



<https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-1-0345>

## LATE HOLOCENE SEDIMENTATION IN ACTIVE GEOLOGICAL STRUCTURES OF THE CHUKCHI SEA

E. G. Vologina<sup>1</sup>, I. A. Kalugin<sup>2</sup>, A. V. Dar'in<sup>2</sup>, A. S. Astakhov<sup>3</sup>,  
M. Sturm<sup>4</sup>, G. P. Chernyaeva<sup>1</sup>, N. V. Kulagina<sup>1</sup>, A. N. Kolesnik<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, Russia

<sup>3</sup> V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far East Branch of RAS, Vladivostok, Russia

<sup>4</sup> Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, EAWAG, Dübendorf, Switzerland

**Abstract:** The article presents the detailed analysis results considering bottom sediments from the Chukchi Sea. Two core samples, b16 and HC-8 were taken from the northern Herald Canyon 150 km northeast from NE Wrangel Island. Core b16 has been studied in more detail. According to the <sup>210</sup>Pb measurements, the recent sedimentation rate amounts to 0.9 mm/y<sup>-1</sup> at the sampling point. In the bottom layer of the core sample, the minimum concentrations of biogenic components (SiO<sub>2bio</sub>, C<sub>org</sub>, N<sub>tot</sub>, and Br) and the increased concentrations of cold-water diatom species *Thalassiosira antarctica* may result from low biological productivity during the Maunder Minimum. A correlation with recent global warming (11–22 years) is shown by the increased concentrations of SiO<sub>2bio</sub>, C<sub>org</sub>, N<sub>tot</sub>, and Br and the decreased values of magnetic susceptibility and X-ray density in the top layer (1–2 cm) of the same core sample. The results of our geochemical and diatom analysis support the available literature data and confirm that the Late Holocene sedimentation in the Chukchi Sea takes place in the zone wherein the water transits from the Pacific to the Arctic Ocean.

**Key words:** Chukchi Sea; bottom sediments; recent sedimentation rate; elemental composition; diatoms; pollen; climate reconstruction

### RESEARCH ARTICLE

**Handling Editor:** K.G. Levi

**Received:** June 8, 2017

**Revised:** October 19, 2017

**Accepted:** November 13, 2017

**For citation:** Vologina E.G., Kalugin I.A., Dar'in A.V., Astakhov A.S., Sturm M., Chernyaeva G.P., Kulagina N.V., Kolesnik A.N., 2018. Late Holocene sedimentation in active geological structures of the Chukchi Sea. *Geodynamics & Tectonophysics* 9 (1), 199–219. doi:10.5800/GT-2018-9-1-0345.

**Для цитирования:** Вологина Е.Г., Калугин И.А., Дарьин А.В., Астахов А.С., Штурм М., Черняева Г.П., Кулагина Н.В., Колесник А.Н. Позднеголоценовое осадконакопление в активных геологических структурах Чукотского моря // *Геодинамика и тектонофизика*. 2018. Т. 9. № 1. С. 199–219. doi:10.5800/GT-2018-9-1-0345.

## ПОЗДНЕГОЛОЦЕНОВОЕ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЕ В АКТИВНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ ЧУКОТСКОГО МОРЯ

Е. Г. Вологина<sup>1</sup>, И. А. Калугин<sup>2</sup>, А. В. Дарьин<sup>2</sup>, А. С. Астахов<sup>3</sup>,  
М. Штурм<sup>4</sup>, Г. П. Черняева<sup>1</sup>, Н. В. Кулагина<sup>1</sup>, А. Н. Колесник<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

<sup>4</sup> Швейцарский федеральный институт науки и технологии окружающей среды, Дюбендорф, Швейцария

**Аннотация:** Представлены результаты комплексного исследования вещественного состава донных осадков, вскрытых двумя кернами в северной части каньона Геральд Чукотского моря. Одна из полученных колонок была выбрана для более детального исследования. Скорость современного осадконакопления в точке отбора этого керна, измеренная по <sup>210</sup>Pb, составляет 0.9 мм/год. Минимальные концентрации биогенных компонентов (SiO<sub>2</sub>биог., Сорг., Нобщ., Br) и увеличение содержаний холодноводного вида диатомей *Thalassiosira antarctica* в нижнем слое колонки, вероятно, объясняются низкой биологической продуктивностью во время минимума Маундера. Повышенные концентрации SiO<sub>2</sub>биог., Сорг., Нобщ., Br, пониженные значения магнитной восприимчивости и рентгеновской плотности в самом верхнем интервале разреза (до 1–2 см) соответствуют последним 11–22 годам глобального потепления климата. Результаты геохимического и диатомового анализов подтверждают имеющиеся в литературе данные о том, что позднеголоценовая седиментация в Чукотском море происходит в зоне транзита тихоокеанских вод в Северный Ледовитый океан.

**Ключевые слова:** Чукотское море; донные отложения; скорость современного осадконакопления; элементный состав; диатомеи; пыльца; реконструкция климата

### 1. ВВЕДЕНИЕ

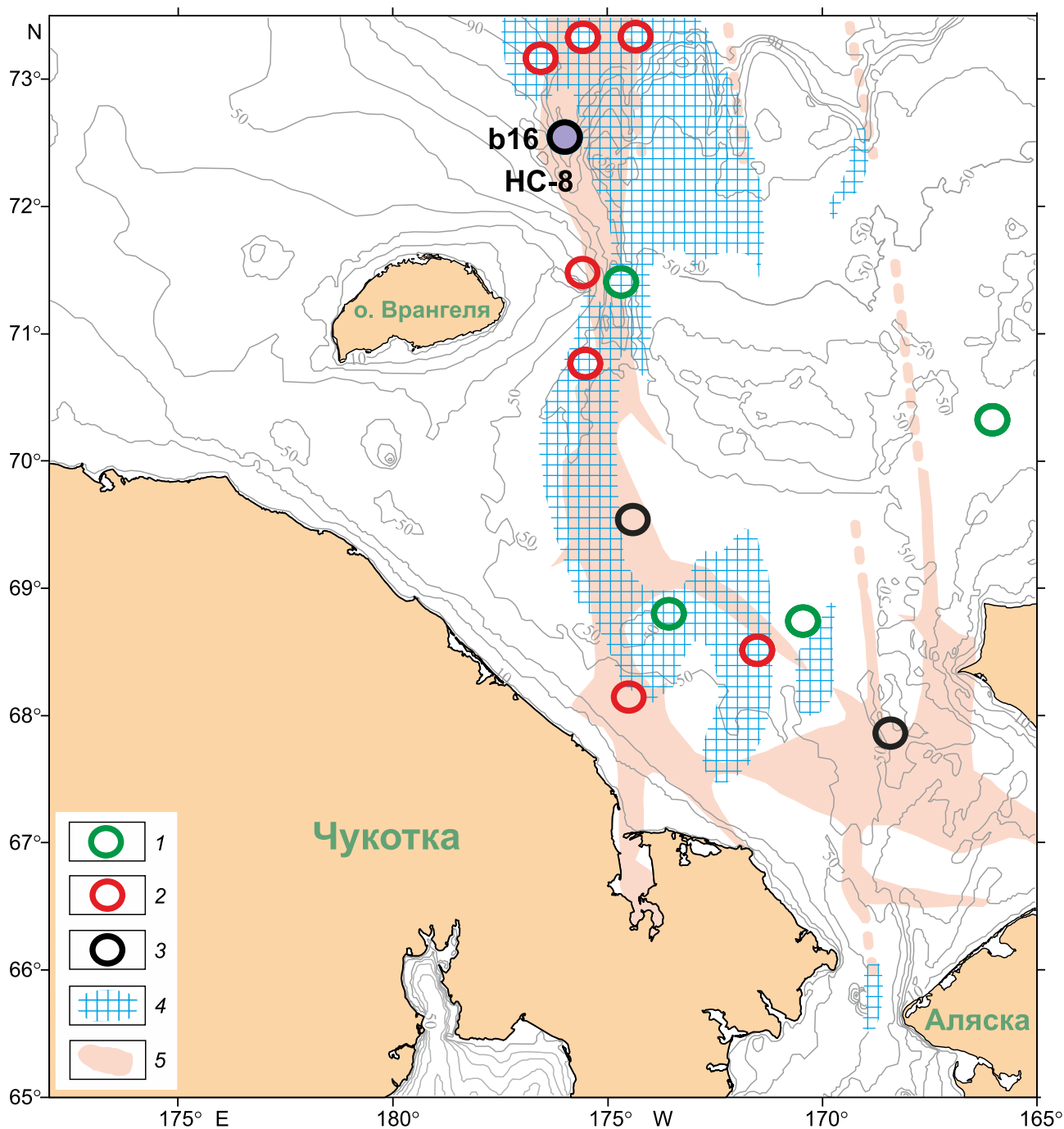
Колебания климата на планете, в значительной мере обусловленные изменениями инсоляции и орбитальных циклов Земли, оказывают существенное влияние на седиментацию в бассейнах Северного полушария [Levitan et al., 2007; Tsoy et al., 2017]. Для понимания причин, вызывающих климатические флуктуации, проведения палеореконструкций и долгосрочных прогнозов необходимо детальное изучение процессов голоценового осадконакопления, в том числе с учетом влияния геологических факторов. Актуальность этих исследований возрастает в условиях современного потепления климата на планете, которое является неоспоримым фактом [Brohan et al., 2006; Wilson et al., 2007] и ведет к значительным изменениям природной среды. Так, в последние десятилетия отмечается резкое сокращение площади морского льда в Северном Ледовитом океане. В Чукотском море, принадлежащем к группе восточноарктических морей и являющемся окраинным морем Северного Ледовитого океана, наблюдаются как изменения среднегодовой температуры воздуха [Stone, 1997], так и

уменьшение площади ледяного покрова в северной части в летний сезон [Crane, 2005].

В статье приводятся новые данные комплексного изучения двух колонок донных осадков из Чукотского моря, отобранных в пределах неотектонической структуры Чукотский грабен. Предварительные результаты были частично опубликованы в работах [Vologina et al., 2016; Astakhov et al., 2018]. Исследование выполнено с целью проведения реконструкции климатических событий последнего тысячелетия.

### 2. КРАТКАЯ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ОСОБЕННОСТИ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ

Чукотское море расположено в зоне современного растяжения земной коры (аналог лаптевоморской и байкальской зон, выделяемых на северо-востоке Азии) [Levi et al., 2009; Timofeev et al., 2012]. Активность грабен-рифтовой системы здесь проявлена в виде субмеридиональных и субширотных мезораннекайнозойских рифтогенных структур [Shipilov, 1989; Polyak et al., 2010; Timofeev et al.,



**Рис. 1.** Схема Чукотского моря с точками отбора кернов b16, HC-8 и информацией по химическому составу донных осадков. 1–3 – станции с аномальным содержанием металлов [Astakhov et al., 2015a]: 1 – сидерофилы (Fe, Ni, Co, Cr), 2 – сульфобилы (Mo, Cd, Zn, Ag, Au, Hg), 3 – платиновая группа (Pt, Ru); 4 – район с повышенным содержанием органического углерода ( $C_{org}/Al > 0.3$ ); 5 – грабен-рифтовая система Чукотского моря [Shipilov, 1989].

**Fig. 1.** Schematic map of the Chukchi Sea. The b16 and HC-8 core sampling points and the chemical compositions of the bottom sediments are shown. 1–3 – stations with the anomalous contents of metals [Astakhov et al., 2015a]: 1 – siderophiles (Fe, Ni, Co, and Cr), 2 – sulfophiles (Mo, Cd, Zn, Ag, Au, and Hg), 3 – platinum group (Pt, and Ru); 4 – area with the higher concentration of organic carbon ( $C_{org}/Al > 0.3$ ); 5 – graben-rift system of the Chukchi Sea [Shipilov, 1989].

2012], напоминающих систему пулл-апарт бассейнов. Среди неотектонических структур рассматриваемой системы наиболее известен Чукотский грабен [Shipilov, 1989; Alekseev, 2002], состав-

ной частью которого является желоб Геральда (рис. 1).

В Чукотском море, как и в других морях Арктического бассейна, происходит преимущественно

терригенная седиментация в условиях относительно низкого поступления материала речного стока и невысокой скорости осадконакопления. По данным Д.С. Яшина [Yashin, 2000], голоценовые осадки Чукотского моря состоят преимущественно из материала, образованного при размыве дна и при абразии берегов и только на 7 % – за счет речного стока, в том числе 2 % приходится на растворенный сток. Отличительной особенностью Чукотского моря по сравнению с другими краевыми морями Северного Ледовитого океана является достаточно высокая биопродуктивность фитопланктона и бентоса в целом и повышенные концентрации биогенного кремнезема в частности. Ряд исследователей объясняют это проникновением относительно теплых тихоокеанских вод через Берингов пролив [Ogorodnikov, Rusanov, 1978; Grebmeier et al., 2006]. В отличие от Восточно-Сибирского моря, где в осадках преобладает терригенное органическое вещество, в Чукотском море отмечается преимущественно планктоногенное [Grebmeier et al., 2006; Vetrov et al., 2008].

### 3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В 2012 г. в Чукотском море в северной части каньона Геральд в 150 км к северо-востоку от о. Врангеля были отобраны керны b16 (длина – 37 см) и HC-8 (длина – 82 см) (рис. 1). Работы выполнялись в рамках международной экспедиции на научно-исследовательском судне «Профессор Хромов». Отбор проб проводился коробчатым дночерпателем типа «boxcoer» (b16) и грунтовой трубкой GSP-2 (HC-8). Станции отбора кернов b16 и HC-8 были расположены на расстоянии около 580 м друг от друга, их координаты соответственно равны 72°32.63' с.ш., 175°59.70' з.д. и 72°32.54' с.ш., 175°58.70' з.д. Глубина моря в местах отбора составила 100 м. Проведено макроскопическое описание разрезов, сопровождаемое просмотром сфер-слайдов. Описание сфер-слайдов на световом микроскопе марки SK14 (увеличение  $\times 100$ ) включало качественную оценку гранулометрического состава терригенной части осадков и определение наличия диатомовых водорослей, спикул губок и др.

Выполнен высокоразрешающий сканирующий рентгенофлуоресцентный микроанализ на пучках синхротронного излучения (скан-РФА СИ) осадков кернов b16 и HC-8. Аналитические исследования проводились в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения на экспериментальной станции «Элементный анализ» [Dar'in et al., 2013]. Установка входит в состав ускорительного комплекса ВЭПП-3 Института ядерной физики СО РАН (г. Новосибирск). Подготовка образцов для исследова-

ния и измерение содержаний микроэлементов в колонках проводились по аттестованной методике [Dar'in, Rakshun, 2013] с шагом сканирования 500 мкм. В каждой точке количественно определялись следующие породообразующие и микроэлементы: K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Th, U. Одновременно в каждой точке проводилась оценка рентгеновской плотности образца (индикатор стабильности условий осадконакопления) как отношение упруго/неупругорассеянного на образце излучения [Dar'in et al., 2003].

Следует отметить, что отбор проб на РФА СИ по колонке HC-8 проведен на борту научно-исследовательского судна сразу после отбора керна. Опробование данного разреза на другие анализы было выполнено после экспедиции. В связи с тем, что осадки поверхностного слоя были обводненными, при транспортировке был утерян верхний интервал мощностью около 10 см.

Магнитная восприимчивость отложений измерена в колонках b16 и HC-8 с шагом 1 см с использованием поверхностного зонда марки Bartington GT-2 [Bartington Instruments..., 1995].

Диатомовый и палинологический анализы отложений проведены с шагом опробования 1 см. Всего проанализировано 19 проб (интервалы 0–1, 2–3, 4–5, ..., 36–37 см) из керна b16 и 37 – из керна HC-8 (интервалы 10–11, 12–13, 14–15, ..., 81–82 см). Для палинологического анализа использовались образцы объемом 1 см<sup>3</sup>. По методике [Rudaya, 2010; Kim et al., 2017] были добавлены две таблетки с калиброванным маркером (споры *Lycopodium*), необходимым для подсчета концентрации зерен. Пробы заливались 10%-ной HCl для удаления карбонатов, затем органическая часть осадка, содержащая пыльцу и споры, отделялась кипячением в 10%-ном растворе КОН с последующей сепарацией в тяжелой жидкости K+KdJ (удельный вес – 2.2 г/см<sup>3</sup>). Полученный осадок обрабатывался HF. Подсчет пыльцы прекращался при достижении числа маркера 500 зерен. Подготовка проб для изучения диатомей проводилась по количественной методике, разработанной в Институте океанологии РАН [Zhuze et al., 1969; Proshkina-Lavrenko, 1974]. Для определения видов использовались опубликованные работы [Bezrukov, 1969; Zhuze, 1977, 1978; Makarova, 1988; Pushkar, Cherepanova, 2001; Obrezkova et al., 2014].

В четырех пробах из керна b16 (интервалы 1–6, 10–16, 20–26, 30–36 см) и в девяти образцах из керна HC-8 (интервалы 10–15, 23–25, 33–35, 43–45, 53–55, 61–65, 70–73, 73–76, 76–70 см) проанализирован гранулометрический состав (навеска – 30 г). При этом глинистая фракция была выделена методом отмучивания, а песчано-алевритовый материал рассеян на ситах. Использована классификация обло-

мочных частиц по размеру, предложенная Л.Б. Рухиным [Rukhin, 1969]. Исследован минеральный состав фракции 0.25–0.05 мм. Минералы легкой и тяжелой фракций, разделенные в бромформе с удельным весом 2.9, определялись в иммерсионных препаратах на микроскопе МИН-8.

Так как коробчатый дночерпатель обеспечил отбор отложений с ненарушенным верхним слоем, для более детального исследования была выбрана колонка b16. В отложениях, вскрытых этим керном, были измерены содержания органического углерода ( $C_{орг}$ ) и общего азота ( $N_{общ}$ ) на CNS-газохроматографе «НЕКАТЕСН Евро АЕ» в Швейцарском федеральном институте науки и технологии окружающей среды (проанализированы 37 проб – каждый сантиметр колонки). В этом же институте выполнено определение концентраций биогенного кремнезема ( $SiO_{2биог}$ ; 37 проб) методом, описанным в работе [Ohlendorf, Sturm, 2008], и проведено датирование осадков по  $^{210}Pb$  (период полураспада 23.3 года).  $^{210}Pb$  метод позволяет определять возраст геологических объектов, образовавшихся за последние 100 лет. Пробы были отобраны с интервалом 1 см и высушены посредством вакуумного вымораживания (лиофильная сушилка с системой охлаждения до  $-50$  °С, модель Labconco FreeZone 2.5). Гамма-излучение  $^{210}Pb$  (46.5 кэВ) измерено откалиброванным полупроводниковым Ge (Li) детектором [Kulbe et al., 2005]. Скорость современного осадконакопления в точке отбора керна b16 была определена с использованием кривой распада  $^{210}Pb$  и CRS-модели [Appleby, 2001].

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

*Литологическая характеристика осадков колонки b16.* Отложения представлены алевритовыми пелитами с той или иной примесью песка (рис. 2). Осадки содержат створки диатомей и единичные спикулы губок. Цвет отложений – оливково-серый и зеленовато-серый. По всему разрезу отмечаются черные пятна и примазки гидротроилита. В знаковых количествах присутствуют углефицированные растительные остатки.

Содержание пелита изменяется от 61.2 до 68.2 %, алеврита – от 19.5 до 28.4 %. Примесь песка составляет 7.3–11.6 %. Преобладает мелко- (до 6 %) и тонкозернистый (до 3.8 %) песок. В незначительном количестве присутствуют средние (до 1 %), крупные (до 0.2 %) и грубые (до 0.8 %) песчаные фракции. В целом примесь песка максимальна в самой верхней части колонки (интервал 1–6 см). Крайне редко наблюдаются гравийные зерна.

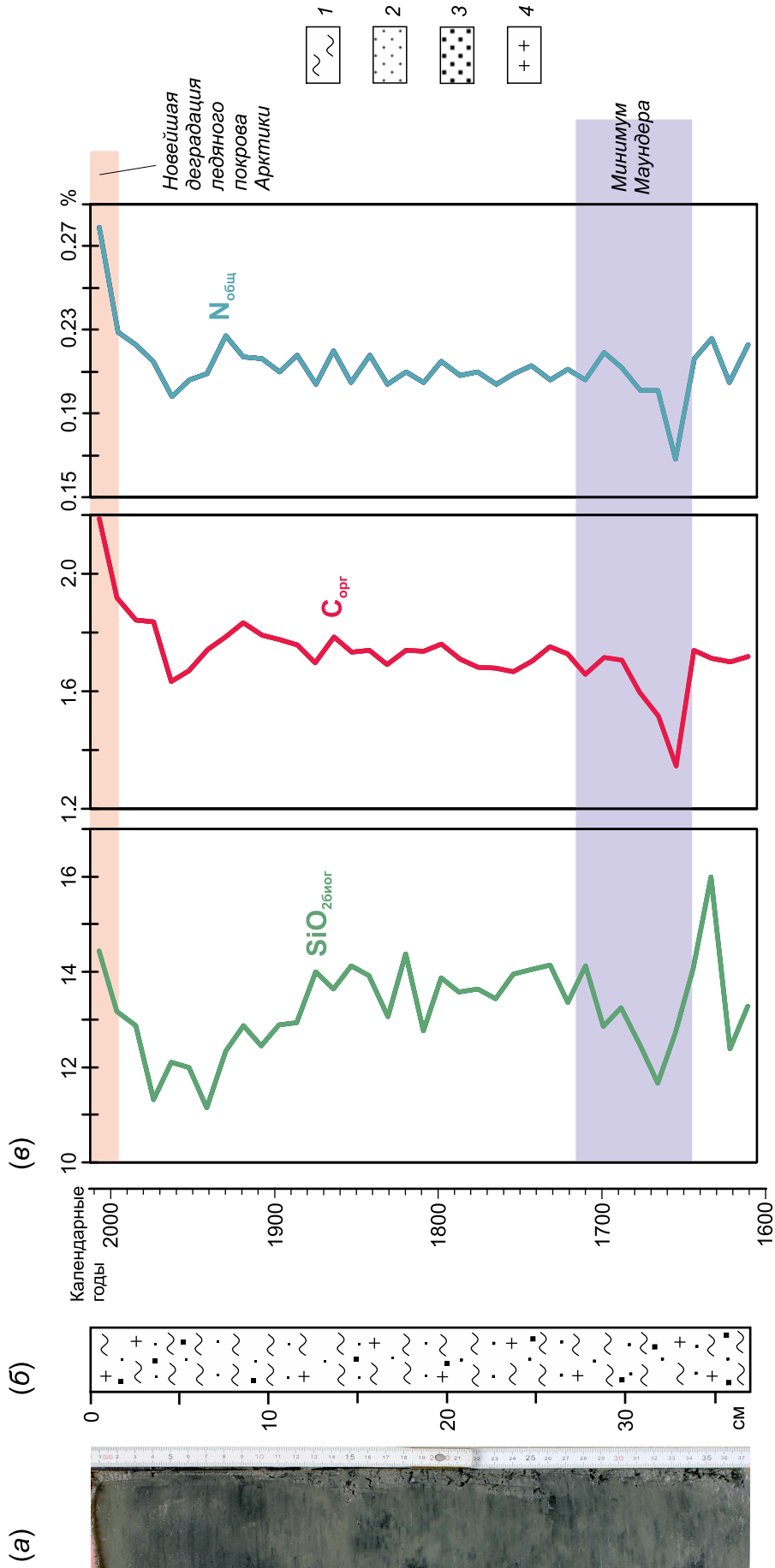
Во всех проанализированных пробах тонко- и мелкозернистого песка (размер зерен 0.25–0.05 мм)

преобладают минералы легкой фракции: кварц (42–73.2 %), плагиоклаз (12–20.8 %), калиевые полевые шпаты (2.8–7.6 %). В незначительных количествах присутствуют слюды (биотит и мусковит – до 0.8 %), хлорит (единичные знаки) и графит (единичные знаки). Кроме того, по всему разрезу в легкой фракции отмечаются обломки пород (1.6–2.4 %), а в интервале 1–6 см обнаружено значительное количество слюдисто-глинистых агрегатов (до 35.2 %). Минералы тяжелой фракции представлены эпидотом (14.8–26.4 %), лимонитом (от 0.2 % в интервале 10–16 см до 22.2 % в интервале 1–6 см), ильменитом (8.6–23.0 %), гранатом (8.4–18.8 %), сфеном (6.6–13.0 %), пироксенами (6.2–12.6 %), амфиболами (2–7 %), лейкоксеном (4.2–6.4 %), магнетитом (2.0–5.4 %). Также встречаются хлоритоид, гематит, гётит, пирит, циркон, турмалин, апатит, силлиманит, рутил, ставролит, оливин, карбонаты. Выход минералов тяжелой фракции изменяется от 0.5 до 1.0 % и прямо пропорционален содержанию песчаной фракции в осадках.

*Литологическая характеристика отложений, вскрытых керном НС-8.* Осадки состоят из пелита (65.7–78.2 %), алеврита (16.4–25.3 %), песка (2.9–8.7 %), содержат створки диатомей и спикулы губок. Цвет отложений – от оливково-зеленого до серого с черными пятнами и полосками гидротроилита. Песок представлен тонко- (до 4.8 %) и мелкозернистыми (до 4.7 %) разностями, среднезернистая фракция не превышает 1 %.

Минеральная часть легкой фракции (размерность 0.25–0.05 мм) состоит главным образом из кварца (39.2–74 %), плагиоклазов (13.2–20.4 %) и калишпатов (2.8–6.4 %). В знаковых количествах присутствуют слюды (биотит и мусковит), хлорит и графит. Почти во всех пробах отмечается значительное количество слюдисто-глинистых агрегатов (до 44.4 %). Кроме того, наблюдаются обломки пород (до 2 %), углистый материал и углефицированные растительные остатки (знаки). Содержание тяжелой фракции незначительно – от 0.2 до 0.6 %. Отмечаются эпидот (5.8–26.8 %), ильменит (11.0–25.2 %), гранаты (10.6–23.8 %), сфен (4.6–11.8 %), магнетит (2.2–10.0 %), лейкоксен (3.8–9.4 %), амфиболы (1.2–8.4 %), пироксены (1.4–8.0 %), гетит (0.4–14.6 %), пирит (0.6–6.2 %, в интервале 10–15 см – 30.8 %), гематит (1.6–6.0 %), циркон (0.8–5.4 %), хлоритоид (0.2–4.4 %). Встречаются также апатит, турмалин, рутил, биотит, карбонаты, ставролит, брукит, оливин и силлиманит.

*Магнитная восприимчивость (МВ) осадков колонки b16* изменяется от  $28 \cdot 10^{-6}$  до  $42 \cdot 10^{-6}$  единиц СИ, при этом минимальные значения фиксируются в интервале 0–2 см. МВ отложений верхних 70 см разреза НС-8 аналогична ( $24 \cdot 10^{-6}$ – $43 \cdot 10^{-6}$  единиц



**Рис. 2.** Фотография колонки (а), литологическое строение разреза (б) и содержание  $SiO_{2bio}$ ,  $C_{org}$  и  $N_{total}$  в донных осадках колонки b16 (в). 1 – пелит; 2 – алеврит; 3 – песок; 4 – диатомеи.

**Fig. 2.** Photo of core b16 (a); lithological structure of the section (b); concentrations of  $SiO_{2bio}$ ,  $C_{org}$  and  $N_{total}$  in the bottom sediments of core b16 (c). 1 – pelite; 2 – aleurite; 3 – песок; 4 – diatoms.

СИ), но затем увеличивается до  $64 \cdot 10^{-6}$  –  $69 \cdot 10^{-6}$  единиц СИ на глубине 70–82 см от поверхности керна.

Скорость современного осадконакопления в месте отбора колонки b16 составила 0.9 мм/год по изотопному  $^{210}\text{Pb}$  датированию [Vologina et al., 2016].

Содержания биогенного кремнезема, источником которого служат главным образом диатомовые водоросли, варьируются по разрезу b16 от 11.1 до 16.0 % (здесь и далее даны весовые %; рис. 2). Максимальные значения отмечаются в самой верхней части колонки до глубины 1 см (14.4 %) и на глубине 35 см (16.0 %), минимальные – на глубине 4–7 см, 32 см, 36 см. В интервале 0–5 см разреза среднее содержание  $\text{SiO}_{2\text{биог}}$  составляет 12.8 %, что приближается к максимальным значениям (13.5 %), установленным в поверхностных донных осадках Чукотского моря [Astakhov et al., 2015a]. Следует отметить, что керн b16 был отобран в районе, где наблюдаются максимальные концентрации  $\text{SiO}_{2\text{биог}}$ , связанные с поступлением тихоокеанских вод через Берингов пролив [Ogorodnikov, Rusanov, 1978].

Концентрации органического углерода и общего азота также значительно изменяются по колонке b16 (рис. 2). Минимальные содержания наблюдаются в интервалах 5–6 см (1.63–1.67 %  $\text{C}_{\text{орг}}$  и 0.20–0.21 %  $\text{N}_{\text{общ}}$ ) и 31–33 см (1.35–1.60 %  $\text{C}_{\text{орг}}$  и 0.17–0.20 %  $\text{N}_{\text{общ}}$ ), максимальные – в интервале колонки 0–1 см (2.19 %  $\text{C}_{\text{орг}}$  и 0.28 %  $\text{N}_{\text{общ}}$ ). На глубине 7–30 см концентрации  $\text{C}_{\text{орг}}$  и  $\text{N}_{\text{общ}}$  почти постоянны. В целом содержания  $\text{N}_{\text{общ}}$  в отложениях очень малы. Отношение C/N изменяется от 8.8 до 9.9, что свидетельствует о преобладании автохтонного органического вещества. Среднее содержание  $\text{C}_{\text{орг}}$  в исследованных осадках равно 1.73 %, что выше, чем среднее значение для поверхностных осадков Чукотского моря (1.25 % по данным [Astakhov et al., 2015a]). Согласно этим же данным, в районе отбора колонки b16 концентрации  $\text{C}_{\text{орг}}$  в поверхностных осадках изменяются от 1.5 до 2.0 %. Результаты, полученные нами, аналогичны – в интервале 0–3 см керна b16 эта величина составляет в среднем 1.98 %.

Результаты палинологического анализа. Число пыльцы и спор в разрезе b16 изменяется от 34 до 101 зерна (табл. 1), при этом максимальное количество отмечено в верхних 5 см. В группе древесных присутствует пыльца хвойных деревьев – *Picea obovata*, *Pinus s/g Haploxylon*, *P. s/g Diploxylon* и древовидных берез (*Betula type Albae*). Пыльца кустарников представлена кустарниковыми березами (*Betula type Nanae*), душекией (*Duschekia sp.*) и ивой (*Salix sp.*). Среди пыльцы трав обнаружены злаковые, осоковые, полынь, астровые, верескоцветные и другие. Из спор чаще всего встречаются сфагнум, реже – папоротники (*Polypodiaceae*), плауновые (*Lycopodiaceae*), плаунок наскальный (*Selagi-*

*nella rupestris*) и другие. Больше всего пыльцы и спор содержится в интервале колонки 0–1 см. Здесь также определена переотложенная пыльца *Tsuga sp.* и *Betula sp.*, не характерная для голоцена. На глубине 30–35 см отмечаются юрские споры *Cyathidites-type*.

Сумма пыльцы и спор в колонке НС–8 колеблется от 16 до 133 зерен (табл. 2). Пыльца древесных пород представлена *Abies sibirica*, *Picea obovata*, *Pinus s/g Haploxylon*, *P. sibirica*, *P. s/g Diploxylon*, *P. sylvestris*, *Betula type Albae*; кустарников – *Betula type Nanae*, *Duschekia sp.*, *Salix sp.* Из пыльцы трав присутствуют *Poaceae*, *Cyperaceae*, *Artemisia sp.*, *Asteraceae*, *Ericales* и другие. Среди спор встречены *Sphagnum sp.*, *Polypodiaceae*, *Lycopodiaceae*, *Selaginella rupestris* и другие. Выделены переотложенные формы разного возраста: четвертичные – *Tsuga sp.*, *Betula sp.*, *Picea sp.*, юрские – *Cyathidites-type*, меловые – *Cicatricosisporites*, *Gleicheniidites*, *Trilosisporites*. Наблюдается некоторое обогащение пыльцой и спорами в интервалах 30–33, 36–43, 68–79 см. На 68–79 см фиксируется больше ели, кустарниковых берез, душекии, папоротников. В интервале 36–43 см преобладают кустарниковые березы, полынь и сфагнум, в нижней части интервала – хвойные. На глубине 30–33 см отмечается более высокое содержание пыльцы хвойных пород (сосен), кустарниковых берез, душекии, полыни, осоковых, разнотравья и спор сфагнума.

Поскольку содержание пыльцы и спор в обеих колонках мало, процентные соотношения не вычислялись и диаграммы не строились.

Данные диатомового анализа. Диатомовые створки присутствуют по всей длине колонок, однако их содержание неравнозначно и изменяется в широких пределах – от 2.6 тысяч до 12.1 миллионов створок на 1 грамм воздушно-сухого осадка (тыс. ств./г и млн ств./г соответственно) в осадках керна b16 и от 13 тыс. ств./г до почти 9 млн ств./г в разрезе НС–8.

На рисунке 3, а, приведено распределение наиболее характерных и часто встреченных видов диатомей по колонке b16. В отложениях, вскрытых этим керном, выявлено 54 таксона диатомей. В видовом составе преобладают планктонные формы (61.1 %). Значительна доля неритических видов (30 %), океанические составляют около 26 %, а сублиторальные – 18.5 %. Подавляющее большинство диатомей (62.8 %) характерно для холодных вод высоких широт – это арктобореальные и суббореальные виды, составляющие вместе почти 2/3 всего видового состава. Около половины всех створок приходится на споры рода *Chaetoceros* Ehr. (от 20 до 50 %) и виды *Chaetoceros sp.* (от 2–3 до 28 %). Относительно высока доля *Coscinodiscus marginatus* Ehr. (0.5–8.3 %). Довольно часто встречается вид

Т а б л и ц а 1. Результаты палинологического анализа донных осадков, вскрытых керном b16

Table 1. Palynological analysis results for the bottom sediments sampled by core b16

Глубина, см	0-1	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-19	20-21	22-23	24-25	26-27	28-29	30-31	32-33	34-35	36-37	48
Всего зерен пыльцы и спор	101	77	82	53	46	71	56	53	55	57	55	61	45	53	34	47	48	62	48	
<i>Picea obovata</i>	6	0	5	4	3	1	7	2	4	6	4	3	4	7	3	4	4	4	4	4
<i>Pinus s/g Haploxylo</i>	1	0	0	2	0	1	0	0	1	2	2	3	0	1	0	2	0	0	0	1
<i>Pinus s/g Diploxylo</i>	1	0	1	0	1	0	0	1	3	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
<i>Betula type Albae</i>	1	0	0	1	0	2	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0
Всего зерен пыльцы деревьев	9	0	6	7	4	4	8	4	7	8	8	7	4	9	3	7	6	5	5	6
<i>Betula type Nanae</i>	19	14	16	8	11	14	6	13	8	5	8	9	3	3	2	4	7	4	4	4
<i>Duschekia sp.</i>	10	10	18	11	7	10	5	5	5	4	7	6	8	6	3	9	3	14	7	7
<i>Salix sp.</i>	1	1	1	0	0	0	1	2	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
Всего зерен пыльцы кустарников	30	25	35	19	18	24	12	20	13	9	15	15	12	9	5	14	10	18	11	11
<i>Roaceae</i>	1	5	2	1	0	2	0	0	0	0	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0
<i>Cyperaceae</i>	3	3	2	0	1	1	1	0	0	0	0	4	1	2	2	2	2	2	0	0
<i>Artemisia sp.</i>	0	4	1	1	1	0	3	0	0	1	2	1	2	2	0	1	1	0	1	1
<i>Asteraceae</i>	2	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Ericales</i>	2	1	2	0	0	4	3	2	0	0	2	3	2	2	1	3	3	3	3	3
Другие травы	1	1	1	1	2	1	1	0	1	1	1	2	1	0	1	1	1	0	0	0
Всего зерен пыльцы трав	9	14	8	4	4	9	9	3	2	2	6	13	9	6	4	7	7	5	4	4
<i>Sphagnum sp.</i>	35	30	28	20	14	30	21	20	23	29	23	20	16	26	18	14	20	26	23	23
<i>Polyodiaceae</i>	12	6	5	3	4	2	3	6	5	9	3	5	3	1	4	1	4	6	2	2
<i>Lyceodiaceae</i>	3	2	0	0	2	0	3	0	5	0	0	0	0	1	0	3	1	0	1	1
<i>Selaginella rupestris</i>	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2	1	1
Другие споры	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
Всего спор	53	38	33	23	20	34	27	26	33	38	26	26	20	29	22	19	25	34	27	27
Переотложенные	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	0	0



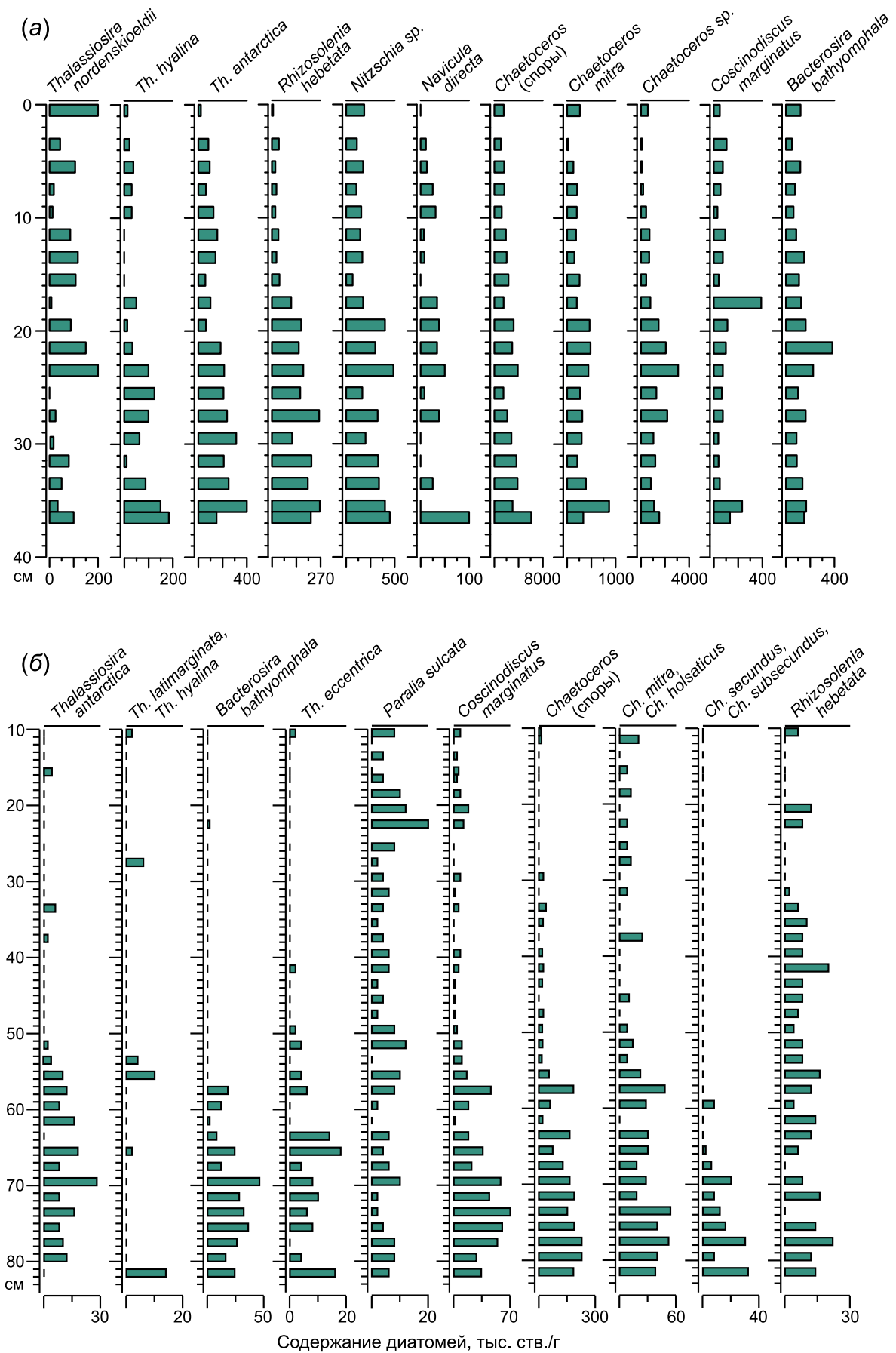
Таблица 2. Результаты палинологического анализа донных осадков, вскрытых керном НС-8

Глубина, см	10-11	12-13	14-15	16-17	18-19	20-21	22-23	24-25	26-27	28-29	30-31	32-33	34-35	36-37	38-39	40-41	42-43	44-45
Всего зерен пыльцы и спор	35	25	30	32	25	30	30	26	21	38	133	98	35	104	110	87	131	22
<i>Abies sibirica</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
<i>Picea obovata</i>	0	0	2	0	0	1	2	1	0	2	6	1	0	2	0	2	3	1
<i>Pinus s/g Haploxyton</i>	2	2	1	1	3	1	3	4	2	4	15	8	1	7	8	6	11	1
<i>Pinus sibirica</i>	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	4	0
<i>Pinus s/g Diploxyton</i>	0	1	0	1	0	1	4	2	2	4	10	5	1	2	9	5	11	2
<i>P.sylvestris</i>	2	2	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	2	0
<i>Betula type Albae</i>	1	1	1	2	0	1	0	0	1	0	2	0	1	1	3	4	2	0
Всего зерен пыльцы деревьев	5	6	5	4	5	6	9	7	5	11	33	15	3	14	23	18	33	4
<i>Betula type Nanae</i>	7	4	8	8	10	5	4	6	6	3	22	17	4	17	19	10	21	5
<i>Duschekia sp.</i>	2	1	3	5	0	6	1	1	1	2	11	11	3	9	7	5	4	1
<i>Salix sp.</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	0	0	2	3	3	3	0
Всего зерен пыльцы кустарников	9	5	11	13	10	11	5	7	7	7	36	28	7	28	29	18	28	6
<i>Poaceae</i>	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	0	2	3	3	7	0
<i>Cyperaceae</i>	3	2	1	2	1	2	0	1	2	3	7	7	1	5	0	3	3	0
<i>Artemisia sp.</i>	3	2	6	2	0	5	2	0	1	2	15	9	3	20	11	10	13	3
<i>Asteraceae</i>	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	5	2	1	3	1
<i>Ericales</i>	3	2	0	3	1	2	4	2	1	1	2	2	1	4	2	1	1	0
Другие травы	1	0	0	1	1	1	3	1	0	1	13	8	2	5	5	4	4	1
Всего зерен пыльцы трав	13	7	7	9	3	10	9	4	4	7	39	30	9	41	23	23	31	5
<i>Sphagnum sp.</i>	5	5	4	5	2	1	6	4	2	8	15	15	7	15	22	16	25	3
<i>Polypodiaceae</i>	1	2	2	1	5	0	1	0	1	2	1	3	5	3	5	4	5	2
<i>Lycopodiaceae</i>	1	0	0	0	0	1	0	2	0	1	3	3	1	0	1	3	1	1
<i>Selaginella rupestris</i>	1	0	1	0	0	1	0	2	2	2	5	4	3	2	4	2	7	0
Другие споры	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	3	3	1	1
Всего спор	8	7	7	6	7	3	7	8	5	13	25	25	16	21	35	28	39	7
Переотложенные	1	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	3	4	2	3	3	2

О к о н ч а н и е т а б л и ц ы 2

E n d o f t h e T a b l e 2

Глубина, см	46-47	48-49	50-51	52-53	54-55	56-57	58-59	60-61	62-63	64-65	66-67	68-69	70-71	72-73	74-75	76-77	78-79	80-81	81-82	
Всего зерен пыльцы и спор	34	16	28	31	59	64	71	64	39	67	47	85	119	121	127	131	114	64	49	
<i>Abies sibirica</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Picea obovata</i>	0	0	0	2	0	4	4	3	3	8	6	7	20	21	22	13	20	5	8	8
<i>Pinus s/g Haploxyton</i>	3	0	1	4	3	1	2	0	1	0	0	2	1	0	2	4	2	1	0	0
<i>Pinus sibirica</i>	0	0	1	2	2	2	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
<i>Pinus s/g Diploxyton</i>	3	0	0	1	4	1	0	1	1	0	0	0	4	4	2	3	7	3	0	0
<i>P. sylvestris</i>	0	0	0	0	2	3	2	4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Betula type Albae</i>	1	1	3	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	2	2	2	0	0	1	1
Всего зерен пыльцы деревьев	7	1	5	9	11	12	8	8	6	10	7	10	26	28	28	22	29	9	10	10
<i>Betula type Nanae</i>	7	2	8	6	11	5	7	3	10	8	9	10	8	20	8	10	11	2	4	4
<i>Duschekia sp.</i>	0	3	0	3	4	3	8	4	1	5	5	9	10	11	10	11	9	6	1	1
<i>Salix sp.</i>	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	2	1	0	0
Всего зерен пыльцы кустарников	8	5	8	10	16	8	15	7	11	13	14	20	19	31	19	21	22	9	5	5
<i>Roaceae</i>	2	0	0	0	1	0	1	2	0	1	0	1	2	1	0	2	4	0	1	1
<i>Cyperaceae</i>	2	0	0	0	2	0	1	0	1	1	0	6	3	6	7	3	0	2	0	0
<i>Artemisia sp.</i>	4	1	2	2	1	0	1	2	1	1	0	2	2	3	1	1	1	1	1	1
<i>Asteraceae</i>	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0
<i>Ericales</i>	0	0	1	0	3	5	4	1	1	1	1	2	5	3	2	11	4	2	4	4
Другие травы	2	2	0	0	1	0	0	2	1	0	0	4	2	0	0	5	2	3	1	1
Всего зерен пыльцы трав	10	3	3	2	9	5	8	7	4	4	1	17	14	13	10	22	11	9	7	7
<i>Sphagnum sp.</i>	4	3	7	6	17	30	33	30	13	26	21	25	45	35	43	44	33	26	22	22
<i>Polypodiaceae</i>	2	1	2	2	3	6	6	8	1	12	3	9	13	10	22	16	7	8	4	4
<i>Lycopodiaceae</i>	1	2	1	2	2	2	1	3	2	2	1	3	2	3	5	4	12	3	0	0
<i>Selaginella rupestris</i>	2	1	2	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1
Другие споры	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
Всего спор	9	7	12	10	23	39	40	42	18	40	25	38	60	49	70	66	52	37	27	27
Переотложенные	1	1	3	1	2	1	2	0	1	1	3	0	1	1	1	0	2	0	0	0



**Рис. 3.** Распределение наиболее характерных и часто встречающихся видов диатомей: (а) – по колонке b16, (б) – по колонке HC-8.

**Fig. 3.** Distribution of the most typical and frequent species of diatoms in the core samples: (a) – b16, (б) – HC-8.

*Ch. mitra* (Bailey) Cleve (1.1–6.2 %). В число субдоминирующих видов входят *Nitzschia sp.* (2.3–5.9 %), *Bacterosira bathyomphala* (Cleve) Syvertsen et Hasle (1.1–4.2 %), *Achnanthes brevipes* (Kütz.) cl. (0.3–3.7 %). Род *Thalassiosira* представлен в меньшей степени: *Thalassiosira antarctica* Comber (до 4.5 %), *Th. nordenskioldii* Cl. (до 4.0 %), *Th. hyalina* (Grun.) Gran. (до 2.5 %) и др. Присутствуют вымершие в плейстоцене древние виды *Th. nidulus* (Temp. et Grun.) Jouse, *Actinocyclus ochotensis* Jouse. Максимальное содержание створок большинства видов отмечается в нижней части колонки, где доминируют арктобореальные, холодолюбивые виды рода *Thalassiosira*: *Th. antarctica*, *Th. nordenskioldii*, *Th. hyalina*, а также *Bacterosira bathyomphala*, *Coscinodiscus marginatus*, *Actinocyclus sp.*, *Paralia sulcata* (Ehr.) Cl., *Rhizosolenia hebetata* (Bail.) Gran., многочисленные представители рода *Chaetoceros*. В отложениях колонки также отмечены южно-бореальные виды *Thalassionema nitzschioides* (Grun.) Mereschowsky и *Coscinodiscus asteromphalus* Ehr.

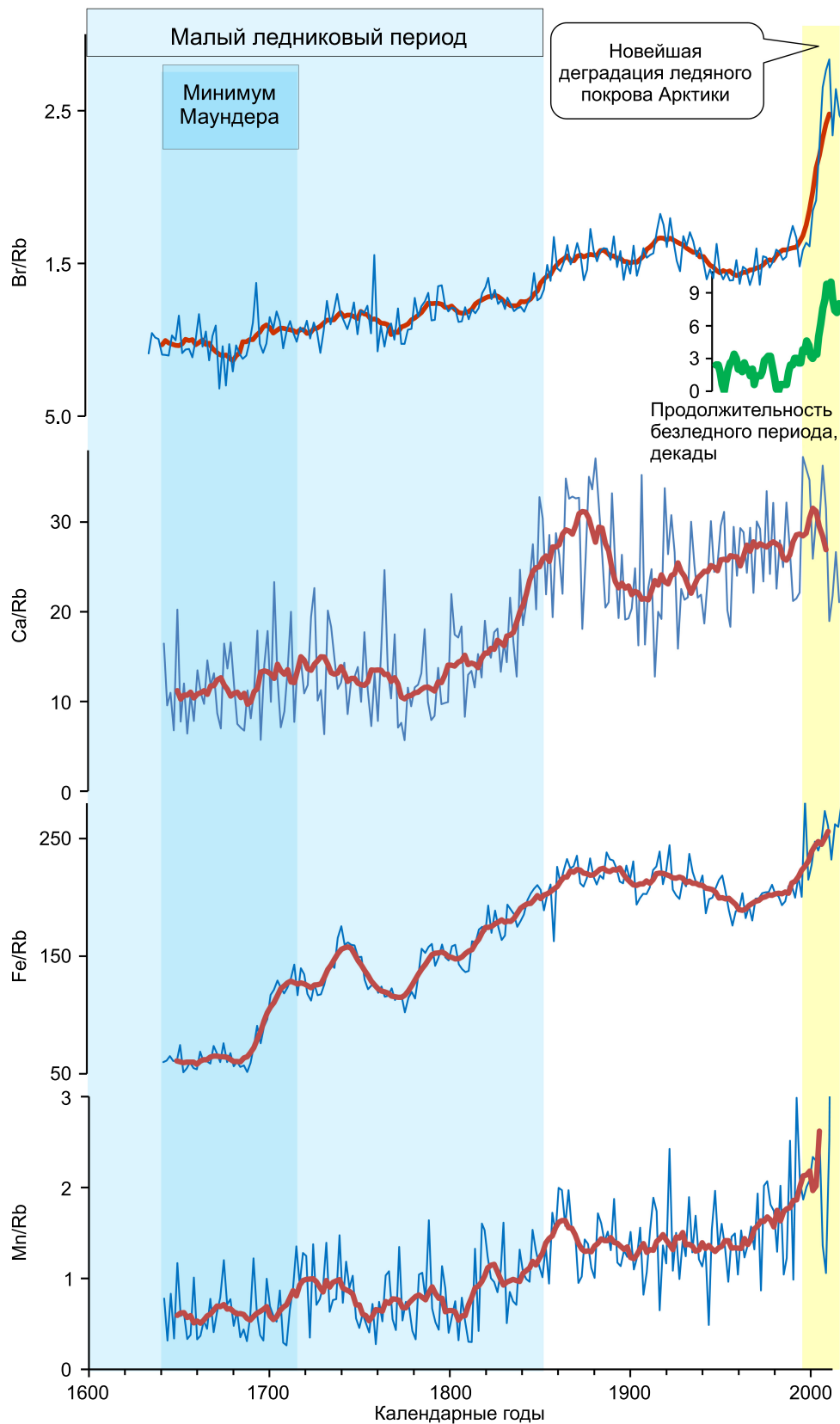
В осадках, вскрытых керном НС–8, обнаружено 66 таксонов диатомей, основная часть которых относится к родам *Thalassiosira*, *Actinocyclus*, *Coscinodiscus* (рис. 3, б). Планктонные виды доминируют и составляют 56.1 %. На долю бентических (бентосных) диатомей приходится 30.3 %. Неритические виды составляют 31.8 %, сублиторальные – 24.2 % и океанические – 19.7 %. В основном все встреченные виды морские, за исключением 13 таксонов солоноватоводных, занимающих во флоре 19.7 %. Отмечено 57.6 % арктобореальных и северо-бореальных видов, что вполне естественно для флоры этого северного (арктического) региона. Кроме того, 25.8 % (в общей сумме) приходится на долю южно-бореальных, субтропических и тропических видов. Максимальное содержание диатомей отмечено в нижней части разреза (57–82 см) – 2.51–8.93 млн ств./г. Здесь относительно велико видовое разнообразие (до 29 таксонов), чаще встречаются центрические виды *Thalassiosira*, *Actinocyclus*, *Coscinodiscus* и др., нередко появляются виды *Chaetoceros* (*Ch. mitra*, *Ch. secundus* (Grun.) Hust., *Ch. subsecundus*), единично *Rhizosolenia hebetata* Bailey, *Coscinodiscus oculus – iridis* (Ehr.) Ehr., *Bacterosira bathyomphala* (Cl.) Syvertsen et Hasle, *Podosira stelliger* (Bail.) Mann., *Thalassiosira antarctica* Comber и др. Подавляющее большинство видов встречено с минимальной оценкой обилия, т.е. единично (1.0–1.2 %). Это виды рода *Navicula*, *Cocconeis*, *Nitzschia*, а также *Chaetoceros* (*Ch. holsaticus* Schitt, *Ch. aff. coronatus* Gran. и др.), *Cyclotella*. Как и в колонке b16, часто наблюдаются споры *Chaetoceros* (от 8.0 до 51.0 %). Помимо спор с глубины 50–52 см вниз по колонке встречается вид *Ch. Mitra* в количестве 0.2–12.7 %. Его максимальное содержание (8.2–12.7 %) приходится на интервал глубин 51–56 см. В

нижней части колонки (интервал 69–70 см) определены другие представители этого рода – *Ch. secundus* (0.3–0.9 %) и *Ch. subsecundus* (0.1–0.7 %). Встреченные диатомей рода *Chaetoceros*, а также виды *Coscinodiscus marginatus* (до 14.0 %), *Bacterosira bathyomphala* (0.3–1.0 %), *Thalassiosira antarctica* (0.5–1.2 %), *Th. hyalina* (0.3–1.1 %), *Th. nordenskioldii* (0.5–0.7 %) характеризуются как арктобореальные и северо-бореальные. В интервале глубин 58–82 см единичными створками отмечен арктобореальный вид *Navicula aff. directa* W. Sm. Здесь же встречены неритические холодноводные арктобореальные и северо-бореальные виды рода *Thalassiosira*: *Th. nordenskioldii* Cl., *Th. latimarginata* Makar., *Th. antarctica*, *Th. hyalina* и др. Их количество в среднем составляет 0.8 %. Также присутствует арктобореальный вид *Bacterosira bathyomphala* (0.3–1.0 %). В самой нижней части колонки (77–80 см) выявлены единичные створки умеренно тепловодного вида *Coscinodiscus asteromphalus* Ehr., эвритермного – *Thalassiosira eccentrica* (Ehr.) Cl., южно-бореального – *Thalassionema nitzschioides* (Grun.) Mereschowsky. Резкое снижение количества створок (142–34 тыс. ств/г) и заметное уменьшение числа видов диатомей (6–14) происходят в интервале колонки 55–56 см. Заметно сокращается разнообразие пелагических видов *Thalassiosira*, *Actinocyclus*, *Coscinodiscus*, с наивысшей оценкой обилия присутствуют только споры *Chaetoceros* (14.3–51.3 %). По всей колонке единично отмечен более древний вымерший и, вероятно, переотложенный вид *Coscinodiscus marginatus var. fossilis* Jouse. Сюда же относится и *Pyxidicula zabelinae* (Jouse) Makar. et Moiss.

Данные РФА СИ отложений колонки b16 показали рост содержаний Mn, K, Ca, Sr, Fe, Br, Ti и Rb снизу вверх по разрезу при почти постоянной рентгеновской плотности. Чтобы избежать влияния содержания воды в осадке, рассматривались отношения элементов к Rb (рис. 4), как к наиболее точно определяемому элементу, содержание которого возрастает к поверхности до 15–20 %. Результаты РФА СИ отложений, вскрытых керном НС–8, заметно отличаются от данных по колонке b16. В нижней части колонки повышены концентрации K, Fe, Ti и Rb, а в верхней – больше Br и Ca. При этом содержания Br в верхних 34 см имеют характерные «провалы» (рис. 5), возможно связанные с периодическим поступлением терригенного осадочного вещества, не содержащего морскую органику [Mayer et al., 2007].

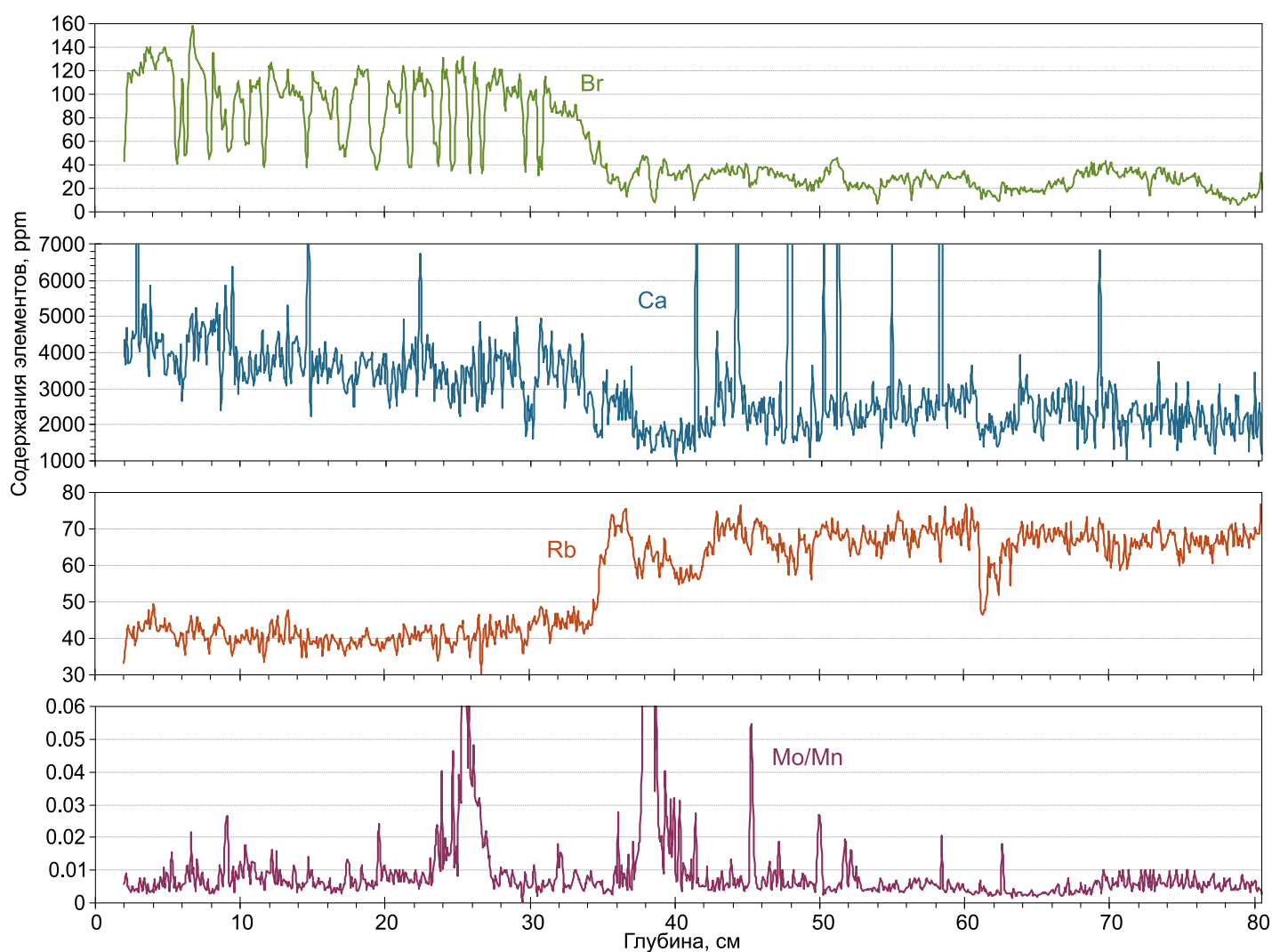
## 5. ОБСУЖДЕНИЕ

В целом однородный литологический состав и относительно постоянная МВ свидетельствуют о стабильной обстановке осадконакопления во время



**Рис. 4.** Вариации нормированных по рубидию содержаний биогенных и редокс-чувствительных элементов в колонке b16 при скорости осадконакопления 0.9 мм/год. Голубой заливкой показан временной интервал Малого ледникового периода, отдельно выделен Минимум Маундера (зеленовато-голубая заливка). Зеленой кривой показаны вариации длительности безледного периода (декады/год, сглаживание с окном 3).

**Fig. 4.** Variations in the rubidium-normalized concentrations of biogenic and redox-sensitive elements in core b16 (sedimentation rate of 0.9 mm/yr). Colour codes of time intervals: blue – the Little Ice Age, greenish-blue – Maunder Minimum; green curve – variations in the duration of the ice-free period (decade/year, data smoothing with window 3).



**Рис. 5.** Концентрации Br, Ca, Rb (ppm) и отношение Mo/Mn в донных осадках колонки HC-8.

**Fig. 5.** Concentrations of Br, Ca, and Rb (ppm) and the Mo/Mn ratio in the bottom sediments (core HC-8).

образования отложений, вскрытых кернами b16 и HC-8. Возраст изученных осадков колонки b16, согласно измеренной скорости современного осадконакопления (0.9 мм/год), составляет примерно 400 лет, что соответствует интервалу от Малого ледникового периода до наших дней. Данные диатомового и палинологического анализов, а именно видовой состав диатомей, пыльцы и спор, позволяют сделать вывод о голоценовом возрасте осадков, вскрытых керном HC-8.

Темпы современного осадконакопления по изотопному  $^{210}\text{Pb}$  датированию в разных районах Чукотского моря изменяются от 0.5 до 5.4 мм/год [Baskaran, Naidu, 1995; Ma et al., 2008; Fox et al., 2014]. Несколько меньшие темпы осадконакопления (0.1–0.7 мм/год) получены по результатам радиуглеродного датирования верхних 1–2 м слоев отложений южной части Чукотского моря [Gusev et al., 2014]. Установленная нами скорость современ-

ной седиментации лучше согласуется с этими данными.

В колонке b16 концентрации всех биогенных компонентов ( $\text{SiO}_{2\text{биог}}$ ,  $\text{C}_{\text{орг}}$ ,  $\text{N}_{\text{общ}}$ ) повышены в интервале 0–1 см. Кроме того, на глубине 0–2 см наблюдаются минимальные значения MB, что может указывать как на уменьшение доли терригенного материала, так и на увеличение биогенной немагнитной составляющей. Возраст отложений, соответствующих верхним 1–2 см керна, составляет примерно от 11 до 22 лет. Сокращение площади морского льда в Арктике за последние годы [National Snow and Ice Data Center, 2017], связанное с глобальным потеплением климата, явилось, вероятно, причиной возросшей биологической продуктивности Чукотского моря, чем и объясняются высокие содержания  $\text{SiO}_{2\text{биог}}$ ,  $\text{C}_{\text{орг}}$  и  $\text{N}_{\text{общ}}$  в самой верхней части колонки (см. рис. 2). Для верхних 1.5 см разреза характерны также максимальные концентрации Br

[Vologina et al., 2016; Astakhov et al., 2018], который, как известно, является биофильным элементом и характеризует содержание морской органики в осадках [Mayer et al., 2007]. Кроме того, в верхней части колонки отмечается несколько повышенное содержание песчаной примеси предположительно ледового разноса, что может быть связано с более интенсивным таянием льдов в этом районе в последние десятилетия. Минимальные содержания биогенных компонентов на глубине колонки 31–33 см, возможно, объясняются низкой биологической продуктивностью во время Минимума Маундера. Малые концентрации Br, характерные для этого интервала, подтверждают сделанный вывод.

Малочисленность спор и пыльцы в изученных осадках, обусловленная, вероятно, расположением станций пробоотбора далеко от побережий, не позволяет сделать выводы о динамике развития растительности. На формирование состава пыльцы и спор, вероятно, оказывали влияние воздушный перенос и поверхностные водные потоки с близлежащего о. Врангеля. По преобладанию пыльцы кустарниковых берез, душекии, ивы, спор сфагнума, папоротников с сопутствующими травами можно судить о лесотундровом и тундровом типе растительности, близком к современному растительному покрову о. Врангеля [Petrovsky, 1978]. Пыльца древесных пород (особенно хвойных) поступала с ветровым заносом, речными потоками с побережий. Разновозрастные миоспоры (четвертичные, меловые, юрские) являются переотложенными. В керне b16 максимальное количество пыльцы и спор отмечено в самых верхних 5 см (см. табл. 1), что соответствует примерно последним 50–60 годам в условиях понижения ледовитости и, таким образом, более длительной экспозиции открытой воды.

Сравнивая результаты изучения диатомей в отложениях колонок b16 и НС–8, можно отметить почти идентичный видовой состав, в котором четко прослеживается преобладание холодолюбивых видов – арктобореальных, северных и северо-бореальных. Особенностью диатомовых комплексов в изученных осадках является повышенное содержание диатомей рода *Chaetoceros* и спор этого рода. Подобные комплексы [Obrezkova et al., 2014] характерны для каньона Геральд и узкой зоны к югу от него, совпадающих с неотектоническим прогибом Чукотский грабен. Повышенные содержания биогенных компонентов в этом районе объясняются наличием различных водно-газовых (не исключая гидротермальных) источников вещества (Fe, Si, CH<sub>4</sub> и др.), стимулирующих первичную биопродуктивность [Astakhov et al., 2015a], в том числе диатомей рода *Chaetoceros*, реагирующих на содержание железа в воде [Ren et al., 2014]. С этим могут быть сопряжены очень высокие и, возможно, максимальные для

Северного Ледовитого океана содержания биогенного кремнезема в осадках (см. рис. 2).

Характер распределения диатомей отражает общую закономерность: максимальное содержание диатомовых створок относится к нижней части разрезов с последующим резким уменьшением обилия диатомей вверх по обеим колонкам. Влияние климатических изменений на формирование комплексов диатомей может быть продемонстрировано распределением холодноводного неритического вида *Thalassiosira antarctica* и других представителей «холодного комплекса». *Th. antarctica* является доминирующим видом в поверхностных осадках восточной части Восточно-Сибирского моря [Astakhov et al., 2015a], для которого характерны сильное распреснение вод и почти круглогодичный ледяной покров. Увеличение содержаний *Th. antarctica* и других арктобореальных и криофильных диатомей в нижней части колонки b16 согласно возрастной шкале свидетельствует о более суровых ледовых условиях во время Малого ледникового периода, особенно в его наиболее холодный интервал – Минимум Маундера.

Таким образом, данные диатомового анализа отложений обеих колонок, а именно изменения видового состава и, главным образом, количественного содержания створок в осадках, позволяют выделить два этапа осадконакопления. Во время формирования осадков нижней части колонок были, без сомнения, более низкие температуры. Преобладание в видовом составе истинно планктонных форм указывает на большое пространство открытой воды в районе исследования, достаточную освещенность и необходимое содержание питательных веществ.

Присутствие южно-бореальных, субтропических и тропических видов среди холодноводных диатомей в осадках колонок b16 и НС–8 связано, по всей вероятности, с их привнесением через Берингов пролив [Astakhov et al., 2015a]. Наличие древних диатомей в изученных разрезах является свидетельством их переноса из размываемых древних отложений и последующего переотложения.

Данные РФА СИ указывают на значительные изменения элементного состава по разрезам. На рисунке 4 показаны вариации нормированных по рубидию содержаний биогенных и редокс-чувствительных элементов в колонке b16. Пониженные значения Br/Rb, Ca/Rb, Fe/Rb и Mn/Rb характерны для временного интервала, аналогичного по проявлению Малому ледниковому периоду. В верхней части разреза, предположительно соответствующей современному потеплению, эти значения повышены. При этом максимальная величина Br/Rb приходится на интервал последних лет и прямо пропорциональна длительности безледного

периода (см. рис. 4). Бром, как уже отмечалось, отражает накопление морского органического вещества [Mayer et al., 2007]. Возрастание Br/Rb свидетельствует об увеличении солености, так как содержание брома в морской воде и органике больше, чем в распресненной, а уменьшение ледовитости способствует взмучиванию и усиленной транспортировке глинистого вещества на современном этапе. Кальций является индикатором поступления биогенного карбонатного материала в осадки. Повышение Ca/Rb снизу вверх по разрезу, вероятно, указывает на усиление влияния теплых берингоморских вод [Vologina et al., 2016]. Вариации концентраций марганца, как индикатора редокс-условий придонных вод, указывают на уменьшение стратификации водных масс и усиление их перемешивания в современных условиях за счет сокращения ледовитости.

Геохимические данные по колонкам НС-8 и b16 заметно различаются. В середине разреза НС-8 резко выражена смена состава осадка. Если в нижней части этой колонки повышены концентрации алюмосиликатов (K, Fe, Ti и Rb), то в верхней увеличиваются содержания органического вещества (Br, Ca). Повышенное отношение Mo/Mn, как признака восстановительной обстановки, проявляет себя около границы этих слоев. В верхней части разреза НС-8 наблюдаются высокочастотные колебания содержания брома (рис. 5). Толщина прослоев с минимумом брома и амплитуда содержания отличаются от выявленных ранее подобных пиков, образованных при массовом выносе терригенного вещества в море во время катастрофических наводнений [Astakhov et al., 2015b]. В связи с этим предполагается, что такое характерное распределение брома обусловлено спецификой осадконакопления в геодинамически активной зоне с расчлененным рельефом дна. Одной из возможных причин этого может быть эпизодическое поступление со склонов каньона Геральд осадочного материала из размываемых отложений, подобных нижнему слою осадков в колонке НС-8, или из более древних континентальных отложений, не содержащих морское органическое вещество. Периодичность же этого явления может быть связана с сейсмоструктурной активностью желоба Геральд и отбором колонки НС-8 в его днище. При активизации осадок, накопившийся при размыве бортов, формирует мутьевые потоки и переоткладывается ниже по руслу желоба.

Специфические черты осадконакопления в пределах активной геологической структуры проявлены также и в других особенностях химического состава осадков колонки НС-8. Прежде всего, это резкие вариации отношения Mo/Mn (рис. 5). Значения более 0.02 считаются признаком сероводо-

родного заражения осадков [Kholodov, Nedumov, 1991]. Такие условия очень характерны для участков разгрузки водно-газовых и газовых, преимущественно метановых, источников из осадочного чехла, в том числе в Чукотском море и в каньоне Геральд [Matveeva et al., 2015]. Эти районы отличаются также повышенной продуктивностью бентосных и планктонных сообществ, что приводит к повышенному накоплению органического вещества, которое в аноксидных условиях не окисляется и в большей мере накапливается в осадках. По мнению Я.Э. Юдовича и М.П. Кетрис [Yudovich, Ketris, 1988], сероводородные (эвксинные) обстановки являются вариантом аноксидных и могут существовать только при условии постоянного привноса сероводорода из подстилающих осадков. В нашем случае резкие увеличения значений Mo/Mn, фиксирующие периоды возникновения эвксинных условий в осадках, связаны, вероятно, с активизацией геодинамических процессов, сопровождающихся поступлением метана из донных осадков в придонные воды. В целом же аноксидные обстановки и сероводородное заражение осадков не характерны для арктических морей с высоким общим содержанием кислорода в водной толще.

С эпизодическим возникновением аноксидных и эвксинных обстановок в пределах грабен-рифтовой системы связано выявленное ранее и отмечаемое в изученных разрезах повышенное содержание органического углерода в осадках. Это определяется как повышением бипродуктивности за счет дополнительной поставки эндогенными флюидами метана и некоторых элементов (например, железа), так и лучшей сохранностью органического вещества в условиях отсутствия или низкого содержания кислорода в осадках [Astakhov et al., 2015a]. Резкое преобладание в диатомовых комплексах колонки b16 остатков вида *Chaetoceros* также характерно для осадков грабен-рифтовой системы Чукотского моря [Obrezkova et al., 2014]. Продуктивность этого вида резко увеличивается при поступлении железа в водную толщу, что проявляется и в условиях его гидротермальной поставки.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам комплексных исследований вещественного состава донных осадков Чукотского моря можно сделать следующие основные выводы:

1. Донные отложения, вскрытые коробчатым дночерпателем в северной части каньона Геральд в 150 км к северо-востоку от о. Врангеля, накапливались в спокойной обстановке со скоростью 0.9 мм/год. В нижней части колонки b16 установлены минимальные концентрации биогенных ком-



понентов ( $\text{SiO}_{2\text{биог}}$ ,  $C_{\text{орг}}$ ,  $N_{\text{общ}}$ , Br) и повышенное содержание холодноводного вида диатомей *Thalassiosira antarctica*, что связано с более суровыми ледовыми условиями во время Малого ледникового периода и особенно в его наиболее холодный интервал – Минимум Маундера.

2. В поверхностных отложениях, накопленных за последние десятилетия, обнаружены повышенные количества биогенных компонентов ( $\text{SiO}_{2\text{биог}}$ ,  $C_{\text{орг}}$ ,  $N_{\text{общ}}$ , Br) и примеси песка, установлены пониженные значения магнитной восприимчивости и рентгеновской плотности. Мы связываем это с современным глобальным потеплением климата. Значительные вариации концентраций марганца могут быть связаны с интенсификацией перемешивания водных масс в условиях современного снижения ледовитости.

3. Повышение содержаний Ca снизу вверх по разрезам, вероятно, является результатом усиления роли теплых берингоморских вод, проникающих в район исследования через Берингов пролив, и, как следствие, их влияния на биопродуктивность и редокс-условия придонных вод. Наличие южно-бореальных, субтропических и тропических видов среди холодноводных диатомей в голоценовых отложениях, очевидно, также объясняется их поступлением через Берингов пролив. Таким образом, голоценовая седиментация происходила в условиях транзита тихоокеанских вод в Северный Ледовитый океан через систему течений, направленных с юга на север.

4. В нижней части колонки НС–8 отмечаются повышенные концентрации K, Fe, Ti и Rb, а в верхней – больше Br и Ca. Значительно изменяющиеся содержания Br свидетельствуют о высокочастотных (возможно, каждые одно–два десятилетия) вариациях внешних условий во время образования осадков верхних 35 см колонки.

5. Специфика осадконакопления в связи с нахождением изученных колонок в геодинамически активной зоне проявляется в повышенном содержании органического углерода в осадках, преобладании в диатомовых комплексах рода *Chaetoceros*, эпизодическом возникновении аноксидных и эвксинных обстановок и, возможно, в характерном распределении брома, фиксирующем чередование слоев обогащенных/обедненных морским органическим веществом.

## 7. БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-10109). Отбор донных осадков выполнен в российско-американской экспедиции RUSALCA-2012. Авторы признательны К. Крэйну, капитану и команде НИС «Профессор Хромов» за помощь в выполнении экспедиционных работ, М.С. Обрезковой за полезные консультации и обсуждение материалов, И. Брюннер (EAWAG) и Е.Г. Поляковой (ИЗК СО РАН) за аналитическую работу.

## 8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Alekseev M.N. (Ed.), 2002. Geology and Minerals of the Russian Shelf (Atlas). GEOS, Moscow, 425 p. (in Russian) [Геология и полезные ископаемые шельфов России (атлас) / Ред. М.Н. Алексеев. М.: ГЕОС, 2002. 425 с.].
- Appleby P.G., 2001. Chronostratigraphic techniques in recent sediments. In: W.M. Last, J.P. Smol (Eds.), Tracking environmental change using lake sediments. Vol. 1. Basin analysis, Coring, and Chronological Techniques. Dordrecht, Netherlands, Kluwer Academic Publishers, p. 171–203. [https://doi.org/10.1007/0-306-47669-X\\_9](https://doi.org/10.1007/0-306-47669-X_9).
- Astakhov A.S., Bosin A.A., Kolesnik A.N., Obrezkova M.S., 2015a. Sediment geochemistry and diatom distribution in the Chukchi Sea: Application for bioproductivity and paleoceanography. *Oceanography* 28 (3), 190–201. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2015.65>.
- Astakhov A.S., Kalugin I.A., Aksentov K.I., Dar'in A.V., 2015b. Geochemical indicators of paleo-typhoons in shelf sediments. *Geochemistry International* 53 (4), 383–388. <https://doi.org/10.1134/S0016702915040023>.
- Astakhov A.S., Vologina E.G., Dar'in A.V., Kalugin I.A., Plotnikov V.V., 2018. Reflection of global climate events of the last centuries in the chemical composition of bottom sediments of the Chukchi Sea. *Meteorology and Hydrology* (in press) (in Russian) [Астахов А.С., Вологина Е.Г., Дар'ин А.В., Калугин И.А., Плотников В.В. Отражение глобальных климатических событий последних столетий в химическом составе донных осадков Чукотского моря // *Метеорология и гидрология*. 2018 (в печати)].
- Bartington Instruments Limited, 1995. Preliminary Specification for the MS2E Sensor. Bartington Instruments Limited, Oxford, 2 p.
- Baskaran M., Naidu A.S., 1995.  $^{210}\text{Pb}$ -derived chronology and the fluxes of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  isotopes into continental shelf sediments, East Chukchi Sea, Alaskan Arctic. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59 (21), 4435–4448. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00248-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00248-X).
- Bezrukov P.L. (Ed.), 1969. Pacific Ocean. Biology of the Pacific Ocean. Microflora and Microfauna in the Modern Sediments of the Pacific Ocean. Nauka, Moscow, 203 p. (in Russian) [Тихий океан. Биология Тихого океана. Микрофлора и микрофауна в современных осадках Тихого океана / Ред. П.Л. Безруков. М.: Наука, 1969. 203 с.].

- Brohan P., Kennedy J.J., Harris I., Tett S.F., Jones P.D., 2006. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 111 (D12), D12106. <https://doi.org/10.1029/2005JD006548>.
- Crane K., 2005. Russian-American Long-term Census of the Arctic. Initial Expedition to the Bering and Chukchi Seas. Arctic Research of the United States, vol. 19, p. 73–76.
- Dar'in A.V., Kalugin I.A., Rakshun Y.V., 2013. Scanning X-ray microanalysis of bottom sediments using synchrotron radiation from the BINP VEPP-3 storage ring. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* 77 (2), 182–184. <https://doi.org/10.3103/S106287381302010X>.
- Dar'in A.V., Goldberg E.L., Kalugin I.A., Fedorin M.A., Zolotarev K.V., Maksimova N.V., 2003. The ratio of elastically and non-elastically scattered intensities on the example of synchrotron radiation – a climatically correlated paleosignal in the historical layer (1860–1996) of the bottom sediments of Lake Teletskoe. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, Sinkhrotronnye i Neitronnye Issledovaniya (Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques)* (12), 53–55 (in Russian) [Дар'ин А.В., Гольдберг Е.Л., Калугин И.А., Федорин М.А., Золотарев К.В., Максимова Н.В. Отношение интенсивностей упруго- и неупругорассеянного на образце синхротронного излучения – климатически коррелированный палеосигнал в историческом слое (1860–1996 гг.) донных осадков оз. Телецкое // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2003. № 12. С. 53–55].
- Dar'in A.V., Rakshun Ya.V., 2013. Method of measurement during determination of the elemental composition of rock samples by X-ray fluorescence analysis using synchrotron radiation from the VEPP-3 storage ring. *Science bulletin of NSTU* (2), 112–118 (in Russian) [Дар'ин А.В., Ракишун Я.В. Методика выполнения измерений при определении элементного состава образцов горных пород методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-3 // *Научный вестник Новосибирского государственного технического университета*. 2013. № 2. С. 112–118].
- Fox A.L., Hughes E.A., Trocine R.P., Trefry J.H., Schonberg S.V., McTigue N.D., Lasorsa B.K., Konar B., Cooper L.W., 2014. Mercury in the northeastern Chukchi Sea: Distribution patterns in seawater and sediments and biomagnification in the benthic food web. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 102, 56–67. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2013.07.012>.
- Grebmeier J.M., Cooper L.W., Feder H.M., Sirenko B.I., 2006. Ecosystem dynamics of the Pacific-influenced Northern Bering and Chukchi Seas in the Amerasian Arctic. *Progress in Oceanography* 71 (2–4), 331–361. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.10.001>.
- Gusev E.A., Anikina N.Y., Derevyanko L.G., Klyuvitkina T.S., Polyak L.V., Polyakova E.I., Rekant P.V., Stepanova A.Y., 2014. Environmental evolution of the southern Chukchi Sea in the Holocene. *Oceanology* 54 (4), 465–477. <https://doi.org/10.1134/S0001437014030011>.
- Kholodov V.N., Nedumov R.I., 1991. On the geochemical criteria for the occurrence of hydrogen sulfide contamination in the waters of ancient reservoirs. *Izvestiya AN SSSR, Geological Series* (12), 74–82 (in Russian) [Холодов В.Н., Недумов Р.И. О геохимических критериях появления сероводородного заражения в водах древних водоемов // *Известия АН СССР, серия геологическая*. 1991. № 12. С. 74–82].
- Kim S.Y., Polyak L., Delusina I., 2017. Terrestrial and aquatic palynomorphs in Holocene sediments from the Chukchi-Alaskan margin, western Arctic Ocean: Implications for the history of marine circulation and climatic environments. *The Holocene* 27 (7), 976–986. <https://doi.org/10.1177/0959683616678459>.
- Kulbe T., Anselmetti F., Cantonati M., Sturm M., 2005. Environmental history of Lago di Tovel, Trento, Italy, revealed by sediment cores and 3.5 kHz seismic mapping. *Journal of Paleolimnology* 34 (3), 325–337. <https://doi.org/10.1007/s10933-005-5022-4>.
- Levi K.G., Sherman S.I., San'kov V.A., 2009. Recent geodynamics of Asia: Map, principles of its compilation, and geodynamic analysis. *Geotectonics* 43 (2), 152–165. <https://doi.org/10.1134/S001685210902006X>.
- Levitan M.A., Lavrushin Yu.A., Stein R., 2007. Essays on the History of Sedimentation in the Arctic Ocean and the Subarctic Seas During the Last 130 Thousand Years. GEOS, Moscow, 404 p. (in Russian) [Левитан М.А., Лаврушин Ю.А., Штайн Р. Очерки истории седиментации в Северном Ледовитом океане и морях Субарктики в течение последних 130 тыс. лет. М.: ГЕОС, 2007. 404 с.].
- Ma H., Zeng S., Chen L., He J., Yin M., Zeng X., Zeng W., 2008. History of heavy metals recorded in the sediments of the Chukchi Sea. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait* 27 (1), 15–20.
- Makarova I.V., 1988. Diatoms in the Seas of the USSR: Thalassiosira Cl. Nauka, Leningrad, 117 p. (in Russian) [Макарова И.В. Диатомовые водоросли морей СССР: род Thalassiosira Cl. Л.: Наука, 1988. 117 с.].
- Matveeva T., Savvichev A.S., Semenova A., Logvina E., Kolesnik A.N., Bosin A.A., 2015. Source, origin, and spatial distribution of shallow sediment methane in the Chukchi Sea. *Oceanography* 28 (3), 202–217. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2015.66>.
- Mayer L.M., Schick L.L., Allison M.A., Ruttenberg K.C., Bentley S.J., 2007. Marine vs. terrigenous organic matter in Louisiana coastal sediments: The uses of bromine: organic carbon ratios. *Marine Chemistry* 107 (2), 244–254. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2007.07.007>.
- National Snow and Ice Data Center, 2017. Available from: <http://nsidc.org/arcticseaicenews/> (last accessed December 15, 2017).
- Obrezkova M.S., Kolesnik A.N., Semiletov I.P., 2014. The diatom distribution in the surface sediments of the Eastern Arctic seas of Russia. *Russian Journal of Marine Biology* 40 (6), 465–472. <https://doi.org/10.1134/S1063074014060170>.

- Ogorodnikov V.I., Rusanov V.P., 1978. Conditions for accumulation and distribution of amorphous silica in bottom sediments of the Chukchi Sea. *Okeanologiya (Oceanology)* 18 (6), 1049–1052 (in Russian) [Огородников В.И., Русанов В.П. Условия накопления и распределение аморфного кремнезема в донных осадках Чукотского моря // *Океанология*. 1978. Т. 18. № 6. С. 1049–1052].
- Ohlendorf C., Sturm M., 2008. A modified method for biogenic silica determination. *Journal of Paleolimnology* 39 (1), 137–142. <https://doi.org/10.1007/s10933-007-9100-7>.
- Petrovsky V.V., 1978. Geographical links of the flora of Wrangel Island (in connection with the problem of the Beringian land). *Botanicheskii Zhurnal (Botanical Journal)* 63 (5), 637–648 (in Russian) [Петровский В.В. Географические связи флоры острова Врангеля (в связи с проблемой Берингийской суши) // *Ботанический журнал*. 1978. Т. 63. № 5. С. 637–648].
- Polyako B.G., Lavrushin V.Y., Cheshko A.L., Prasolov E.M., Kamensky I.L., 2010. Recent tectonomagmatic reactivation of the Kolyuchino-Mechigmen zone of the Chukchi Peninsula from data on the composition of gases in hydrothermal springs. *Geotectonics* 44 (6), 529–540. <https://doi.org/10.1134/S0016852110060063>.
- Proshkina-Lavrenko A.I. (Ed.), 1974. Diatoms of the USSR. Vol. 1. Nauka, Leningrad, 403 p. (in Russian) [Диатомовые водоросли СССР / Ред. А.И. Прошкина-Лавренко. Л.: Наука, 1974. Т. 1. 403 с.].
- Pushkar V.S., Cherepanova M.V., 2001. Diatoms of the Pliocene and Anthropogen of the Northern Pacific (Stratigraphy and Paleocology). Dal'nauka, Vladivostok, 226 p. (in Russian) [Пушкарь В.С., Черепанова М.В. Диатомеи плиоцена и антропогена Северной Пацифики (стратиграфия и палеоэкология). Владивосток: Дальнаука, 2001. 226 с.].
- Ren J., Gersonde R., Esper O., Sancetta C., 2014. Diatom distributions in northern North Pacific surface sediments and their relationship to modern environmental variables. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 402, 81–103. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2014.03.008>.
- Rudaya N.A., 2010. Palynological Analysis. Teaching Manual. Novosibirsk State University, Institute of Archeology and Ethnography of SB RAS, Novosibirsk, 48 p. (in Russian) [Рудая Н.А. Палинологический анализ: Учеб.-метод. пособие. Новосибирск: Новосибирский государственный университет, Институт археологии и этнографии СО РАН, 2010. 48 с.].
- Rukhin L.B., 1969. Fundamentals of Lithology. The Concept of Sedimentary Rocks. Nedra, Leningrad, 703 p. (in Russian) [Рухин Л.Б. Основы литологии. Учение об осадочных породах. Л.: Недра, 1969. 703 с.].
- Shipilov E.V., 1989. About the graben rift system of the Chukchi Sea. *Izvestiya AN SSSR, Geological Series* (10), 96–107 (in Russian) [Шипилов Э.В. О грабен-рифтовой системе Чукотского моря // *Известия АН СССР, серия геологическая*. 1989. № 10. С. 96–107].
- Stone R.S., 1997. Variations in western Arctic temperatures in response to cloud radiative and synoptic-scale influences. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 102 (D18), 21769–21776. <https://doi.org/10.1029/97JD01840>.
- Timofeev V.Yu., Ardyukov D.G., Solov'ev V.M., Shibaev S.V., Petrov A.F., Gornov P.Yu., Shestakov N.V., Boiko E.V., Timofeev A.V., 2012. Plate boundaries in the Far East region of Russia (from GPS measurement, seismic-prospecting, and seismological data). *Russian Geology and Geophysics* 53 (4), 376–391. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.03.002>.
- Tsoy I.B., Obrezkova M.S., Aksentov K.I., Kolesnik A.N., Panov V.S., 2017. Late Holocene environmental changes in the Southwestern Chukchi Sea inferred from diatom analysis. *Russian Journal of Marine Biology* 43 (4), 276–285. <https://doi.org/10.1134/S1063074017040113>.
- Vetrov A.A., Semiletov I.P., Dudarev O.V., Peresykin V.I., Charkin A.N., 2008. Composition and genesis of the organic matter in the bottom sediments of the East Siberian Sea. *Geochemistry International* 46 (2), 156–167. <https://doi.org/10.1134/S0016702908020055>.
- Vologina E.G., Sturm M., Kalugin I.A., Darin A.V., Astakhov A.S., Chernyaeva G.P., Kolesnik A.N., Bosin A.A., 2016. Reconstruction of the conditions of Late Holocene sedimentation by integrated analysis of a core of the bottom sediments from the Chukchi Sea. *Doklady Earth Sciences* 469 (2), 841–845. <https://doi.org/10.1134/S1028334X16080183>.
- Wilson R., D'Arrigo R., Buckley B., Büntgen U., Esper J., Frank D., Luckman B., Payette S., Vose R., Youngblut D., 2007. A matter of divergence: Tracking recent warming at hemispheric scales using tree ring data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 112 (D17), D17103. <https://doi.org/10.1029/2006JD008318>.
- Yashin D.S., 2000. Holocene sedimentogenesis in the Arctic seas of Russia. In: Geological and geophysical characteristics of the lithosphere in the Arctic Region. Issue 3. VNIIOkeangeologiya, St. Petersburg, p. 57–67 (in Russian) [Яшин Д.С. Голоценовый седиментогенез арктических морей России // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. Вып. 3. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2000. С. 57–67].
- Yudovich Ya.E., Ketris M.P., 1988. Geochemistry of Black Shales. Nauka, Leningrad, 272 p. (in Russian) [Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимия черных сланцев. Л.: Наука, 1988. 272 с.].
- Zhuze A.P. (Ed.), 1977. Atlas of Microorganisms in the Bottom Sediments of the Oceans. Nauka, Moscow, 196 p. (in Russian) [Атлас микроорганизмов в донных осадках океанов / Ред. А.П. Жузе. М.: Наука, 1977. 196 с.].
- Zhuze A.P. (Ed.), 1978. Marine Micropaleontology (Diatoms, Radiolarians, Silicoflagellates, Foraminifers and Calcareous Nannoplankton). Nauka, Moscow, 255 p. (in Russian) [Морская микропалеонтология (диатомеи, радиолярии, силикофлагелляты, фораминиферы и известковый наннопланктон) / Ред. А.П. Жузе. М.: Наука, 1978. 255 с.].

Zhuze A.P., Mukhina V.V., Kozlova O.G., 1969. Diatoms and silicoflagellates in the surface layer of the sediments in the Pacific Ocean. In: P.L. Bezrukov (Ed.), Pacific Ocean. Biology of the Pacific Ocean. Microflora and microfauna in the modern sediments of the Pacific Ocean. Nauka, Moscow, p. 7–47 (in Russian) [Жузе А.П., Мухина В.В., Козлова О.Г. Диатомеи и силикофлагелляты в поверхностном слое осадков Тихого океана // Тихий океан. Биология Тихого океана. Микрофлора и микрофауна в современных осадках Тихого океана / Ред. П.Л. Безруков. М.: Наука, 1969. С. 7–47].



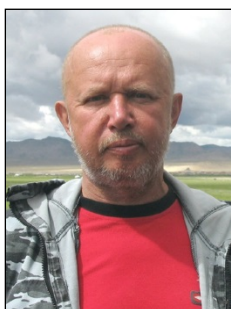
**Елена Геннадьевна Вологина**, канд. геол.-мин. наук  
Институт земной коры СО РАН  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия  
✉ e-mail: [vologina@crust.irk.ru](mailto:vologina@crust.irk.ru)

**Elena G. Vologina**, Candidate of Geology and Mineralogy  
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS  
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia  
✉ e-mail: [vologina@crust.irk.ru](mailto:vologina@crust.irk.ru)



**Иван Александрович Калугин**, докт. геол.-мин. наук  
Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН  
630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, Россия  
e-mail: [ikalugin@igm.nsc.ru](mailto:ikalugin@igm.nsc.ru)

**Ivan A. Kalugin**, Doctor of Geology and Mineralogy  
V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS  
3 Academician Koptyug ave., Novosibirsk 630090, Russia  
e-mail: [ikalugin@igm.nsc.ru](mailto:ikalugin@igm.nsc.ru)



**Андрей Викторович Дарьин**, канд. геол.-мин. наук  
Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН  
630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, Россия  
e-mail: [darin@ngs.ru](mailto:darin@ngs.ru)

**Andrei V. Dar'in**, Candidate of Geology and Mineralogy  
V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS  
3 Academician Koptyug ave., Novosibirsk 630090, Russia  
e-mail: [darin@ngs.ru](mailto:darin@ngs.ru)



**Анатолий Сергеевич Астахов**, докт. геол.-мин. наук  
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН  
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, Россия  
e-mail: [astakhov@poi.dvo.ru](mailto:astakhov@poi.dvo.ru)

**Anatoliy S. Astakhov**, Doctor of Geology and Mineralogy  
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far East Branch of RAS  
43 Baltiyskaya street, Vladivostok 690041, Russia  
e-mail: [astakhov@poi.dvo.ru](mailto:astakhov@poi.dvo.ru)



**Михаэль Штурм**, доктор наук  
Швейцарский федеральный институт науки и технологии окружающей среды  
8600, Dübendorf, Überlandstrasse, 133, Switzerland  
e-mail: [Michael.Sturm@emeriti.eawag.ch](mailto:Michael.Sturm@emeriti.eawag.ch)

**Michael Sturm**, PhD  
Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, EAWAG  
133 Überlandstrasse, Dübendorf 8600, Switzerland  
e-mail: [Michael.Sturm@emeriti.eawag.ch](mailto:Michael.Sturm@emeriti.eawag.ch)



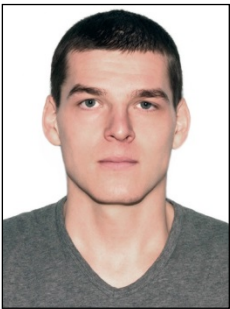
**Галина Петровна Черняева**, канд. биол. наук  
Институт земной коры СО РАН  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

**Galina P. Chernyaeva**, Candidate of Biology  
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS  
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia



**Наталья Валентиновна Кулагина**, канд. геол.-мин. наук  
Институт земной коры СО РАН  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия  
e-mail: [kulagina@crust.irk.ru](mailto:kulagina@crust.irk.ru)

**Natalia V. Kulagina**, Candidate of Geology and Mineralogy  
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS  
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia  
e-mail: [kulagina@crust.irk.ru](mailto:kulagina@crust.irk.ru)



**Александр Николаевич Колесник**, канд. геол.-мин. наук  
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН  
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, Россия  
e-mail: [aiaks1986@mail.ru](mailto:aiaks1986@mail.ru)

**Aleksander N. Kolesnik**, Candidate of Geology and Mineralogy  
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far East Branch of RAS  
43 Baltiyskaya street, Vladivostok 690041, Russia  
e-mail: [aiaks1986@mail.ru](mailto:aiaks1986@mail.ru)