlgaeBase. World-wide electron. publ. Nat. Univ. Ireland, Galway; 2021.  
URL: <http://www.algaebase.org/search/species/> (date of access: 26.02.2024).
19. Barinova S.S., Medvedeva L.A., Anisimova O.V. Bioraznoobrazie vodoroslei-indikatorov okruzhayushchei sredy = [Biodiversity of environmental indicator algae]. Pilies Studio; 2006. 498 p. (In Russ.).

20. Diatom analysis. Opredelitel' iskopaemykh i sovremennykh diatomovykh vodoroslei. = [Key to fossil and modern diatoms]. L.: Gosgeolizdat; 1949. Vol. 2. 238 p. (In Russ.).
21. Bertolli L.M., Talgatti D.M., Nascimento T.M.S., Torgan L.C. The genus *Tryblionella* W. Smith (Bacillariaceae, Bacillariophyta) in southern Brazil salt marshes. *Biota Neotropica*. 2020;20(1):1–18. e20190774. <http://dx.doi.org/10.1590/1676-0611-BN-2019-0774>
22. Hasle G.R. Some Thalassiosira species with one central process (Bacillariophyceae). *Norw. J. Bot.* 1978;25(2):77–110.
23. Cherepanova M. V., Lepsкая E. V., Anderson P., Lozhkin A. V. Issledovaniya vodnykh biologicheskikh resursov Kamchatki i Severo-zapadnoi chasti Tikhogo okeana. = [Diatoms from Holocene sediments of Lake. Nerpichye (Kamchatka)]. *Research of Aquatic Biological Resources of Kamchatka and the North-Western Part of the Pacific Ocean*. 2013;31:89–106. (In Russ.).
24. Ol'shtynskaya A. P. Diatomei i kokkolitoforidy v golotsenovykh ehkositemakh Prikerchenskogo sektora Chernogo morya. Ehkositemy, ikh optimizatsiya i okhrana. Simferopol' = [Diatoms and coccolithophores in Holocene ecosystems of the Kerchen sector of the Black Sea]. Simferopol: TNU; 2014. Vyp.11. S. 82–88. (In Russ.).
25. Elbakidze E.A. Usloviya osadkonakopleniya ozera ptich'ego (Yuzhnoe Primor'e) v srednem golotsene po dannym diatomovogo analiza = [Sedimentation conditions of the bird lake (Southern Primorye) in the Middle Holocene according to diatom analysis]. In: Materials of the II youth scientific conference-school FEGI FEB RAS *Geology on the outskirts of the continent*. Vladivostok: FEFU Publishing House; 2022. 231 p. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24866/7444-5330-5>.
26. Lutaenko K.A. Mollyuski iz golotsenovykh otlozhenii Khasanskogo raiona (Yuzhnoe Primor'e) = [Mollusks from Holocene deposits of the Khasan region (Southern Primorye)]. *Stratigraphy. Geological Correlation*. 1993;1(6):89–91. (In Russ.).
27. Suto I., Kawamura K., Hagimoto S., Teraishi A., Tanaka Y. Changes in upwelling mechanisms drove the evolution of marine organisms. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2012;339–341:39–51.
28. Lopes C., Mix A.C., Abrantes F. Diatoms in northeast Pacific surface sediments as paleoceanographic proxies. *Marine Micropaleontology*. 2006;60 (1):45–65.
29. Zakharkov S.P., Lobanov V.B., Gordeichuk T.N., Morozova E.A., Shtraikhert E.A. Spatial variability of the chlorophyll a and the specific structure of the phytoplankton in the northwestern part of the Sea of Japan during the winter period. *Oceanology*. 2012;(3):354–363.
30. Shevchenko O.G., Orlova T.Yu., Stonik I.V. Diatomovye vodorosli poryadka Chaetocerotales = [Diatoms of the order Chaetocerotales]. In: Adrianov A.V. (ed.). *Biota Rossiiskikh vod Yaponskogo morya*. Vladivostok: Dal'nauka; 2014. Vol. 11. 247 p. (In Russ.).
31. Korotkij A.M., Grebennikova T.A., Karaulova L.P., Belyanina N.I. Ozyornye transgressii v pozdnekajnozoijskoj Ussuri-Hankajskoj depressii (Primor'ya) = [Lake transgressions in the Late Cenozoic Ussuri-Khanka depression (Primorye)]. *Tihookeanskaya Geologiya*. 2007;26(14):53–68. (In Russ.).