

УДК 902.672:561.26+551.793.9:551.794(265.672)

ИЗМЕНЕНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО СЕКТОРА ЯПОНСКОГО МОРЯ В ПЕРИОД ПОСЛЕДНЕЙ ДЕГЛЯЦИИ

Евстигнеева Т. А.¹, Черепанова М. В.¹, Романова А. В.²

¹Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН,
г. Владивосток

²Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток
E-mail: evstigneeva@biosoil.ru

Анализ изменений спорово-пыльцевых и диатомовых данных с высоким временным разрешением позволил реконструировать состояние окружающей среды в северо-западной части Японского моря и прилегающей суши за последние 21.0 тыс. лет. С 21.0 до 16.6 тыс. л. н. в регионе господствовал относительно сухой климат, обусловивший широкое распространение лесостепных ландшафтов. Бореальные леса покрывали горные склоны. Широколиственные деревья сохранялись в рефугиумах в нижнем поясе гор. Низкий уровень моря в это время, соответствующий последнему ледниковому максимуму (LGM), определил иные по сравнению с современными общие закономерности морской циркуляции и векторов вдольбереговых течений, переносивших воды, образовавшиеся в мелководных северо-западной и северной частях Японского моря. Небольшое увеличение количества сублиторальных бентосных диатомей указывает на понижение уровня моря во время LGM. Расселение *Betula* после 18.5 тыс. л. н. указывает на начало потепления, которое прервалось холодным событием Heinrich 1 (H1), и было отмечено распространением хвойных лесов с *Larix*, *Picea* и сфагновых болот. Начало позднеледникового улучшения климата Bølling-Allerød (BA) способствовало расселению *Quercus* и папоротников Polypodiaceae. Распространение хвойных деревьев *Larix*, *Picea* и сфагновых болот сопоставляется с похолоданием Younger Dryas (YD). Значительные изменения растительности произошли в голоцене. Высокий процент сублиторальных планктонных диатомовых водорослей отражает постепенное повышение уровня моря во время BA и YD. Увеличение доли океанических видов диатомей в голоцене указывает на приток тихоокеанских вод как через пролив Цусима, так и через пролив Цугару. Во время потеплений отмечался некоторый рост участия и видового разнообразия относительно тепловодных диатомей. Проведённые исследования демонстрируют четкую реакцию спор, пыльцы и диатомей на климатические колебания и изменения уровня Японского моря в течение позднего плейстоцена и голоцена.

Ключевые слова: споры и пыльца, диатомей, палеоклимат, изменения уровня моря, растительность, Японское море.

DOI: 10.34078/1814-0998-2023-3-3-17

ВВЕДЕНИЕ

Последнее глобальное потепление (дегляциация), начавшееся с последнего ледникового максимума, характеризовалось наиболее фундаментальными за последние 100 тыс. лет изменениями климата в течение ледниково-межледникового цикла и, следовательно, является ключевым для понимания механизмов трансформации среды от ледниковых к межледниковым условиям (Zhang

et al., 2014). Результатом этих изменений стали значительные возмущения в наземных и морских экосистемах.

Долговременные, непрерывные летописи палеогеографических событий хорошо сохраняются в морских осадках, которые являются уникальным объектом исследований при реконструкции событий прошлого. Комплексный анализ палинологических и диатомовых данных, полученных для морских отложений, даёт более полные сведения о развитии как морских бассейнов, так и окружающей их суши.

Японское море – глубокое, полузамкнутое, окраинное море, соединенное с другими дальневосточными морями и Тихим океаном мелководными проливами (рис. 1) глубиной не более 135 м. Их мелководность делает Японское море более чувствительным к глобальным изменениям климата и связанным с ними колебаниям уровня моря. Эти изменения были особенно заметны во время LGM, когда его уровень был примерно на 130 м ниже современного (Ishiwatari et al., 2001).

Целью настоящего исследования явилось изучение пыльцевых и диатомовых записей, полученных для колонки LV 53-29 из северо-западной части Японского моря, для реконструкции истории природной среды региона в период дегляциации.

ХАРАКТЕРИСТИКА РЕГИОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

Расположение Японского моря в двух климатических зонах, наличие подводных поднятий обуславливают сложную схему его общей циркуляции (рис. 1). Тихоокеанские воды, поступающие через Цусимский пролив из Восточно-

Китайского моря, являются источником тепла и соли для Японского моря. Холодное Приморское течение в контакте с теплым Восточно-Корейским течением образуют Полярный фронт, формируя зону, разграничивающую теплые и холодные секторы моря (Зуенко, 1998).

Муссонный характер циркуляции атмосферы является основным фактором, контролирующим климат региона (рис. 1). Он характеризуется ярко выраженной сезонностью: зимний муссон приносит прохладный сухой воздух из Сибири, а летний – теплый и влажный воздух с Тихого океана (Кубай и др., 2012). Средние температуры января и августа на западном побережье Японского моря в г. Владивостоке – -12°C и $+20^{\circ}\text{C}$ соответственно. По температурному режиму климат на большей территории Приморского края – резко континентальный, а в южных и восточных районах – континентальный. Летние осадки составляют $\approx 85\%$ от годовой суммы в 500–900 мм. Считается, что Приморье относится к зоне достаточного увлажнения. Однако внутренние районы края испытывают периодические весенние засухи, связанные с вторжени-

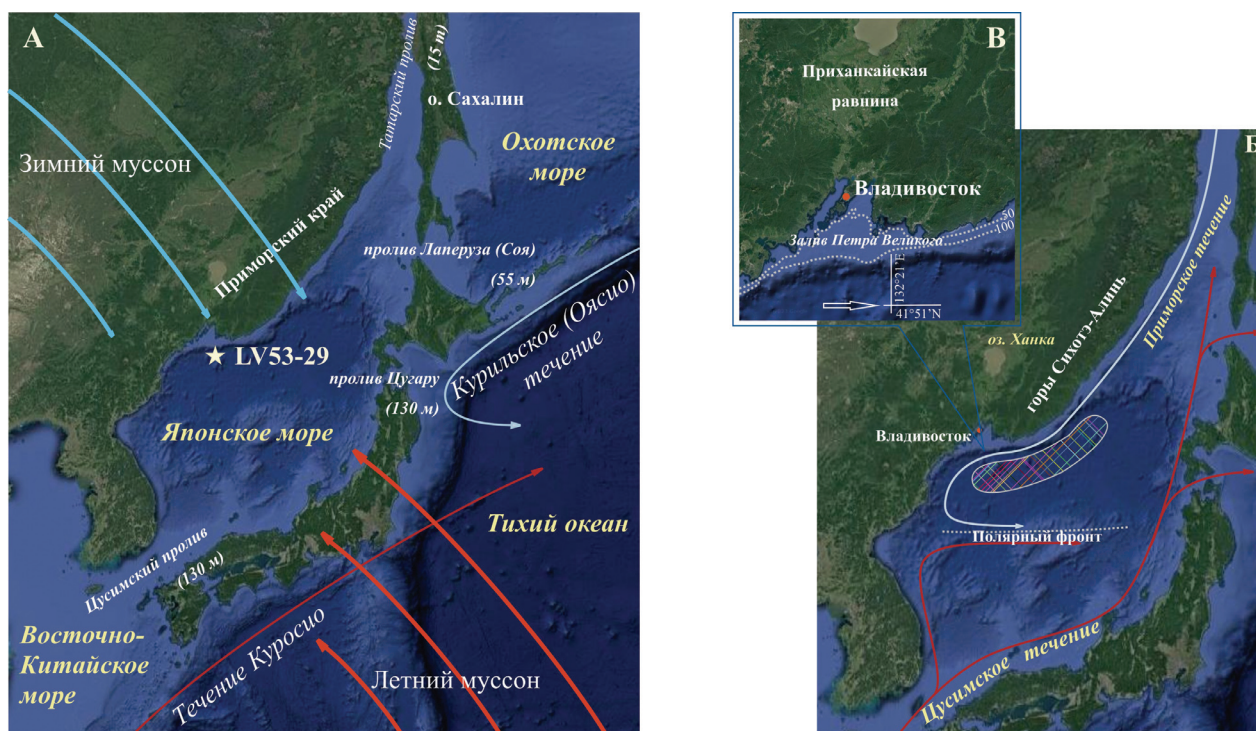


Рис. 1. Карта района Японского моря (изображение с www.google.com/maps): А – с указанием местонахождений колонки LV 53-29 и проливов, соединяющих море с Тихим океаном и другими окраинными морями, и демонстрацией региональной климатической системы; Б – со схемой океанографической циркуляции моря, расположением Полярного фронта и области сезонной глубокой конвекции (Senjyu et al., 2005); В – с расположением 50- и 100-метровых изобат.

Fig. 1. Map of the Sea of Japan region (image from www.google.com/maps) showing: А – location of core LV 53-29, straits connecting the sea with the Pacific Ocean and other marginal seas, and demonstration of the regional climate system; Б – scheme of the sea oceanographic circulation, locality of the Polar Front and of the zone of seasonal deep convection (Senjyu et al., 2005); В – position of the 50- and 100-meter isobaths.

ем воздушных масс из Китая и Монголии (Куренцова, 1962).

Благодаря относительно влажному климату в Приморье распространены бореальные (таежные) и умеренные (прохладные смешанные) леса (Krestov, 2003). Смешанные хвойно-широколиственные леса произрастают до высот 600–700 м н. у. м. в южной части края. В них доминируют *Pinus koraiensis* Siebold. & Zucc., *Abies holophylla* Maxim., *Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb., *Ulmus japonica* (Rehd.) Sarg., *Betula costata* Trautv., *Tilia amurensis* Rupr., *Juglans manshurica* Maxim. и др. **Выше склоны гор покрыты бореальными лесами с преобладанием *Picea jezoensis* (Siebold et Zucc.) Carr. и *Abies nephrolepis* (Trautv.) Maxim., встречается *Larix* spp. Вершины гор заняты зарослями *Betula ermanii* Cham., *Pinus pumila* (Pall.) Regel, *Alnus fruticosa* Rupr. и альпийской тундрой. Открытые ландшафты характерны для морского побережья и Приханкайской равнины, занимающей около 20 % территории края и характеризующейся сочетанием лугов и лесов. Луга встречаются на солнечных, хорошо дренированных склонах и заболоченных низинах. Ксерофитные и ксеромезофитные травы составляют остепненные луга. Древесная растительность с преобладанием *Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb., *Betula davurica* Pall., *Pinus densiflora* Siebold et Zucc., *Armeniaca sibirica* (L.) Lam. и *Ulmus macrocarpa* Hance образует небольшие пятнистые насаждения на склонах холмов и гребнях.**

В северных водах Японского моря преобладающими элементами, вызывающими цветение водорослей, являются арктические и северо-бореальные океанические и неритические диатомеи (Коновалова, Орлова, 1988; Захарков и др., 2012).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Колонка LV 53-29 (41° 51.6005' с. ш., 132° 21.8618' в. д., длина – 785 см) была поднята в северо-западной части Японского моря с глубины 1956 м во время российско-китайского рейса 53 на НИС «Академик Лаврентьев» в 2010 г. (рис. 1). Осадки представлены серыми однородными илами с прослоями тефры. В данной работе мы детально исследовали верхнюю часть керна длиной 150 см, которая, согласно возрастной модели, формировалась в течение 21 тыс. лет (Evstigneeva et al., 2021). Образцы для палинологического и диатомового анализов (всего 62) отбирались через каждые 2 см с толщиной образца ≈ 1 см. Анализы проводились согласно стандартным методикам (Покровская, 1966; Глезер и др., 1974). Диаграммы процентного содержания пыльцы, спор и диатомовых водорослей строили с использованием программного обеспечения

Tilia (версия 2.0.41; <http://www.tiliait.com>). Кластерный анализ (CONISS; Grimm, 1992) применяли для выделения локальных зон: пыльцевых – ПЗ, диатомовых – ДЗ.

Для более корректной интерпретации диатомовых данных в комплекс *Thalassiosira eccentrica* были объединены виды, створки которых по своей морфологии сходны с *Thalassiosira eccentrica* (Ehrenberg) Cleve и которые порою трудно диагностировать до вида в световом микроскопе. В этот комплекс вошли: *Thalassiosira angulata* (Gregory) Hasle, *T. decipiens* (Grunow) Jørgensen, *T. eccentrica*, *Shionodiscus biporus* (Shiono) Alverson, Kang et Theriot, *S. latimarginatus* (Makarova) Alverson, Kang et Theriot и некоторые др.

Для анализа полученных данных был использован метод главных компонент (Principal Component Analysis, PCA) на основе 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 с процентным содержанием более 2 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Установленные изменения спорово-пыльцевых спектров и диатомовых палеосообществ за последние 21 тыс. лет зафиксировали ледниковые, послеледниковые (дегляциация) и голоценовые условия в северо-западной части Японского моря.

Палинологическая зональность. На основе кластерного анализа было выделено 8 пыльцевых зон (рис. 2). ПЗ 1 (150–110 см; 20.9–16.4 тыс. л. н.) характеризуется высоким процентом недревесной пыльцы, в основном за счет полыней. Среди древесных таксонов преобладает пыльца *Picea*, *Pinus*, с меньшими значениями *Betula*, *Alnus* и *Larix*. ПЗ 2 (110–105 см; 16.4–15.6 тыс. л. н.) отличается самым высоким содержанием спор *Sphagnum*, а также пыльцы *Picea* и *Larix*. ПЗ 3 (105–92.5 см; 15.6–13.1 тыс. л. н.) характеризуется наиболее высоким процентом спор Polypodiaceae и присутствием в небольшом количестве пыльцы *Quercus*. Особенно ПЗ 4 (92.5–82.5 см; 13.1–11.7 тыс. л. н.) является увеличением содержания спор *Sphagnum* и пыльцы *Pinus*, *Picea*, *Larix*, Ericaceae. Самый высокий процент пыльцы *Betula* и увеличение участия *Quercus* отличают ПЗ 5 (82.5–76 см; 11.7–10.8 тыс. л. н.). Продолжающееся увеличение содержания пыльцы *Quercus* и *Ulmus* характеризуют ПЗ 6 (76–69 см; 10.8–9.8 тыс. л. н.). Доминирование пыльцы *Quercus* является отличительной особенностью ПЗ 7 (69–30 см; 9.8–4.3 тыс.

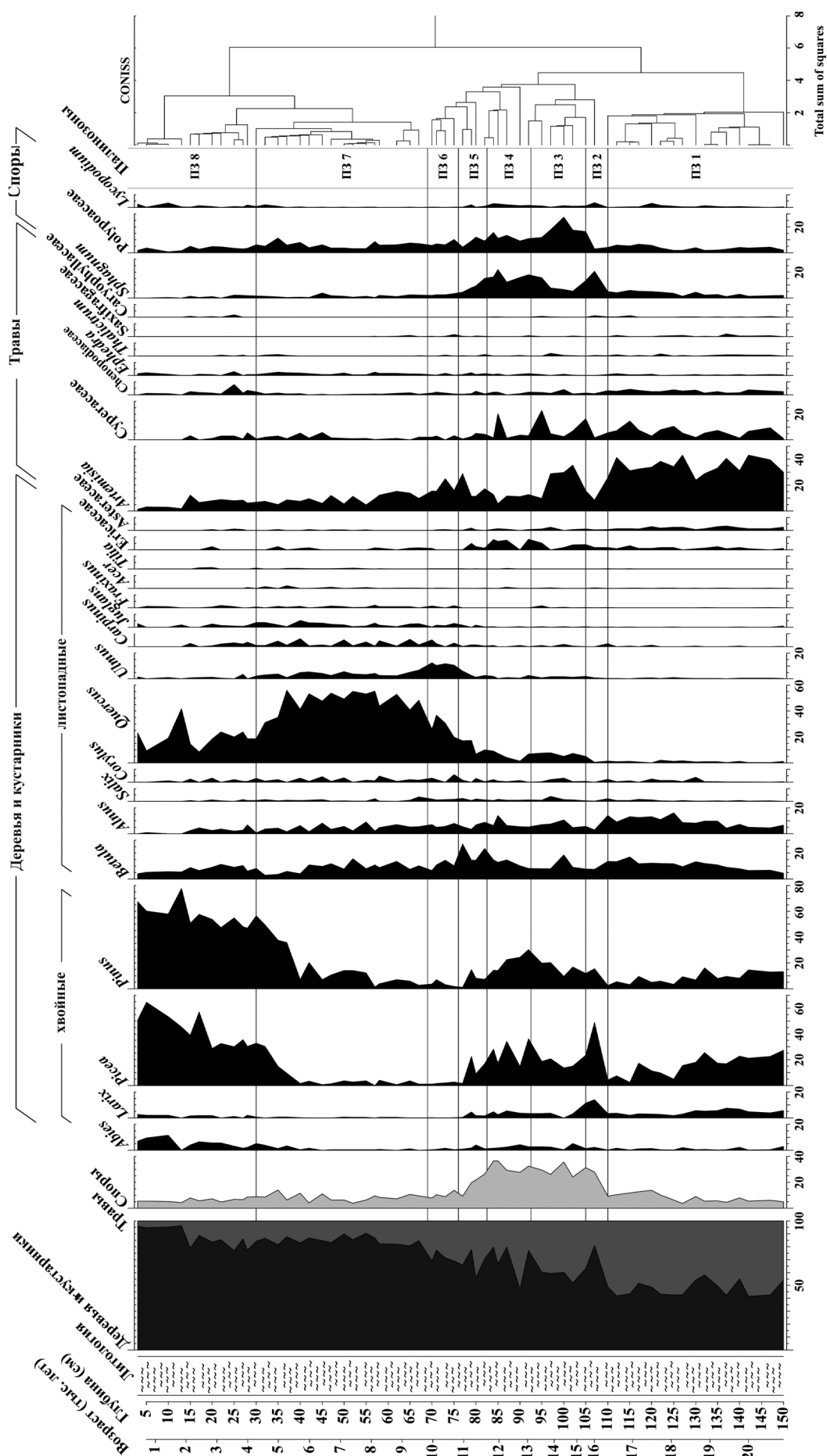


Рис. 2. Распределение (в %) основных таксонов пыльцы и спор и выделенные с помощью CONISS локальные пыльцевые зоны.

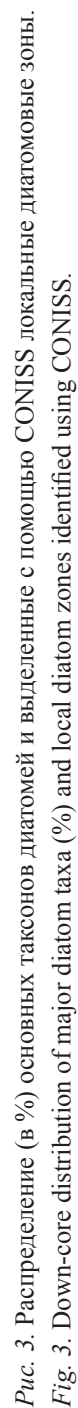


Рис. 3. Распределение (в %) основных таксонов диатомей и выделенные с помощью CONISS локальные диатомовые зоны.

л. н.). ПЗ 8 (30–0 см; 43–0 тыс. л. н.) зафиксировала увеличение процентного содержания пыльцы *Picea*, *Pinus*, *Abies* и *Larix* и снижение участия пыльцы *Quercus*.

Диатомовая зональность. На основе данных диатомового анализа было выделено 7 зон (рис. 3). ДЗ 1 (150–126 см; 20.9–18.2 тыс. л. н.) характеризуется относительно высоким содержанием неритической *Thalassionema nitzschioides* (Grunow) Mereschkowsky. Наибольший процент покоящихся спор представителей рода *Chaetoceros* отмечается для ДЗ 2 (126–106 см; 18.2–15.8 тыс. л. н.). ДЗ 3 (106–93 см; 15.8–13.2 тыс. л. н.) отмечена самыми высокими показателями холодноводной пелагической *Rhizosolenia hebetata* Bailey. Отличительной особенностью ДЗ 4 (93–79 см; 13.2–11.3 тыс. л. н.) является высокая доля участия сублиторальной *Paralia sulcata* (Ehrenberg) Cleve. В ДЗ 5 (79–71 см; 11.3–10.1 тыс. л. н.) несколько увеличивается доля термофильных неритических *Thalassionema frauenfeldii* (Grunow) Tempère & Peragallo и океанического *Coscinodiscus radiatus* Ehrenberg. Для ДЗ 6 (71–41 см; 10.1–5.8 тыс. л. н.) характерно резкое снижение содержания *P. sulcata* и увеличение *R. hebetata*. Увеличение участия океанических *Neodenticula seminae* (Simonsen et Kanaya), Akiba et Yanagisawa, *C. radiatus* и др. отмечено для ДЗ 7 (41–0 см; 5.8–0 тыс. л. н.).

PCA анализ. В результате проведенного анализа были получены два главных компонента (PC1, PC2), которые определяют факторы, оказывающие наибольшее влияние на пространственно-временное распределение палиноморф по разрезу (рис. 4, 5). Суммарный вклад главных компонент составляет 86 % суммарной дисперсии для ковариационной матрицы. Первая и вторая компоненты составляют 50 % и 36 % вариаций соответственно. Максимальную информацию об изменчивости системы признаков несет первая главная компонента, для которой высокие положительные нагрузки имеют представители родов *Picea*, *Pinus* и *Abies*, предпочитающие влажные условия обитания. Высокую отрицательную нагрузку имеет *Artemisia* – более засухоустойчивый таксон. Вероятнее всего, высокие значения первого компонента отражают повышение влажности, связанное не с увеличением атмосферных осадков, а с уменьшением испарения. Высокие положительные нагрузки для компонента 2 имеют представители родов *Larix*, *Picea*, *Artemisia*, *Cyperaceae*, *Sphagnum* и предполагают более прохладные климатические условия, в то время как представители *Quercus* имеют высокие отрицательные нагрузки, что свидетельствует о потеплении.

Вклад каждой из четырех выбранных главных компонент (собственных значений осей PC)

составил: PC1 – 54.55 %; PC2 – 13.91 %; PC3 – 10.54 %, PC4 – 7.34 %. Для максимально информативного PC1 (рис. 4, 5) самые высокие положительные нагрузки имеет неритический, доминирующий в поверхностных осадках моря (Жузе, 1962) комплекс *Thalassiosira eccentrica* – 0.9232. С наибольшими отрицательными нагрузками представлены: сублиторальные *P. sulcata* (–0.2719) и *Odontella aurita* (Lyngbye) Agardh (–0.1252), холодноводные океаническая *R. hebetata* (–0.1469) и неритический род *Chaetoceros* (–0.1229), представители которого вызывают цветение современных вод в ранневесеннее время (Захарков и др., 2012). Для PC2 с положительными нагрузками отмечены: род *Chaetoceros* (0.5688) и *R. hebetata* (0.5432), а с отрицательными – сублиторальные *P. sulcata* (–0.5641), *O. aurita* (–0.1173), а также океанический *C. radiatus* (–0.1228). Для PC3 положительные нагрузки зафиксированы для океанических *C. radiatus* (0.4596), *R. hebetata* (0.4407), *N. seminae* (0.2498), *Coscinodiscus divisus* Grunow (0.1737) и неритической *T. frauenfeldii* (0.1339), а отрицательные для: *Chaetoceros* (–0.4777), неритических *T. nitzschioides* (–0.3480), *Thalassiosira* aff. *aculeata* Proshkina-Lavrenko (–0.1673) и группы сублиторальных бентосных (–0.2126). Для PC4 положительными были нагрузки для *R. hebetata* (0.6017), *P. sulcata* (0.3276), комплекса *Thalassiosira eccentrica* (0.1754), группы сублиторальных бентосных (0.1394), *O. aurita* (0.1323); отрицательными для *C. radiatus* (–0.3832), *Chaetoceros* (–0.3215), *N. seminae* (–0.2846), *C. divisus* (–0.2735) и *T. frauenfeldii* (–0.1772).

ОБСУЖДЕНИЕ

На основе изучения микрофоссилий из осадков колонки LV 53-29 были установлены изменения в морских и наземных экосистемах в течение периода дегляциации, которые отразили локальные палино- и диатомовые зоны (рис. 2, 3).

Высокое обилие пыльцы бореальных таксонов и травянистых растений при незначительном участии пыльцы широколиственных (ПЗ 1; 21.0–16.4 тыс. л. н.) свидетельствует о более холодных и сухих климатических условиях по сравнению с современными, соответствующих LGM. Это подтверждается и результатами PCA. Для ПЗ 1 характерны низкие собственные значения корреляционной матрицы первого компонента и высокие – второго (рис. 5). Особенности этого времени являются низкая инсоляция и слабое влияние летнего муссона. Растительность южной части Приморского края представляла собой мозаичное сочетание бореального леса, остепнённых травянистых ассоциаций и лугов. Леса формировали *Picea*, *Pinus*, *Larix*, *Betula*, *Alnus*, в некоторых районах встречалась *Abies*. *Picea* и *Larix* произрастали на горных склонах до более низких

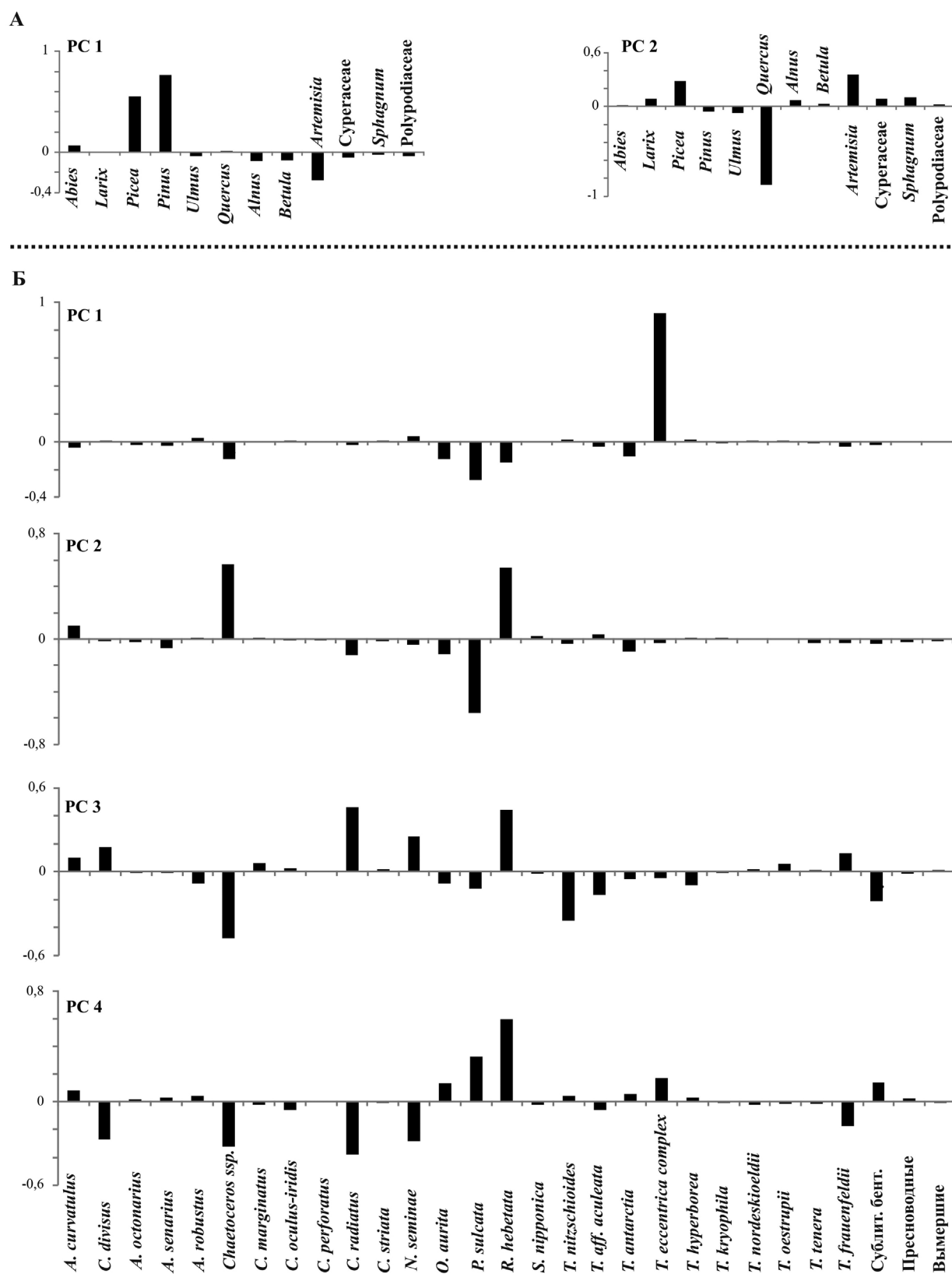


Рис. 4. Распределение нагрузок таксонов, полученных с помощью PCA-метода, для разных собственных значений осей (PC): А – для спор и пыльцы; Б – для диатомей.

Fig. 4. Distribution of taxa loadings obtained using the PCA-method: А – for spores and pollen; Б – for diatoms.

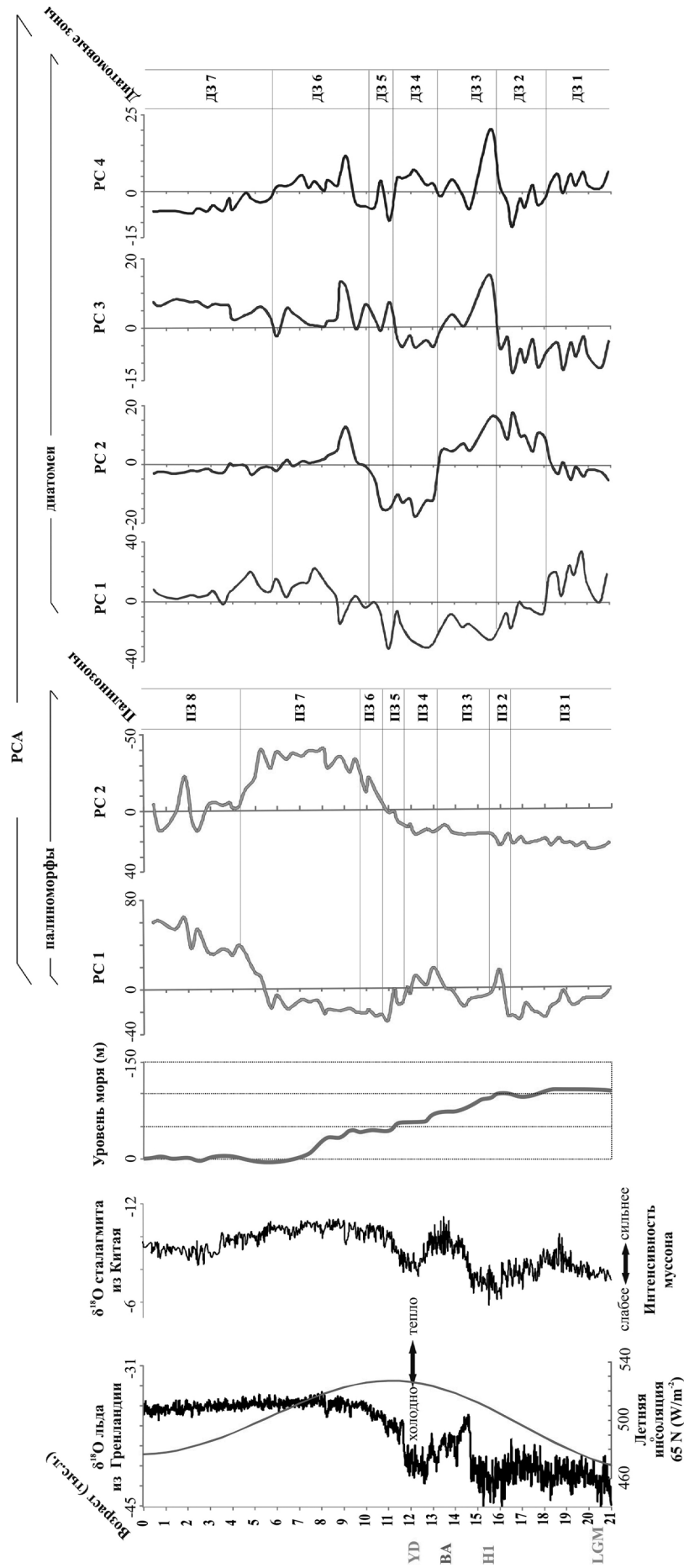


Рис. 5. Сравнение данных PCA по колонке LV 53-29, изменений уровня моря (Хершберг и др., 2013), а также данных $\delta^{18}\text{O}$ по гренландской скважине (North Greenland Ice Core Project Members, 2004), сталагмитами из Китая (Cheng et al., 2016) и летней инсоляции для Северного полушария (Laskar et al., 2004).

Fig. 5. Comparison of the PCA-data for core LV 53-29 with the sea level variations (Khersberg et al., 2013), as well as of the $\delta^{18}\text{O}$ data on NGRIP (North Greenland Ice Core Project Members, 2004), of stalagmite records from China (Cheng et al., 2016), and of the summer insolation for the Northern Hemisphere (Laskar et al., 2004).

высот по сравнению с их современным распространением. Незначительное присутствие пыльцы *Quercus*, *Ulmus*, *Carpinus*, *Corylus*, *Juglans*, *Salix*, *Fraxinus*, *Tilia*, *Acer* и др. в спорово-пыльцевых спектрах указывает на существование местообитаний, благоприятных для произрастания листопадных широколиственных деревьев умеренного леса. Значительный процент трав свидетельствует о развитии относительно открытого ландшафта. В пыльцевых записях доминирует *Artemisia*, постоянно присутствует пыльца представителей семейств Asteraceae, Chenopodiaceae, Caryophyllaceae, Saxifragaceae, Poaceae, Ranunculaceae, Lamiaceae, Liliaceae, Fabaceae, родов *Thalictrum*, *Ephedra* и др. Стоит отметить, что современная флора Приморского края насчитывает 42 вида рода *Artemisia*, 32 вида семейства Chenopodiaceae и 4 вида семейства Ephedraceae (Кожевников, Кожевникова, 2014). Травянистая растительность побережья Японского моря также демонстрирует фитогеографические связи с аридными сообществами Центральной Азии (Дудов, 2018). По всей видимости, засушливый климат LGM и появление значительных пространств осушенного шельфа привели к более широкому распространению лесостепных ландшафтов. После 18.5 тыс. л. н. климат становится немного более теплый и влажный, что способствует расселению *Betula* и *Alnus* и сокращению ареала хвойных деревьев. Известно, что представители семейства березовые являются пионерными, почвоулучшающими растениями, которые при благоприятных условиях первыми осваивают безлесные свободные участки.

Диатомовые данные (ДЗ 1; 20.9–18.2 тыс. л. н.) также указывают на довольно холодные условия с преобладающими температурами поверхностных вод, близкими к современным весенним температурам в этом регионе. В диатомовых палеосообществах зафиксировано самое высокое по разрезу процентное содержание *T. nitzschioides* – неритического космополита (рис. 3), доминирующего в современном фитопланктоне прибрежных вод Японских островов, особенно зимой и весной (Takano, 1990). Можно предположить, что конвективное перемешивание, характерное для района отбора колонки в настоящее время, находящегося под активным влиянием зимнего муссона (Talley et al., 2003; Park et al., 2004), было более интенсивным в связи с увеличением продолжительности воздействия этого сезонного ветра во время LGM. Водные массы, поступающие из глубины, повышали соленость и количество питательных веществ в поверхностном слое. Это подтверждается доминированием неритического комплекса *Thalassiosira eccentrica*, указывающего на более высокое содержание солей в поверхностных водах по сравнению с южной и за-

падной частями моря в это время (Oba et al. 1991; Minoura et al. 2012). Именно для этого интервала зафиксированы самые высокие нагрузки этого таксона, обеспечивающие соответствующие показатели PC1 (рис. 4). Наивысший процент сублиторальных бентосных диатомей, установленный для времени LGM (рис. 3, 5), может свидетельствовать о привносе в район отбора колонки представителей этой экологической группы течениями из северных районов моря, где во время этого похолодания зона шельфа была, пожалуй, самой протяженной.

Увеличение содержания пыльцы *Larix* (ПЗ 2; 16.4–15.6 тыс. л. н.) фиксирует наиболее холодные климатические условия. Этот период соответствует событию H1. Максимум пыльцы *Picea*, спор *Sphagnum*, минимум пыльцы *Artemisia* и высокие собственные значения первого компонента в матрице PCA (рис. 2, 4, 5) указывают на более влажные условия по сравнению с LGM и распространение сфагновых болот в горах. Увеличение *Larix*, соответствующее H1, также отмечено и в пыльцевых записях с островов Хоккайдо и Сахалин (Igarashi, 2016).

Примерно в это же время (ДЗ 2; 18.2–15.8 тыс. л. н.) в ископаемых диатомовых сообществах увеличивается содержание спор рода *Chaetoceros* (рис. 3), который вместе с *R. hebetata* своими нагрузками определил значительные показатели компонента PC2 (рис. 4). Активное размножение видов этого рода в Японском море отмечается для современного зимне-весеннего фитопланктона (Захарков и др., 2012). Споры *Chaetoceros* также были обильны в одновозрастных отложениях северо-восточной части моря, вблизи пролива Цугару (Khim et al., 2005). Увеличение представителей рода *Chaetoceros* ssp. и океанических таксонов (рис. 3) отражает как начавшийся подъем уровня моря, так и приток вод из Тихого океана не только через Цусимский пролив, но и впадающую в это время через пролив Цугару ветвь течения Оясио (Oba et al., 1991; Ikeda et al., 1999). Для этого периода в колонке LV 53-29 зафиксировано незначительное увеличение видового разнообразия и численности холодноводных океанических таксонов; увеличивается содержание *Thalassiosira antarctica* Comber (рис. 3), появление которой связывается с формированием морского льда (Pike et al., 2009). Её участие в диатомовых палеосообществах фиксирует появление сезонных льдов, которые могли быть транспортированы течениями из северных районов моря. Вместе с тем снижается содержание представителей комплекса *Thalassiosira eccentrica*. Повидимому, температура поверхностных вод пока ещё была ниже современной, а соленость несколько уменьшилась по сравнению с предыдущим периодом. Можно предположить, что се-

зоны, особенно весна и осень, стали более выраженными, т. к. виды, образующие сезонную сукцессию диатомей: *T. Antarctica* → *Chaetoceros* ssp. → *R. hebetata* (Tsukazaki et al., 2013), присутствуют в осадках. Вывод о проявлении сезонности в это время сделан и по данным спорово-пыльцевого анализа отложений с севера о. Сахалин (Leipe et al., 2015).

Увеличение содержания пыльцы *Quercus* и спор папоротников Polypodiaceae (ПЗ 3; 15.6–13.1 тыс. л. н.) указывает на потепление ВА, о чем свидетельствует и снижение собственных значений корреляционной матрицы второго компонента (рис. 2, 5). Относительно высокое содержание *Artemisia* предполагает наличие обширных площадей с открытыми ландшафтами. Это время можно считать началом формирования смешанных хвойно-широколиственных лесов в Приморье. В Южной Корее резкое увеличение спор Polypodiaceae известно как признак смены растительности во время последней дегляциации (Chung et al., 2010).

С 15.8 до 13.2 тыс. л. н. (ДЗ 3) в морском фитопланктоне возрастает (до самых высоких значений) обилие холодноводной океанической *R. hebetata* (рис. 3). Скорее всего, хотя температура поверхностных вод была низкой, их солёность несколько увеличилась по сравнению с предыдущим временным интервалом. В это время возрастают обилие и разнообразие теплоумеренных видов *C. radiatus*, *C. divisus* и *T. frauenfeldii* и др., что нашло отражение на увеличении показателей РСЗ (рис. 4, 5). Это может свидетельствовать о некотором повышении температуры и солёности поверхностных вод.

В палиноспектрах ПЗ 4 (13.1–11.7 тыс. л. н.) увеличивается содержание пыльцы *Picea*, *Larix*, Ericaceae и спор *Sphagnum* (рис. 2). Данные изменения явились реакцией растительности на похолодание YD, которое прервало начавшуюся перестройку растительности. Участие *Picea* и *Larix* в лесах увеличилось, хотя и не так значительно, как во время Н1. В горных долинах широкое распространение получили сфагновые болота и вересковые заросли. В палиноспектрах снижается содержание пыльцы трав, что свидетельствует о сокращении открытых пространств, занятых травянистыми ассоциациями. Скорее всего, это связано с повышением уровня моря, остававшегося ниже современного на 60 м (рис. 5). Результаты PCA также указывают на переувлажнение и похолодание (рис. 5). Увеличение участия пыльцы *Larix* в палиноспектрах, соответствующих YD, отмечено и на о. Хоккайдо (Igarashi, 2016).

Между 13.2 и 11.3 тыс. л. н. (ДЗ 4) в диатомовых палеосообществах возрастает доля сублиторальных планктонных *P. sulcata*, *O. aurita* и неритической *T. antarctica* (рис. 3), а также суб-

литоральных бентосных таксонов (*Cocconeis scutellum* Ehrenberg, *Diploneis smithii* (Brébisson) Cleve и др.) и даже пресноводных диатомей. Именно для этого интервала отмечены высокие значения РС4 (рис. 4, 5), обеспеченные соответствующими нагрузками некоторых из перечисленных таксонов. И хотя достоверность РС4 имела низкий процент, тем не менее этот компонент оказался весьма информативным. Высокие нагрузки *R. hebetata* отразили продолжающуюся тенденцию повышения уровня моря, несмотря на похолодание. Морские воды постепенно затапливали участки шельфа, осушенные во время LGM, увеличивая площади мелководий в заливе Петра Великого, где активно стали развиваться сублиторальные планктонные диатомей. Во время YD несколько усилилось влияние зимнего муссона, направленные ветры которого стали выносить в глубоководную часть моря льды с прикрепленными к нижней их поверхности створками сублиторальных, как планктонных, так и бентосных видов.

После 11.7 тыс. л. н. (ПЗ 5; 11.7–10.8 тыс. л. н.) пыльцевая летопись и изменения собственных значений корреляционной матрицы второго компонента (рис. 2, 4, 5) зафиксировали улучшение климатических условий. Началось распространение *Betula*, *Quercus* и сокращение ареалов *Picea*, *Pinus* и *Larix*. С этого времени наблюдается необратимая трансформация позднеледниковых ландшафтов.

С 11.3 по 10.1 тыс. л. н. (ДЗ 5) несколько возрастает содержание умеренно-тепловодных *C. radiatus* и *T. frauenfeldii* (рис. 3), а также показатели собственных значений РСЗ (рис. 4, 5). Эти данные отражают небольшое повышение температуры поверхностных вод, которое последовало за холодным YD.

Между 10.8 и 9.8 тыс. л. н. *Ulmus* достигает наибольшего распространения за последние 21 тыс. л. н. (рис. 3; ПЗ 6; 10.8–9.8 тыс. л. н.). Сокращается участие *Betula*. Широколиственные *Quercus*, *Carpinus*, *Juglans*, *Fraxinus*, *Corylus* и др. постепенно расширяют территории своего обитания. Начиная с 9.8 тыс. л. н. (ПЗ 7; 9.8–4.3 тыс. л. н.) широкое распространение получили широколиственные листопадные леса с преобладанием дубов. Эти леса отличались высоким видовым разнообразием. Низкий процент пыльцы трав и спор обусловлен сокращением открытых местообитаний и образованием густых лесов. Высокий процент пыльцы лиственных деревьев в палиноспектрах, вероятно, свидетельствует о сокращении таежной зоны и о миграции вверх по горным склонам широколиственных пород. Наиболее благоприятные условия для развития этих лесов существовали между 8.8 и 5.3 тыс. л. н. Это подтверждается и результатами PCA: наблю-

даются самые низкие собственные значения второго компонента (рис. 5). В это время создаются оптимальные условия между выпадением осадков и теплообеспеченностью. После 7.8 тыс. л. н. в пыльцевой записи наблюдается постепенное повышение количества пыльцы *Pinus*. Возможно, это увеличение представляет собой расселение *Pinus koraiensis*, типичного вида современных хвойно-широколиственных лесов Приморья. После 5.3 тыс. л. н. *Pinus* становится одним из самых распространенных таксонов в лесах.

С 10.1 до 5.8 тыс. л. н. (ДЗ 6) температура и соленость поверхностных вод были близки к таковым в современное время. Об этом свидетельствует рост доли комплекса *Thalassiosira eccentrica* и процентного содержания *R. hebetata* (максимум в период 9.1–8.8 тыс. л. н.), *Chaetoceros* ssp. (рис. 3), а также повышенные значения оси PC2 (рис. 5).

После 4.3 тыс. л. н. (рис. 2; ПЗ 8; 4.3 тыс. л. н. – н. в.) палинологические данные фиксируют похолодание климата, которое привело к сокращению ареалов широколиственных деревьев. Результаты PCA также указывают на переувлажнение и похолодание, связанное с низкой инсоляцией в это время (рис. 5). В горных районах возросла роль *Picea*, *Abies*, *Larix*. В этот период сформировались современные смешанные хвойно-широколиственные леса с преобладанием *Quercus* и *Pinus*. Спорово-пыльцевая диаграмма в своей самой верхней части (рис. 2) наглядно демонстрирует высокий процент современных лесообразующих таксонов – *Picea ajanensis*, *Pinus koraiensis*, *Quercus mongolica*, *Larix dahurica*, *Betula platyphylla* (Krestov, 2003).

С 5.8 тыс. л. н. по настоящее время (ДЗ 7) содержание представителей комплекса *Thalassiosira eccentrica* несколько снижается за счет увеличения доли океанических *Coscinodiscus oculis-iridis*, *C. divisus*, *C. radiatus* и *N. seminae* (рис. 3). С 4.8 тыс. л. н. устанавливается океанографический режим, характерный для современного Японского моря (Takei et al., 2002). Именно с этого времени возрастают показатели PC3 (рис. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение пыльцы, спор и диатомей в отложениях северо-западной части Японского моря с высоким временным разрешением показало чуткую реакцию изученных микрофоссилий на климатические колебания и изменения уровня моря в позднем плейстоцене и голоцене. Зачастую эта реакция носила косвенный характер и отражала региональные особенности атмосферной и морской циркуляции, но обусловленную глобальными изменениями окружающей среды.

Палинологическая запись колонки LV 53-29 показывает основные климатические события

позднего плейстоцена – голоцена, прослеживаемые по всему миру. Повышение содержания пыльцы трав свидетельствует о засушливом климате и распространении лесостепных ландшафтов (особенно в период LGM); высокий процент участия бореальных таксонов фиксирует похолодания, увеличение концентрации пыльцы широколиственных свидетельствует о потеплениях. Продолжающееся присутствие лиственных и хвойных таксонов умеренного пояса доказывает их устойчивое участие во флоре региона на протяжении последней 21 тыс. лет. Кроме того, пыльцевые записи надежно зафиксировали переход от LGM к голоцену. Распространение *Betula* после 18.5 тыс. л. н. указывает на начало потепления, которое прервалось холодным событием H1, и было отмечено увеличением *Larix*, *Picea* и *Sphagnum*. Начало позднеледникового улучшения климата (ВА) способствовало расселению *Quercus* и папоротников Polypodiaceae. Распространение хвойных деревьев *Larix*, *Picea* и сфагновых болот сопоставляется с событием YD. Последующее распространение *Betula*, *Quercus* и *Ulmus* ознаменовало начало голоцена, когда произошли значительные изменения в растительности.

Диатомовые записи колонки LV 53-29 дают лишь косвенную информацию об изменении климата, отражая прежде всего изменения в океанографии моря, вызванные глобальными колебаниями палеоклимата. Расположение места отбора колонки в северной части моря, отличающейся активным влиянием зимних муссонов (Park et al., 2004), где холодные плотные воды формируют глубокую конвекцию (Talley et al., 2003), определяет сейчас и определяло в прошлом холодноводный характер диатомовой флоры. Как во время похолоданий, так и в периоды потеплений здесь преобладали холодноводные диатомеи; поэтому даже небольшое увеличение доли и видового разнообразия тепловодных диатомей можно рассматривать как признак улучшения климата. Интенсивность конвективного перемешивания значительно возросла во время LGM в связи с увеличением продолжительности воздействия зимнего муссона. Водные массы, поступающие из глубины, повышали соленость и количество питательных веществ в поверхностном слое. Это подтверждается относительно высокими концентрациями створок в осадках и доминированием неритического комплекса *Thalassiosira eccentrica*, указывающего на более высокое содержание солей по сравнению с поверхностными водами южной и западной частей моря в это время (Oba et al., 1991; Minoura et al., 2012).

Низкий уровень моря в позднем плейстоцене и начале голоцена изменял общую циркуляцию моря и векторы вдольбереговых течений,

транспортирующих воды, формирующиеся в мелководной зоне северо-восточной и северной частей Японского моря (зал. Петра Великого и район вблизи Татарского пролива). Незначительное увеличение сублиторальных бентосных видов зафиксировало самый низкий уровень моря во время LGM; увеличение количества сублиторальных планктонных диатомей является отражением постепенного повышения уровня моря; уменьшение обилия сублиторальных таксонов и увеличение содержания океанических видов рассматривается как реакция на приток тихоокеанских вод, поступающих не только через пролив Цусима, но и через пролив Цугару. Пыльцевые данные также косвенно информируют об изменениях уровня моря. Самый высокий процент травянистых растений отмечается в отложениях LGM и совпадает с самым низким положением уровня моря. При повышении уровня моря, уменьшении площади осушенного шельфа и смещении береговой линии снижается содержание пыльцы трав в осадках. Самый низкий процент пыльцы травянистых растений зафиксирован в голоцене, когда уровень моря был близок к современному.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность С. А. Горбаренко (ТОИ ДВО РАН) за предоставленный первичный материал и Н. П. Домре (ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН) за подготовку проб донных отложений для пыльцевого анализа. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 121031500274-4).

ЛИТЕРАТУРА

- Глезер З. И., Жузе А. П., Макарова И. В., Прошкина-Лавренко А. И., Шешукова-Порецкая В. С. Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Ленинград : Наука, 1974. Т. 1. 403 с.
- Дудов С. В. Травяная растительность побережья Японского моря (Лазовский государственный природный заповедник им. Л. Г. Капланова. Приморский край) // Растительность России. 2018. № 32. С. 19–34. DOI:10.31111/vegus/2018.32.19.
- Жузе А. П. Стратиграфические и палеогеографические исследования в северо-западной части Тихого океана. Москва : Изд-во АН СССР, 1962. 260 с.
- Захарков С. П., Лобанов В. Б., Гордейчук Т. Н., Морозова Т. В., Штрайхерт Е. А. Пространственная изменчивость хлорофилла «а» и видовой состав фитопланктона в северо-западной части Японского моря в зимний период // Океанология. 2012. Т. 52, № 3. С. 381–391.
- Зуенко Ю. И. Элементы структуры вод Японского моря // Известия ТИНРО. 1998. Т. 123. С. 262–290.
- Кожевников А. Е., Кожевникова З. В. Таксономический состав и особенности природной флоры Приморского края // Комаровские чтения. 2014. Вып. 62. С. 7–62.
- Конвалова Г. В., Орлова Т. Ю. Структура фитопланктона мелководий северо-западной части Японского моря // Биология моря. 1988. № 5. С. 10–20.
- Кубай Б. В., Мендельсон Э. А., Цурикова Т. В. Изменяется ли климат Приморского края? Владивосток : Примгидромет, 2012. 131 с.
- Куренцова Г. Э. Растительность Приханкайской равнины и окружающих ее предгорий. Москва : Изд-во АН СССР, 1962. 139 с.
- Покровская И. М. Палеопалинология. Ленинград : Недра, 1966. Т. 1. 352 с.
- Хершберг Л. Б., Михайлик Е. В., Пушкарь В. С., Вачаев Б. И. Строение, вещественный состав илистой толщи шельфа юга Приморья и перспективы ее освоения // Тихоокеанская геология. 2013. Т. 32, № 2. С. 90–99.
- Cheng H., Edwards R., Sinha A., Spötl Ch., Yi L., Chen Sh., Kelly M., Kathayat G., Wang X., Li X., Kong X., Wang Y., Ning Y., Zhang H. The Asian monsoon over the past 640,000 years and Ice Age terminations // Nature. 2016. Vol. 534. P. 640–646. DOI: 10.1038/nature18591.
- Chung C. H., Lim H. S., Lee H. J. Vegetation and climate history during the Late Pleistocene and Early Holocene from pollen record in Gwangju area, South Korea // Quaternary International. 2010. Vol. 227. P. 61–67. DOI: 10.1016/j.quaint.2010.06.002.
- Evstigneeva T. A., Cherepanova M. V., Gorbarenko S. A., Shi X., Bosin A. A., Utkin I. V. Millennial-scale environmental changes in the northwestern Japan Sea during the last glacial cycle // Boreas. 2021. Vol. 50. № 4. P. 967–982. DOI: 10.1111/bor.12484.
- Grimm E. C. TILIA-TILIA*GRAPH Computer Program. Illinois State Museum. 1992.
- Hammer Ø., Harper D. A. T., Ryan P. D. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis // Palaeontologia Electronica. 2001. Vol. 4. № 1. P. 1–9.
- Igarashi Y. Vegetation and climate during the LGM and last deglaciation on Hokkaido and Sakhalin Islands in the Northwest Pacific // Quaternary International. 2016. Vol. 425. P. 28–37. DOI: 10.1016/j.quaint.2016.05.018.
- Ikeda M., Suzuki F., Oba T. A box model of glacial-interglacial variability in the Japan Sea // Journal of Oceanography. 1999. Vol. 55. P. 483–492.
- Ishiwatari R., Houtatsu M., Okada H. Alkenone-sea surface temperatures in the Japan Sea over the past 36 kyr: Warm temperatures at the last glacial maximum // Organic Geochemistry. 2001. Vol. 32. P. 57–67. DOI: 10.1016/S0146-6380(00)00151-0.
- Khim B. K., Ikehara K., Shin Y. Unstable Holocene climate in the northeastern East Sea (Sea of Japan): Evidence from a diatom record // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2005. Vol. 216. P. 251–265. DOI: 10.1016/j.palaeo.2004.11.003.
- Krestov P. V. Forest vegetation of easternmost Russia (Russian Far East) // Forest Vegetation of Northeast Asia. Dordrecht : Kulwer, 2003. P. 93–180.
- Laskar J., Robutel P., Joutel F., Gastineau M., Correia A. C. M., Levrard B. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth // Astrono-

- my and Astrophysics. 2004. Vol. 428. P. 261–285. DOI: 10.1051/0004-6361:20041335.
- Leipe C., Nakagawa T., Gotanda K., Muller S., Tarasov P. E. Late Quaternary vegetation and climate dynamics at the northern limit of the East Asian summer monsoon and its regional and global scale controls // *Quaternary Science Reviews*. 2015. Vol. 116. P. 57–71. DOI: 10.1016/j.quascirev.2015.03.012.
- Minoura K., Akaki K., Nemoto N., Tsukawaki S., Nakamura T. Origin of deep water in the Japan Sea over the last 145 kyr // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2012. Vol. 339–341. P. 25–38. DOI: 10.1016/j.palaeo.2012.04.011.
- North Greenland Ice Core Project Members. High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period // *Nature*. 2004. Vol. 431. P. 147–151. DOI: 10.1038/nature02805.
- Oba T., Kato M., Kitazato H., Koizumi I., Omura A., Sakai T., Takayama T. Paleoenvironmental changes in the Japan Sea during the last 85,000 years // *Paleoceanography and Paleoclimatology*. 1991. Vol. 6. P. 499–518. DOI: 10.1029/91PA00560.
- Park K.-A., Chung J. Y., Kim K. Sea surface temperature fronts in the East (Japan) Sea and temporal variations // *Geophysical Research Letters*. 2004. Vol. 31. P. L07304. DOI: 10.1029/2004GL019424.
- Pike J., Crosta X., Maddison E. J., Stickley C. E., Denis D., Barbara L., Renssen H. Observations on the relationship between the Antarctic coastal diatoms *Thalassiosira antarctica* Comber and *Porosira glacialis* (Grunow) Jørgensen and sea ice concentrations during the Late Quaternary // *Marine Micropaleontology*. 2009. Vol. 73. No. 1–2. P. 14–25. DOI: 10.1016/j.marmicro.2009.06.005.
- Senju T., Shin H.-R., Yoon J.-H., Nagano Z., An H.-S., Byun S.-K., Lee C.-K. Deep flow field in the Japan/East Sea as deduced from direct current measurements // *Deep Sea Research*. 2005. Vol. 52. P. 1726–1741.
- Takano H. *Bacillariophyceae // Red Tides Organisms in Japan – An Illustrated Taxonomic Guide*. Tokyo: Uchida Rokakuho, 1990. P. 180–181.
- Takei T., Minoura K., Tsukawaki S., Nakamura T. Intrusion of a branch of the Oyashio Current into the Japan Sea during the Holocene // *Paleoceanography*. 2002. Vol. 17. P. 11–11–10. DOI: 10.1029/2001PA000666.
- Talley L. D., Lobanov V., Ponomarev V., Salyuk A., Tishchenko P., Zhabin I. Deep convection and brine rejection in the Japan Sea // *Geophysical Research Letters*. 2003. Vol. 30. № 4. P. 1159. DOI: 10.1029/2002GL016451.
- Tsukazaki C., Ishii K.-I., Saito R., Matsuno K., Yamaguchi A., Imai I. Distribution of viable diatom resting stage cells in bottom sediments of the eastern Bering Sea shelf // *Deep-Sea Research II*. 2013. Vol. 94. P. 22–30. DOI: 10.1016/j.dsr2.2013.03.020.
- Zhang W., Wu J., Wang Y., Wang Y., Cheng H., Kong X., Duan F. A detailed East Asian monsoon history surrounding the ‘Mystery Interval’ derived from three Chinese speleothem records // *Quaternary Research*. 2014. Vol. 82. P. 154–163. DOI: 10.1016/j.yqres.2014.01.010.

Поступила в редакцию 04.07.2023.

Поступила после доработки 11.07.2023.

ENVIRONMENTAL CHANGES IN THE NORTHWESTERN SECTOR OF THE SEA OF JAPAN DURING THE LAST DEGLACIATION

T. A. Evstigneeva¹, M. V. Cherepanova¹, A. V. Romanova²

¹ Federal Research Center for Terrestrial Biodiversity of East Asia, FEB RAS, Vladivostok

² Far East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok

Environment changes in the northwestern part of the Sea of Japan and adjacent land during last 21.0 kyr was reconstructed based on the analysis of pollen and diatom data with a high temporal resolution. Relatively dry climate caused a wide distribution of forest-steppe landscapes in the region between 21.0 to 16.6 ka. Boreal forests covered mountain slopes. Broad-leaved trees survived in refugia located in lower mountain belts. The low sea level during the Last Glacial Maximum (LGM) changed the general patterns in the sea circulation and longshore current directions, which transported the waters formed in the shallow areas of the northwestern and northern parts of the Sea of Japan. A slight increase in sublittoral benthic diatoms indicates the lowered sea level during the LGM. Occurrence of *Betula* indicates the start of warming after 18.5 ka; it was interrupted by the cold event Heinrich 1 and marked by the spread of coniferous *Larix*, *Picea*, and sphagnum bogs. The beginning of late glacial climatic amelioration Bølling-Allerød (BA) is contributed to dispersal of *Quercus* and Polypodiaceae ferns. The distribution of conifers *Larix* and *Picea* as well as of sphagnum bogs is correlated with the Younger Dryas (YD) cooling. Significant changes in vegetation occurred in the Holocene. The high percentage of sublittoral planktonic diatoms reflects a gradual rise in sea level during the BA and YD. A greater component of oceanic diatom species in the Holocene indicates the inflow of the Pacific waters through both the Tsushima and Tsugaru straits. Some increase in the participation and species diversity of relatively warm-water diatoms was noticed in the warming periods. The

study of pollen and diatom records demonstrates a clear response to climatic fluctuations and changes in the Sea of Japan level in the Late Pleistocene and Holocene.

Keywords: spores and pollen, diatoms, paleoclimate, sea level changes, vegetation, Sea of Japan.

REFERENCES

- Cheng, H., Edwards, R., Sinha, A., Spötl, Ch., Yi, L., Chen, Sh., Kelly, M., Kathayat, G., Wang, X., Li, X., Kong, X., Wang, Y., Ning, Y., Zhang, H., 2016. The Asian Monsoon over the Past 640,000 Years and Ice Age Terminations, *Nature*. 534, 640–646. DOI: 10.1038/nature18591.
- Chung, C. H., Lim, H. S., Lee, H. J., 2010. Vegetation and Climate History during the Late Pleistocene and Early Holocene from Pollen Record in Gwangju Area, South Korea, *Quaternary International*. 227, 61–67.
- Dudov, S. V., 2018. Grasslands of the Sea of Japan Coast (Lazovskiy Nature Reserve Named after L. G. Kaplanov. Primorsky Krai), *Vegetation of Russia*. 32, 19–34. DOI: 10.31111/vegrus/2018.32.19 [In Russian].
- Evstigneeva, T. A., Cherepanova, M. V., Gorbarenko, S. A., Shi, X., Bosin, A. A., Utkin, I. V., 2021. Millennial-Scale Environmental Changes in the Northwestern Japan Sea during the Last Glacial Cycle, *Boreas*. 50 (4), 967–982. DOI: 10.1111/bor.12484.
- Glezer, Z. I., Jousé, A. P., Makarova, I. P., Proshkina-Lavrenko, A. I., Sheshukova-Poretskaya, V. S., 1974. Diatom Algae in the USSR (Fossil and Current). Vol. 1. Leningrad, Nauka [In Russian].
- Grimm, E., 1992. TILIA-TILIA*GRAPH Computer Program. Illinois State Museum.
- Hammer, Ø., Harper, D. A. T., Ryan, P. D., 2001. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis, *Palaeontologia Electronica*. 4 (1), 1–9.
- Igarashi, Y., 2016. Vegetation and Climate during the LGM and Last Deglaciation on Hokkaido and Sakhalin Islands in the Northwest Pacific, *Quaternary International*. 425, 28–37.
- Ikeda, M., Suzuki, F., Oba, T., 1999. A Box Model of Glacial-Interglacial Variability in the Japan Sea, *Journal of Oceanography*. 55, 483–492.
- Ishiwatari, R., Houtatsu, M., Okada, H., 2001. Alkenone-Sea Surface Temperatures in the Japan Sea over the Past 36 kyr: Warm Temperatures at the Last Glacial Maximum, *Organic Geochemistry*. 32, 57–67.
- Jousé, A. P., 1962. Stratigraphic and Paleogeographic Studies in the Northwestern Pacific Ocean. Moscow, AS USSR [In Russian].
- Khershberg, L. B., Mikhailik, E. V., Pushkar, V. S., Vachayev, B. I., 2013. Structure, Material Composition of the Ilistaya Series, the South Primorye Shelf, and Its Potential Exploration, *Tikhookeanskaya Geologiya*. 32 (2), 90–99 [In Russian].
- Khim, B. K., Ikehara, K., Shin, Y., 2005. Unstable Holocene Climate in the Northeastern East Sea (Sea of Japan): Evidence from a Diatom Record, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 216, 251–265.
- Konovalova, G. V., Orlova, T. Yu., 1988. Structure of Phytoplankton in Shallow Waters of the Sea of Japan Northwestern Part, *Biologiya Morya*. 5, 10–20 [In Russian].
- Kozhevnikov, A. E., Kozhevnikova, Z. V., 2014. Taxonomic Composition and Special Features of the Natural Flora in the Primorsky Krai, *V. L. Komarov Memorial Lectures*. 62, 7–62 [In Russian].
- Krestov, P. V., 2003. Forest Vegetation of Easternmost Russia (Russian Far East), *Forest Vegetation of Northeast Asia*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 93–180.
- Kubay, B. V., Mendelson, E. A., Tsurikova, T. V., 2012. Is the Climate of Primorsky Krai Changing? Vladivostok, Primgidromet [In Russian].
- Kurentsova, G. E., 1962. Vegetation of the Khanka Plain and Surrounding Foothills. Moscow, AS USSR [In Russian].
- Laskar, J., Robutel, P., Joutel, F., Gastineau, M., Correia, A. C. M., Levrard, B., 2004. A Long-Term Numerical Solution for the Insolation Quantities of the Earth, *Astronomy and Astrophysics*. 428, 261–285.
- Leipe, C., Nakagawa, T., Gotanda, K., Muller, S., Tarasov, P. E., 2015. Late Quaternary Vegetation and Climate Dynamics at the Northern Limit of the East Asian Summer Monsoon and Its Regional and Global Scale Controls, *Quaternary Science Reviews*. 116, 57–71.
- Minoura, K., Akaki, K., Nemoto, N., Tsukawaki, S., Nakamura, T., 2012. Origin of Deep Water in the Japan Sea over the Last 145 kyr, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 339–341, 25–38.
- North Greenland Ice Core Project Members, 2004. High-Resolution Record of Northern Hemisphere Climate Extending into the Last Interglacial Period, *Nature*. 431, 147–151. DOI: 10.1038/nature02805.
- Oba, T., Kato, M., Kitazato, H., Koizumi, I., Omura, A., Sakai, T., Takayama, T., 1991. Paleoenvironmental Changes in the Japan Sea during the Last 85,000 Years, *Paleoceanography and Paleoclimatology*. 6, 499–518.
- Park, K.-A., Chung, J. Y., Kim, K., 2004. Sea Surface Temperature Fronts in the East (Japan) Sea and Temporal Variations, *Geophysical Research Letters*. 31, L07304.
- Pike, J., Crosta, X., Maddison, E. J., Stickley, C. E., Denis, D., Barbara, L., Renissen, H., 2009. Observations on the Relationship between the Antarctic Coastal Diatoms *Thalassiosira antarctica* Comber and *Porosira glacialis* (Grunow) Jørgensen and Sea Ice Concentrations during the Late Quaternary, *Marine Micropaleontology*. 73 (1–2), 14–25.
- Pokrovskaya, I. M., 1966. Paleopalynology. Leningrad, Nedra [In Russian].
- Senjyu, T., Shin, H.-R., Yoon, J.-H., Nagano, Z., An, H.-S., Byun, S.-K., Lee, C.-K., 2005. Deep Flow Field in

the Japan/East Sea as Deduced from Direct Current Measurements, *Deep Sea Research*. 52, 1726–1741.

Takano, H., 1990. Bacillariophyceae, *Red Tides Organisms in Japan – An Illustrated Taxonomic Guide*. Tokyo, Uchida Rokakuho, 180–181.

Takei, T., Minoura, K., Tsukawaki, S., Nakamura, T., 2002. Intrusion of a Branch of the Oyashio Current into the Japan Sea during the Holocene, *Paleoceanography*. 17, 11-1–11-10. DOI: 10.1029/2001PA000666.

Talley, L. D., Lobanov, V., Ponomarev, V., Salyuk, A., Tishchenko, P., Zhabin, I., 2003. Deep Convection and Brine Rejection in the Japan Sea, *Geophysical Research Letters*. 30 (4), 1159.

Tsukazaki, C., Ishii, K.-I., Saito, R., Matsuno, K., Yamaguchi, A., Imai, I., 2013. Distribution of Viable Dia-

tom Resting Stage Cells in Bottom Sediments of the Eastern Bering Sea Shelf, *Deep-Sea Research*. 94, 22–30.

Zakharkov, S. P., Lobanov, V. B., Gordeichuk, T. N., Morozova, E. A., Shtraikhert, E. A., 2012. Spatial Variability of the Chlorophyll and the Specific Structure of the Phytoplankton in the Northwestern Part of the Sea of Japan during the Winter Period, *Oceanology*. 52 (3), 354–363.

Zhang, W., Wu, J., Wang, Y., Wang, Y., Cheng, H., Kong, X., Duan, F., 2014. A Detailed East Asian Monsoon History Surrounding the ‘Mystery Interval’ Derived from Three Chinese Speleothem Records, *Quaternary Research*. 82, 154–163. DOI: 10.1016/j.yqres.2014.01.010.

Zuenko, Yu. I., 1998. Structure Elements of the Sea of Japan Waters in Its Northwestern Part, *Izvestiya TINRO*. 123, 262–290 [In Russian].