

УДК 551.467, 549, 582

ОСАДОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ ИЗ ДРЕЙФУЮЩИХ ЛЬДОВ РАЙОНОВ ПЛАТО ЕРМАК И ПРОЛИВА ФРАМА: НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО СПОРОВО-ПЫЛЬЦЕВЫМ СПЕКТРАМ, МИНЕРАЛОГИИ И ГЕОХИМИИ

А.В. Масленникова¹, В.П. Шевченко², Е.В. Белогуб¹, А.В. Маслов^{3,4}, И.А. Блинов¹

¹*Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; adenophora@index.ru*

²*Институт океанологии РАН, Нахимовский пр. 36, г. Москва, 117997 Россия*

³*Институт геологии и геохимии УрО РАН, ул. Академика Вонсовского 15, г. Екатеринбург, 620016 Россия*

⁴*Институт геологии УФИЦ РАН, ул. Карла Маркса 16/2, г. Уфа, 450077 Россия*

ICE-RAFTED SEDIMENTS OF THE YERMAK PLATEAU AND FRAM STRAIT: NEW DATA ON SPORE-POLLEN SPECTRA, MINERALOGY AND GEOCHEMISTRY

A.V. Maslennikova¹, V.P. Shevchenko², E.V. Belogub¹, A.V. Maslov^{3,4}, I.A. Blinov¹

¹*Institute of Mineralogy UB RAS, Miass, Chelyabinsk district, 456317 Russia; adenophora@index.ru*

²*Institute of Oceanology RAS, Nakhimovsky pr. 36, Moscow, 117997 Russia*

³*Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, ul. Akademika Vonsovskogo 15, Yekaterinburg, 620016 Russia*

⁴*Institute of Geology UFIC RAS, ul. Karla Marksa 16/2, Ufa, 450077 Russia*

В статье представлены результаты комплексного геохимического, минералогического и палинологического исследования осадочного материала дрейфующих льдов (далее IRS – от англ. «ice-rafted sediments»), отобранного в районе плато Ермак (Северный Ледовитый океан), для определения его источников и направлений транспортировки. Рентгеноструктурный анализ IRS показал сходство валового минерального состава проб, отобранных в районе плато Ермак и пролива Фрама. Изучение распределения редких, рассеянных и редкоземельных (РЗЭ) элементов IRS различных районов западного сектора Арктики позволило сделать вывод о близости состава их источников. Эти результаты согласуются с современным направлением дрейфа арктических льдов от берегов Аляски, Чукотки, моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря в сторону Атлантического океана. Особенности морфологии зерен кварца IRS свидетельствуют об их преимущественно водном переносе. Спорово-пыльцевой анализ показал доминирование пыльцы анемофильных растений (сосна, береза, злаковые) в составе спорово-пыльцевых спектров (СПС) IRS плато Ермак, что предполагает важную роль ветрового переноса материала IRS. Однако взаимосвязь состава СПС образцов с расстояниями между точками отбора проб не выявлена, что указывает на наличие других источников и способов переноса IRS. Присутствие в составе IRS остатков пресноводных водорослей, фрагментов тканей растений, пыльцы водно-болотных растений, спор мхов и грибов не противоречит предположению об их континентальном источнике. Присутствие морских диатомовых водорослей в IRS позволяет предполагать, что пробы из района плато Ермак и пролива Фрама содержат осадочный материал, захваченный льдом при взмучивании поверхностного слоя донных осадков в мелководных районах шельфа Сибирской Арктики, а также створки диатомовых водорослей, поступающие с брызгами из разводий и полыней среди дрейфующих льдов.

Илл. 15. Табл. 3. Библ. 33.

Ключевые слова: Арктика, осадочный материал из дрейфующих льдов, минералогия, геохимия, палинология.

The results of geochemical, mineralogical and palynological study of ice-rafted sediments (IRS) of the Yermak Plateau (Arctic Ocean) are presented. The complex analysis of IRS allowed us to identify their sources and direction of transport. According to X-ray diffractometry, the mineral composition of IRS of the Yermak Plateau and Fram Strait is similar. Distribution of trace elements and rare earth elements (REE) in IRS from the areas of the western sector of the Arctic Ocean also indicate their similar sources. These conclusions are consistent with present-day direction of the Arctic ice drift from the coasts of Alaska, Chukotka and East Siberian Sea and Laptev Sea toward the Atlantic Ocean. The morphology of quartz of IRS indicates their predominantly water transfer. According to palynological analysis, the IRS spore-pollen spectra (SPS) are dominated by pollen of anemophilous plants (pine, birch, and cereals) suggesting important role of atmospheric transport of the IRS from the Yermak Plateau. No correlation, however, is found between SPS composition and the distance between sampling points, which is evidence of the presence of other IRS sources. The findings of freshwater algae, fragments of plant tissue, moss and fungi spore and helophytes pollen in the IRS confirms their continental source. The presence of marine diatom valves suggests that the samples from the Yermak Plateau and Fram Strait contain sedimentary material captured by ice roiling of the surface layer of bottom sediments in the shallow areas of the Siberian Arctic shelf, as well as diatom valves arriving with splashes from drifting ice openings.

Figures 15. Tables 3. References 33.

Key words: Arctic, ice-rafted sediments, mineralogy, geochemistry, palynology.

Введение

Дрейфующие льды, покрывающие значительную часть Северного Ледовитого океана, переносят существенные массы взвешенных минеральных и органических веществ (Pfirman et al., 1990; Лисицын, 1994а, 2010; Nürnberg et al., 1994; Левитан и др., 1995; Lisitzin, 2002; Lisitzin, Shevchenko, 2016; Шевченко и др., 2017а, 2017б; Маслов и др., 2018). Существует два основных направления дрейфа льда в арктическом регионе. В восточно-евразийском секторе Арктики перемещение льдов подчиняется так называемому Трансполярному дрейфу (от Аляски и Чукотки через приполюсной район к проливу Фрама). В районе полюса Трансполярный дрейф соприкасается с круговоротом Бофорта.

Основными источниками льдов, которые несет Трансполярный дрейф, являются море Лаптевых и Восточно-Сибирское море (Захаров, 1996). Образующиеся в относительно мелководных областях припайные льды захватывают здесь тонкую минеральную и органическую взвесь, выносимую на шельф рр. Колымой, Яной, Леной и др. (Pfirman et al., 1990; Reimnitz et al., 1994; Лисицын, 1994б; Gordeev et al., 1996; Kolatschek et al., 1996; Eicken et al., 1997 и др.). Процесс «подпитки» дрейфующих льдов новым, внутриводным или донным льдом, по-видимому, может происходить в течение зимних месяцев на всей акватории Северного Ледови-

того океана. Помимо указанных источников на поверхности льда на всем протяжении дрейфа осаждаются тонкий минеральный и биогенный материал, переносимый ветрами, который также вносит свой вклад в формирование осадочного материала дрейфующих льдов (далее IRS) (Шевченко, 2000; Шевченко и др., 2002, 2007). Изучение транспортировки осадочного вещества в Арктике позволяет глубже понять процессы современного осадконакопления, а также выполнить экологическую оценку акватории, оказывающей огромное влияние на природную среду планеты (Shevchenko et al., 1995; Lisitzin, Shevchenko, 2016). Кроме того, исследование транспорта современного IRS и его возможных источников необходимо для реконструкции истории движения льдов, которая может дать ключ к пониманию процессов, приведших к катастрофическим изменениям климата тысячи лет назад. Поэтому целью нашей работы было определение направления транспорта и источников IRS в районе плато Ермак. В частности, в настоящей работе изучены особенности включенного в дрейфующие льды IRS, пробы которого отобраны в районе плато Ермак, и выполнено их сравнение по ряду параметров с пробами IRS из пролива Фрама. Особое внимание уделено биогенной составляющей как потенциальному маркеру выпадающих на дрейфующий лед аэрозолей.

Материал и методы исследования

Нами изучено пять проб IRS (№№ IRS-1, -3, -5, -6 и -7), отобранных В.П. Шевченко во время рейса НИС «Поларштерн» № ARK-XX/3 в сентябре 2004 г. (Shevchenko, Kukina, 2005) из дрейфующих льдов в районе плато Ермак, расположенного к северо-северо-западу от архипелага Шпицберген (рис. 1). Осадочный материал находился во льду в виде криоконитовых пеллет длиной 1–10 мм, распределенных в поверхностном слое толщиной 1–2 см, а также образующих своеобразные сгустки в местах таяния снега на поверхности льдов. Способ отбора проб описан в работе (Шевченко и др., 2017а).

Валовый минеральный состав проб определен при помощи рентгеноструктурного анализа методом Ритвельда (программный пакет SIROQUANT V.4). Дифрактограммы получены на дифрактометре SHIMADZU XRD-6000 (Cu-K α излучение с монохроматором, скорость съемки 2 °/мин). Характер поверхности зерен силикатов алевритовой размерности изучен на СЭМ Vega3 Tescan (Институт минералогии УрО РАН).

Спорово-пыльцевой анализ проведен по общепринятой методике (Faegri, Iversen, 1989). Пробы IRS последовательно обрабатывались соляной кислотой, щелочью и длительно кипятились в плавиковой кислоте с трехкратным центрифугированием и декантацией в промежутках. Для каждого образца подсчитано около 150 пыльцевых зерен и спор. Из-за крайне низкой концентрации в образцах IRS-5 и IRS-7 подсчитано только 100 и 115 пыльцевых зерен и спор, соответственно. Процент участия таксонов в формировании спорово-пыльцевых спектров (СПС) вычислялся из суммы пылицы, не включающей деформированные пыльцевые зерна, которые невозможно было определить. Процентное содержание деформированной пылицы рассчитывалось из общей суммы.

Минеральный состав IRS

Изученные пробы имеют желтовато-зеленый цвет и состоят преимущественно из слипшихся субмикронных частиц глинистых минералов и более редких мономинеральных зерен кварца и полевых шпатов, чешуек слюды и хлорита, размер

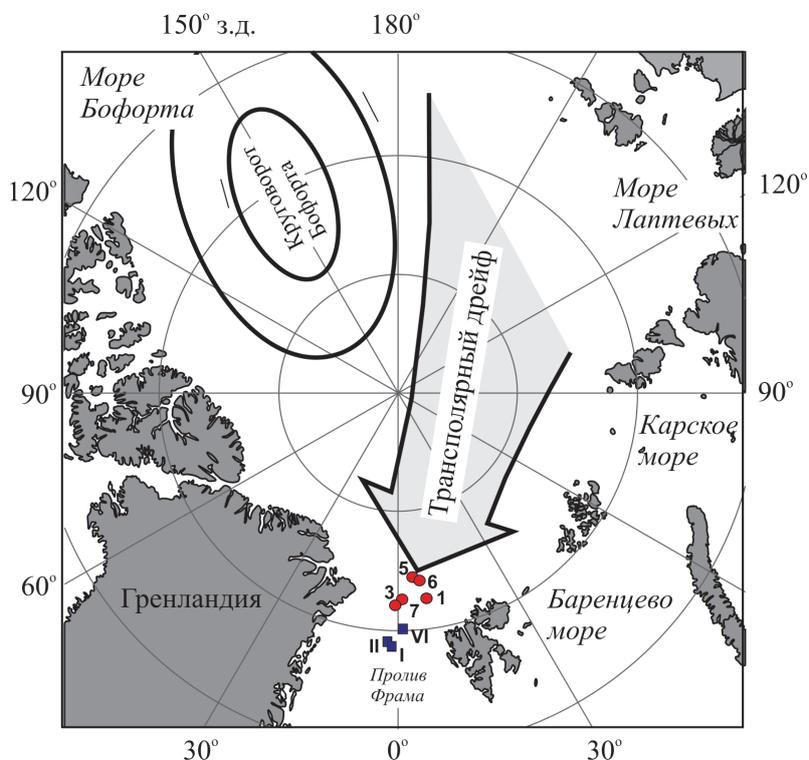


Рис. 1. Положение точек отбора проб осадочного материала дрейфующих льдов.

1, 3, 5, 6, 7 – пробы IRS из района плато Ермак; I, II, VI – пробы HS из пролива Фрама.

Fig. 1. Sampling areas of ice-rafted sediments.

1, 3, 5, 6, 7 – IRS samples of the Yermak Plateau; I, II, VI – HS samples of the Fram Strait.

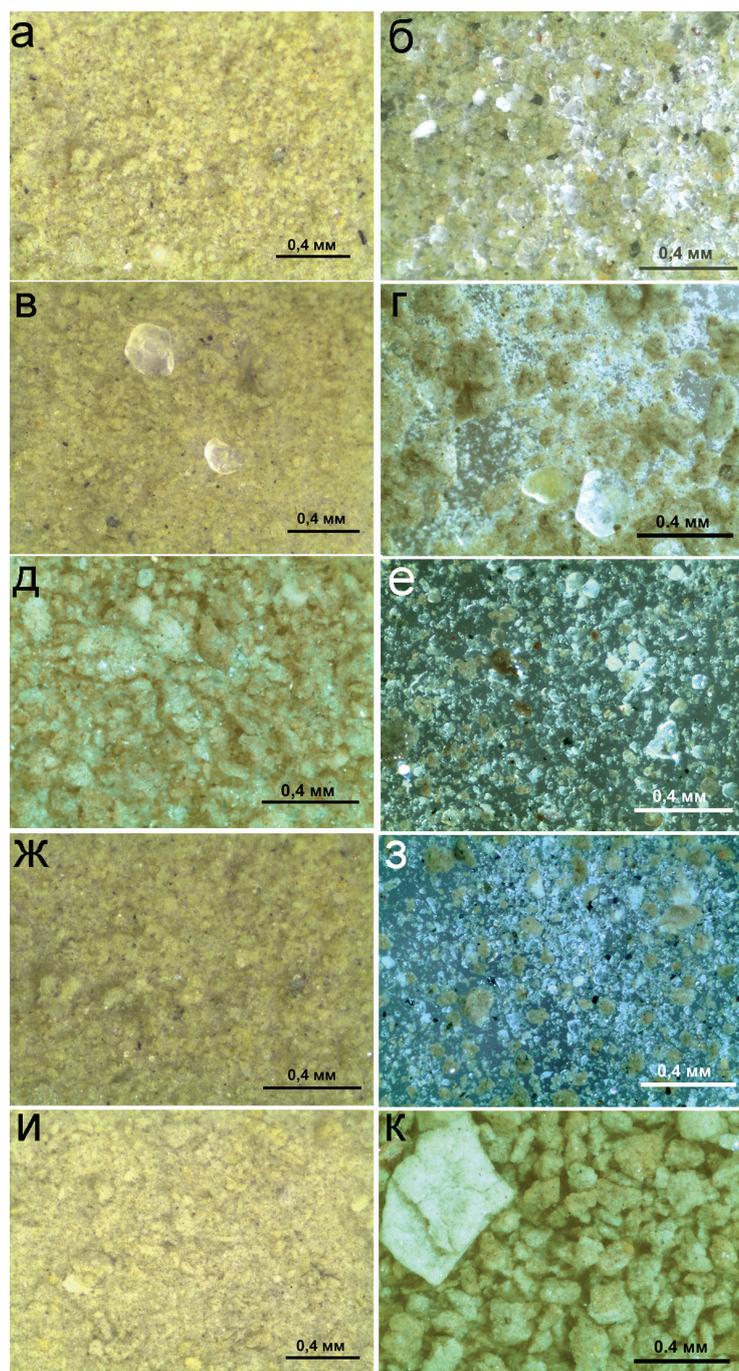


Рис. 2. Общий вид (слева) и алевропесчаная фракция (справа) изученных проб.

а, б – IRS-1; в, г – IRS-3; д, е – IRS-5; ж, з – IRS-6; и, к – IRS-7.

Fig. 2. General view (left) and silty-sand fraction (right) of samples.

а, б – IRS-1; в, г – IRS-3; д, е – IRS-5; ж, з – IRS-6; и, к – IRS-7.

которых редко достигает 0.5 мм (рис. 2). В гранулометрическом составе всех проб по данным оперативного исследования смерт-слайдов (Schevchenko, Kukina, 2005) преобладает алевропелитовый материал (табл. 1). В пробах IRS-1 и особенно IRS-5 и IRS-6 присутствует значительное количество частиц кварца и полевого шпата алевритовой размерности (см. рис. 2б, е, з), в то время как в пробе IRS-3 наблюдаются редкие относительно крупные песчинки кварца, а более тонкая фракция представлена агрегатами слоистых силикатов (см. рис. 2г). Максимальное количество глинистой фракции отмечено в пробе IRS-7: зерна алевропесчаной размерности представлены тонкозернистыми агрегатами кварца, полевых шпатов и слоистых силикатов, а мономинеральные зерна редки (см. рис. 2з).

Главными компонентами всех проб являются кварц, полевые шпаты (преимущественно плагиоклазы), слюды, хлорит и глинистые минералы с преобладающим иллитом и менее распространенными каолинитом и смектитами (см. табл. 1). Среди тяжелых минералов присутствуют амфиболы, содержание которых может достигать ~1 мас. %, пироксены, эпидот, гранаты, Фергидроксиды и непрозрачные рудные минералы (Shevchenko, Kukina, 2005). В составе глинистой фракции определены (в порядке убывания) иллит (смешаннослойные минералы ряда слюда-смектит), хлорит (смешаннослойные минералы ряда хлорит-смектит), каолинит и смектиты (Маслов и др., 2018). Во всех пробах присутствуют органические остатки.

В пробе IRS-1 фракция 50–600 мкм представлена кварцем, плагиоклазами, калиевыми полевыми шпатами, в различной степени гидратированными слоистыми силикатами (мусковит, биотит и хлорит), слипшимися агрегатами силикатных минералов размером менее 5 мкм, редкими раковинами многокамерных фораминифер (?), кремнистыми скелетами пеннатных диатомовых водорослей, растительными остатками (рис. 3). Силикатные минералы преимущественно неокатанные и слабо окатанные; окатанные их зерна весьма редки.

Гранулометрический (Shevchenko, Kukina, 2005) и минеральный состав проб IRS
из льдов района плато Ермак

Таблица 1

Granulometric (Shevchenko, Kukina, 2005) and mineral composition of IRS samples
of ice of the Yermak Plateau

Table 1

| Фракции и компоненты | Пробы | | | | |
|---------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | IRS-1* | IRS-3 | IRS-5 | IRS-6 | IRS-7 |
| Гранулометрический состав | | | | | |
| Фракция > 63 мкм | 18 | 2 | 4 | 4 | 1 |
| Фракция 4–63 мкм | 46 | 42 | 64 | 55 | 31 |
| Фракция < 4 мкм | 36 | 56 | 32 | 41 | 68 |
| Минеральный состав | | | | | |
| Кварц | 30 | 26 | 34 | 32 | 24 |
| Альбит | 18 | 19 | 27 | 20 | 19 |
| КПШ* | 7 | 5 | 3 | 5 | 4 |
| Амфибол | 1 | – | Следы | Следы | – |
| Сумма слоистых силикатов | 44 | 46 | 36 | 43 | 53 |
| Хлорит | 5 | 8 | 3 | 5 | 6 |
| Слюда+иллит | 26 | 36 | 29 | 34 | 40 |
| Каолинит | 13 | 5 | 3 | 4 | 4 |
| Смектиты | + | + | 1 | 1 | 2 |

Примечание. * – по (Маслов и др., 2018); прочерк – не обнаружено; + – минерал присутствует, но его количество невозможно корректно рассчитать из-за низкой кристалличности.

Note. * – after (Maslov et al., 2018); dash – not found; + – calculation of correct amount of the mineral is impossible because of its low crystallinity.

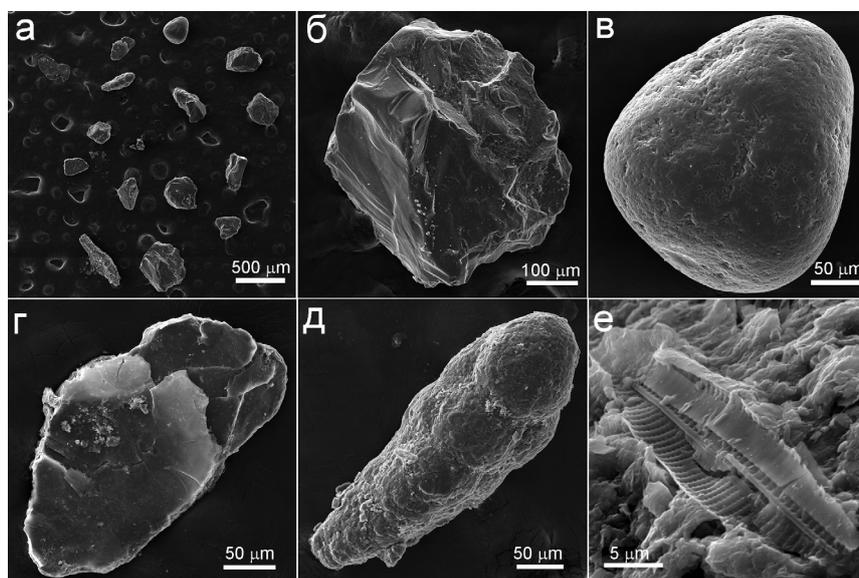


Рис. 3. Фракция > 50 мкм пробы IRS-1.

а – общий вид частиц; б – неокатанное зерно кварца; в – окатанное зерно кварца; г – чешуйка хлорита; д – реликт скелета фораминиферы (?), декорированный тонкими силикатными частичками; е – фрагмент створки пеннатной диатомовой водоросли (cf. *Navicula* sp.) в агрегате глинистых частиц.

Fig. 3. Fraction > 50 μm of sample IRS-1.

а – general view of particles; б – angular quartz grain; в – rounded quartz grain; г – chlorite flake; д – relict skeleton foraminifera (?) decorated by thin silicate particles; е – fragment of the valve of pennate diatom algae (cf. *Navicula* sp.) in aggregate of clay particles.

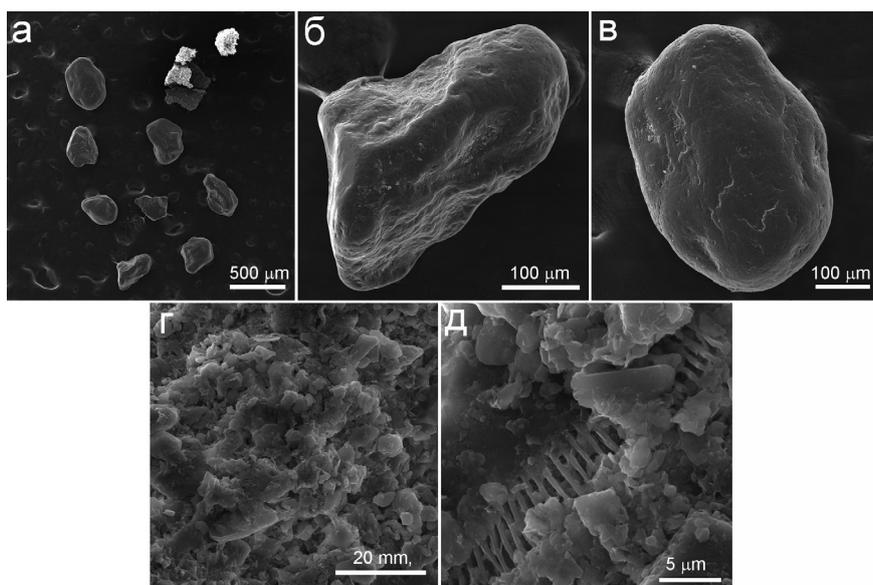


Рис. 4. Алевритовая фракция пробы IRS-3.

а – общий вид частиц; б, в – окатанные зерна калиевого полевого шпата (б) и кварца (в); г – агрегат силикатных частиц; д – фрагмент створки диатомеи в агрегате глинистых частиц.

Fig. 4. Silty fraction of sample IRS-3.

а – general view of particles; б, в – rounded grains of potassium feldspar (б) and quartz (в); г – aggregate of silicate particles; д – fragment of diatom valve in clay particles.

Проба IRS-3 отличается несколько более крупными размерами и лучшей окатанностью зерен кварца и полевых шпатов и пониженным содержанием частиц силикатов алевритовой размерности (см. рис. 2в, г; рис. 4). Во фракции 50–150 мкм преобладают прочные агрегаты минеральных частиц размером 1–10 мкм, органические остатки представлены фрагментами пениатных диатомей.

Для пробы IRS-5 характерно максимальное количество частиц алевритовой размерности (см. рис. 2д, е; табл. 1), представленных преимущественно зернами полевых шпатов и кварца. Чешуйки слоистых силикатов редки. Более крупные зерна хорошо окатаны, более мелкие – слабо (рис. 5). На поверхности зерен кварца иногда присутствуют частично сглаженные ямки округлой, раковистой морфологии (*popouts*), которые можно трактовать как следы удара при эоловом переносе (Krinley, Donahue, 1968). В целом, в пробе преобладают зерна с мелкобугорчатой, регенерированной (?) поверхностью, свидетельствующей о водном переносе (см. рис. 5д). В пробе IRS-5 также присутствуют многочисленные тонкозернистые агрегаты слипшихся силикатных минералов. Органические остатки редки и имеют крайне плохую сохранность.

По гранулометрическому (см. табл. 1) и минеральному составу алевритовой фракции, а также степени окатанности минеральных зерен проба

IRS-6 сходна с пробой IRS-5 (рис. 6). Однако в ней обнаружено максимальное количество остатков диатомовых водорослей хорошей сохранности (см. рис. 6д, е) и значительного разнообразия, включая типичные морские (см. рис. 6е). Наличие морских диатомовых водорослей в образцах IRS позволяет предполагать, что пробы из района плато Ермак, также как и пробы из пролива Фрама, содержат осадочный материал, захваченный льдом при взмучивании поверхностного слоя донных осадков в мелководных районах шельфа Сибирской Арктики, а также створки диатомовых водорослей, поступающие с брызгами из разводий и полыней среди дрейфующих льдов (Abelmann, 1992; Полякова, 1997; Cremer, 1999; Шевченко и др., 2002).

В пробе IRS-7 зафиксировано максимальное количество глинистой фракции (см. табл. 1). Мономинеральные частицы алевритового размера редки, размер самых крупных из них не превышает 250 мкм (рис. 7). Они имеют различную степень окатанности. Алевритовая фракция представлена преимущественно агрегатами слипшихся частиц силикатных минералов; остатки водорослей плохой сохранности встречаются здесь редко.

Частицы алевритовой размерности характеризуются значительными вариациями степени окатанности и различным характером поверхности. Лучшая окатанность относительно более крупных

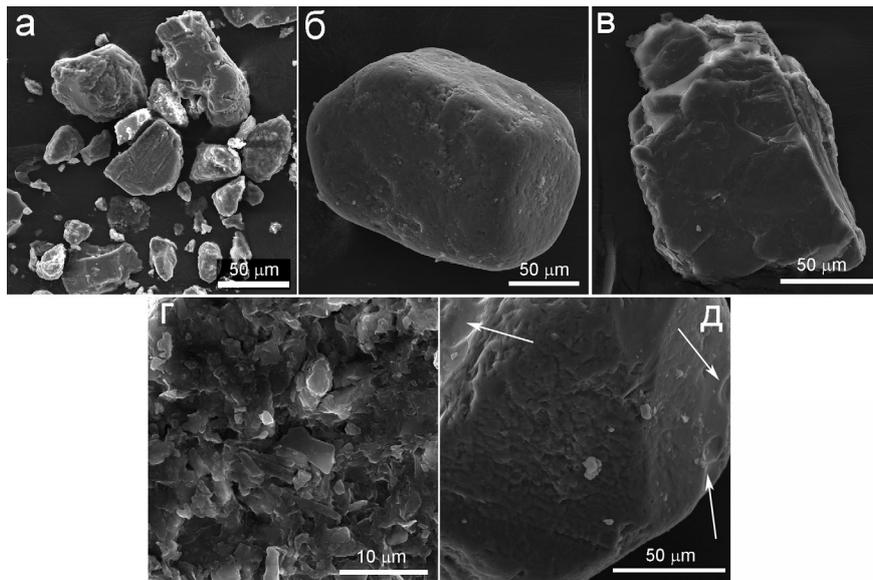


Рис. 5. Алевритовая фракция пробы IRS-5.

а – общий вид частиц; б, в – окатанные зерна соответственно калиевого полевого шпата (б) и кварца (в); г – тонкозернистый агрегат силикатных частиц; д – деталь поверхности зерна кварца с раковистыми ямками от ударов (стрелки).

Fig. 5. Silty fraction of IRS-5 sample.

а – general view of particles; б, в – rounded grains of potassium feldspar (б) and quartz (в); г – fine-grained aggregate of silicate particles; д – detail of the quartz grain surface with conchoidal holes from impacts (arrows).

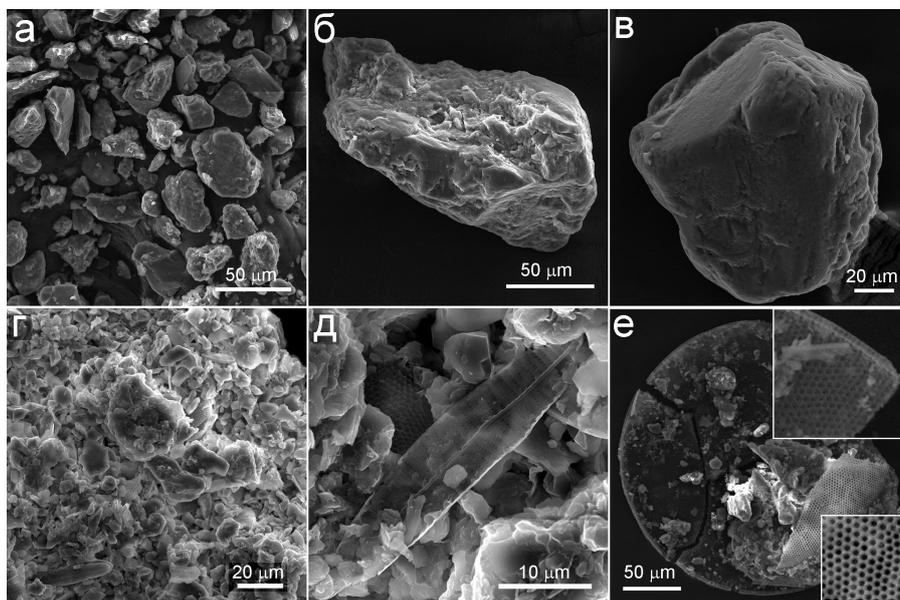


Рис. 6. Алевритовая фракция пробы IRS-6.

а – общий вид частиц; б – неокатанное зерно плагиоклаза; в – окатанное зерно плагиоклаза; г – агрегат силикатных частиц; д – пенная диатомовая водоросль (cf. *Encyonopsis* sp.) в агрегате глинистых частиц; е – створка морской центрической диатомеи (cf. *Coscinodiscus* sp.), на врезках – детали строения.

Fig. 6. Silty fraction of IRS-6 sample.

а – general view of particles; б – angular plagioclase grain; в – rounded plagioclase grain; г – aggregate of silicate particles; д – pennate diatom algae (cf. *Encyonopsis* sp.) in aggregate of clay particles; е – valve of marine centric diatom (cf. *Coscinodiscus* sp.); insets – details of structure.

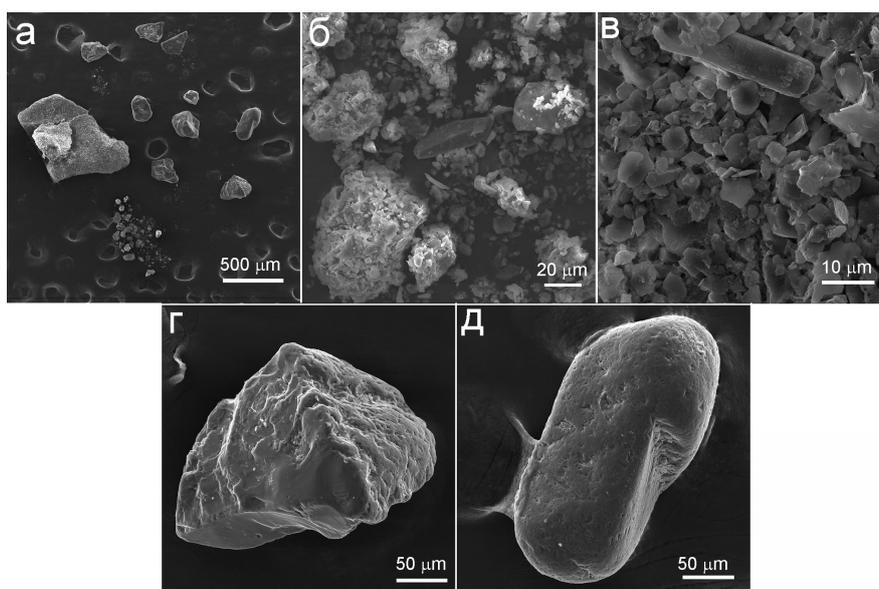


Рис. 7. Алевритовая фракция пробы IRS-7.

а – общий вид частиц; б – агрегаты силикатных минералов; в – зерно амфибола (вверху) среди глинистых частиц; г – неокатанное зерно альбита; д – окатанное зерно кварца.

Fig. 7. Silty fraction of IRS-7 sample.

а – general view of particles; б – aggregates of silicate minerals; в – amphibole grain (above) among clay particles; г – angular albite grain; д – rounded quartz grain.

зерен соответствует известной тенденции увеличения степени окатанности частиц в песках с возрастанием их размера (Goudie, Watson, 1981). Присутствие на поверхности зерен кварца ямок раковистой морфологии можно трактовать как свидетельство их эолового переноса (Krinsley, Donahue, 1968), но сглаженная морфология ямок, отсутствие ступенек и признаки химической регенерации указывают на продолжение переноса в водной среде. Нужно отметить, что во всех изученных пробах IRS из районов плато Ермак и пролива Фрама присутствуют зерна с мелкобугорчатой, регенерированной поверхностью. Существует мнение, что этот процесс для молодых осадков свидетельствует о холодных климатических условиях (Narayana et al., 2010). Однозначные морфологические признаки гляциального воздействия на зерна кварца, такие как параллельные бороздки волочения (Warrier et al., 2016), не обнаружены. Морфологические признаки не противоречат гетерогенному источнику материала IRS изученных проб.

Таким образом, валовый минеральный состав проб IRS района плато Ермак сходен с таковым IRS, отобранных в окрестностях Северного полюса (Маслов и др., 2018) и проливе Фрама (Белогуб и др., 2017), что, в целом, согласуется с направлением дрейфа арктических льдов от берегов Аляски,

Чукотки, Восточно-Сибирского и моря Лаптевых в сторону Атлантического океана. Максимальные содержания пелитовой фракции наблюдаются в пробах IRS-3 и IRS-7, отобранных вблизи кромки льдов (Шевченко и др., 2017а), что связано, вероятно, с относительным накоплением рассеянной в толще льда пелитовой фракции при частичном поверхностном таянии. Нужно отметить, что суммарное количество слоистых силикатов в пробах IRS из пролива Фрама несколько ниже, чем в IRS более северных районов.

Результаты спорово-пыльцевого анализа

Во всех пробах IRS найдены споры и пыльца, концентрация которых варьирует от 3.5 до 17.6 тыс. экземпляров в 1 грамме сухого осадка (табл. 2). Наименьшее содержание пыльцы и наибольший процент деформированных пыльцевых зерен отмечены в образцах IRS-5 и IRS-7. Самая высокая концентрация пыльцы и спор выявлена в пробе IRS-3. Зависимость содержания спор и пыльцы от гранулометрического и минерального состава IRS не установлена.

В спорово-пыльцевых спектрах осадочного материала из дрейфующих в районе плато Ермак льдов, также как и в образцах IRS из пролива Фрама

Таблица 2

Результаты спорово-пыльцевого анализа проб IRS и HS (%)

Table 2

Results of spore-pollen analysis of IRS and HS samples (%)

| Название таксона | Пробы | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|--------|---------|--------|
| | IRS-I | IRS-3 | IRS-5 | IRS-6 | IRS-7 | HS-I-1 | HS-II-3 | HS-I-6 |
| Пыльца деревьев и кустарников | 70.6 | 75.4 | 68.2 | 59.0 | 49.3 | 58.7 | 63.7 | 82.0 |
| Пыльца трав | 25.0 | 19.2 | 26.1 | 38.5 | 46.5 | 14.5 | 34.9 | 14.1 |
| Споры | 4.40 | 5.40 | 5.7 | 2.50 | 4.20 | 26.8 | 1.40 | 3.90 |
| Водно-болотные растения | 0.00 | 6.60 | 1.1 | – | н.о | – | – | 1.60 |
| <i>Picea</i> spp. | 11.3 | 9.60 | 6.8 | 8.20 | 1.40 | 20.7 | – | 11.7 |
| cf. <i>Larix</i> | 0.60 | 0.60 | – | – | – | 3.90 | 1.40 | 1.60 |
| <i>Pinus sylvestris</i> | 27.5 | 18.6 | 34.1 | 18.0 | 14.1 | 8.40 | 6.80 | 28.1 |
| <i>Pinus sibirica</i> | 1.30 | 11.4 | 0.0 | 4.10 | 0.00 | 0.60 | 0.70 | – |
| <i>Betula</i> spp. | 6.90 | 2.40 | 4.5 | 1.60 | 4.20 | 3.90 | 7.50 | 16.4 |
| <i>Betula</i> sect. <i>Albae</i> | 15.6 | 20.4 | 9.1 | 13.1 | 18.3 | 12.3 | 24.0 | 10.9 |
| <i>Betula</i> sect. <i>Fruticosa</i> | 0.60 | – | – | – | – | 1.10 | 2.70 | – |
| <i>Betula</i> sect. <i>Nanae</i> | 5.00 | 3.60 | 10.2 | 13.1 | 7.00 | 7.30 | 15.8 | 10.9 |
| <i>Alnus</i> spp. | 1.90 | 4.80 | 1.1 | 0.80 | 2.80 | 0.60 | 2.70 | 0.80 |
| <i>Salix</i> spp. | – | 4.20 | 2.3 | – | 1.40 | – | 2.10 | 1.60 |
| <i>Artemisia</i> spp. | 1.90 | 0.60 | – | – | 1.40 | 2.20 | 11.0 | – |
| Росaceae | 18.1 | 10.8 | 18.2 | 37.7 | 36.6 | 7.80 | 22.6 | 10.9 |
| Chenopodiaceae | 0.60 | – | – | – | 4.20 | 1.70 | – | – |
| Asteraceae | 1.30 | 0.60 | 1.1 | – | – | – | 0.70 | – |
| Brassicaceae | 1.90 | – | – | – | – | – | – | – |
| Caryophyllaceae | – | – | – | – | 4.20 | – | 0.70 | 1.60 |
| Суперaceae | – | 5.40 | – | – | – | – | – | 1.60 |
| Ericaceae | – | 0.60 | – | – | – | 1.70 | – | – |
| Ranunculaceae | 1.30 | – | – | – | – | 0.60 | – | – |
| Rosaceae | – | – | 2.3 | 0.80 | – | 0.60 | – | – |
| <i>Rumex</i> sp. | – | – | 3.4 | – | – | – | – | – |
| <i>Typha</i> sp. | – | 1.20 | 1.1 | – | – | – | – | – |
| Polypodiophyta (Monolete) | 0.60 | 1.20 | 1.1 | – | – | 2.20 | 0.70 | 0.80 |
| <i>Pteridium aquilinum</i> | – | – | 3.4 | – | – | – | – | – |
| <i>Sphagnum</i> spp. | 3.80 | 3.00 | – | 2.50 | 4.20 | 22.9 | 0.70 | 3.10 |
| <i>Lycopodium</i> spp. | – | 1.20 | 1.1 | – | – | 1.70 | – | – |
| Деформированная пыльца | 3.10 | 9.60 | 30.7 | 16.4 | 35.2 | 8.90 | 7.50 | 24.2 |
| Концентрация пыльцы и спор (тыс.экз./г) | 13.0 | 17.6 | 4.6 | 8.70 | 3.50 | 15.4 | 13.8 | 6.70 |

(пробы серии HS), преобладает пыльца наземных древесных растений и трав (рис. 8, 9). Пыльца древесных растений принадлежит, в основном, сосне (*Pinus sylvestris*) и березе (*Betula* sect. *Albae*, *Betula* sect. *Nanae*). Кроме того, в препаратах встречаются пыльцевые зерна сибирского кедра (*Pinus sibirica*), ели (*Picea* sp.), ольхи (*Alnus* spp.) (рис. 10) и ивы (*Salix* spp.). Особенно много пыльцы кедра, оль-

хи и ивы обнаружено в образце IRS-3 (см. табл. 2, рис. 8). В СПС образцов IRS-6 и IRS-7 на фоне доминирования пыльцы древесных растений отмечается существенное возрастание роли пыльцы трав (до 46.5 %) за счет пыльцевых зерен злаков (Росaceae). Во всех изученных образцах пыльца трав принадлежит, в основном, злакам, но в препаратах также найдены редкие пыльцевые зерна сложноц-

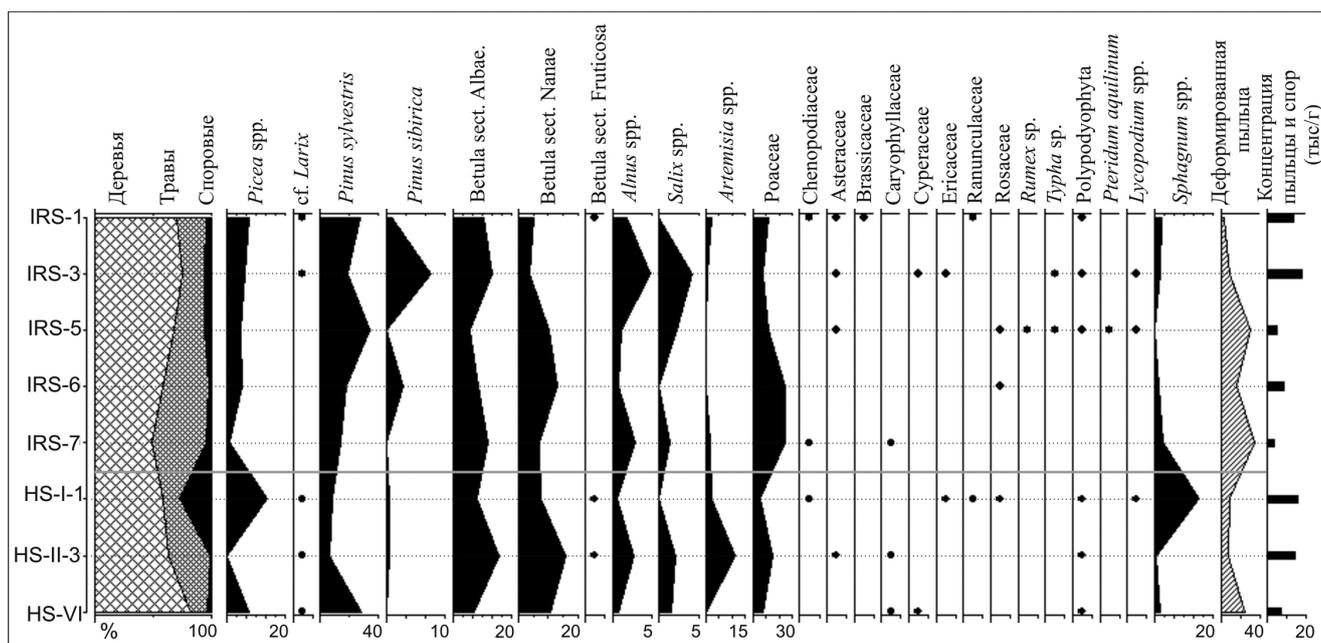


Рис. 8. Спорно-пыльцевая диаграмма осадочного материала льдов плато Ермак (пробы IRS) и пролива Фрама (пробы HS).

Fig. 8. Spore-pollen diagram of ice-rafted sediments of Yermak Plateau (IRS samples) and Fram Strait (HS samples).

ветных (Asteraceae), лютиковых (Ranunculaceae), розоцветных (Rosaceae) и вересковых (Ericaceae) (рис. 11). Пыльца водно-болотных растений обнаружена только в пробах IRS-3 и IRS-5 и представлена несколькими пыльцевыми зернами рогаза (*Typha sp.*) и осоковых (Cyperaceae) (рис. 12). В образцах определены хорошо сохранившиеся споры сфагновых мхов (*Sphagnum spp.*), редкие споры плаунов (*Lycopodium spp.*) и папоротников (Polypodiophyta). Кроме того, в препарате из пробы IRS-5 обнаружено несколько спор папоротника-орлеца (*Pteridium aquilinum*) (см. рис. 11).

В целом, образцы IRS из района плато Ермак отличаются большим однообразием спорно-пыльцевых спектров в сравнении с изученными ранее образцами серии HS (Белогуб и др., 2017) из пролива Фрама (см. рис. 8). При сравнении образцов осадочного материала из льдов, дрейфующих в районе плато Ермак и пролива Фрама, взаимосвязь состава их спорно-пыльцевых спектров с расстояниями между точками отбора проб не установлена. Близкие СПС имеют образцы HS-I-6 и IRS-3, хотя они и отличаются друг от друга составом непальцевых палиноморф. К одной группе можно также отнести препараты, полученные из образцов IRS-6, IRS-7 и HS-II-3, для которых характерно высокое содержание пыльцы трав, особенно семейства злаковых. Наибольшим отличием СПС характери-

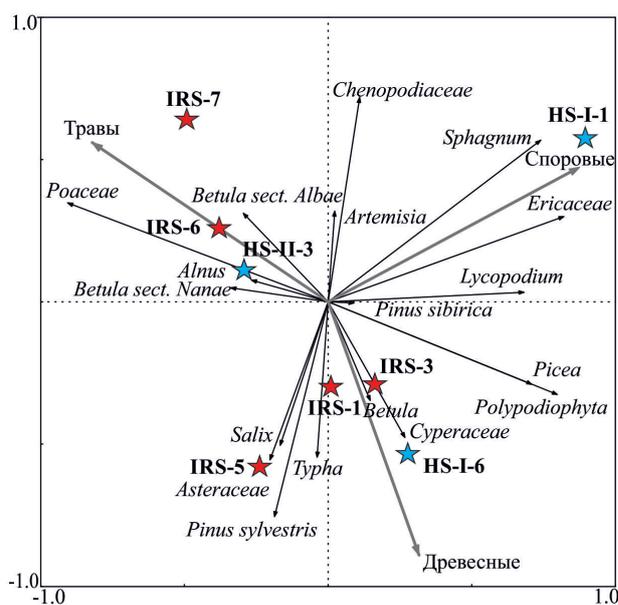


Рис. 9. Расположение образцов IRS плато Ермак (пробы IRS) и пролива Фрама (пробы HS) в ординационном пространстве относительно компонентов их спорно-пыльцевых спектров (диаграмма RDA выполнена в программе CANOCO 4.5) (Ter Braak, Smilauer, 2002).

Fig. 9. Spore-pollen components and ice-rafted samples biplot of RDA (CANOCO 4.5) (Ter Braak, Smilauer, 2002).

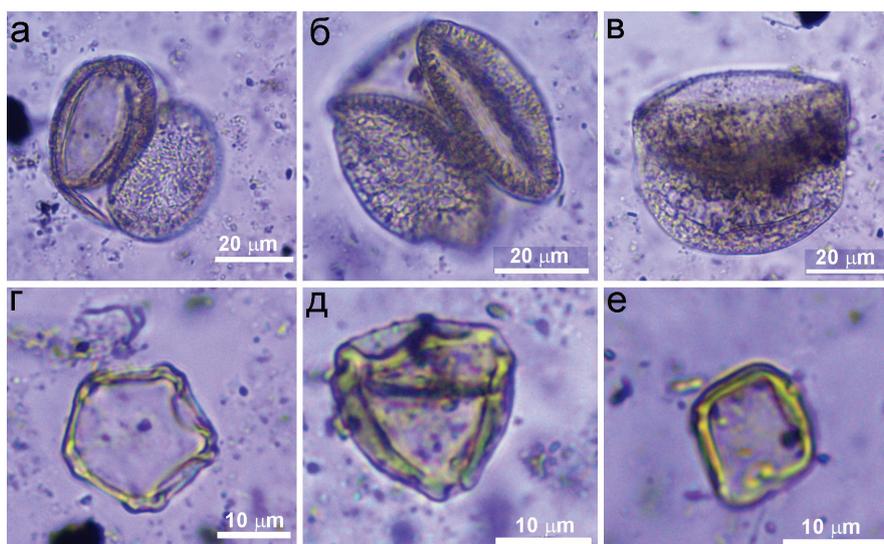


Рис. 10. Пыльца кустарников и древесных растений.

а – сосна (*Pinus sylvestris*); б – кедр (*Pinus sibirica*); в – ель (*Picea sp.*); г – ольха (*Alnus sp.*); д – береза (*Betula sect. Albae*); е – карликовая береза (*Betula sect. Nanae*).

Fig. 10. Trees and shrubs pollen.

а – pine (*Pinus sylvestris*); б – Siberian pine (*Pinus sibirica*); в – spruce (*Picea sp.*); г – alder (*Alnus sp.*), д – birch tree (*Betula sect. Albae*); е – dwarf birch (*Betula sect. Nanae*).

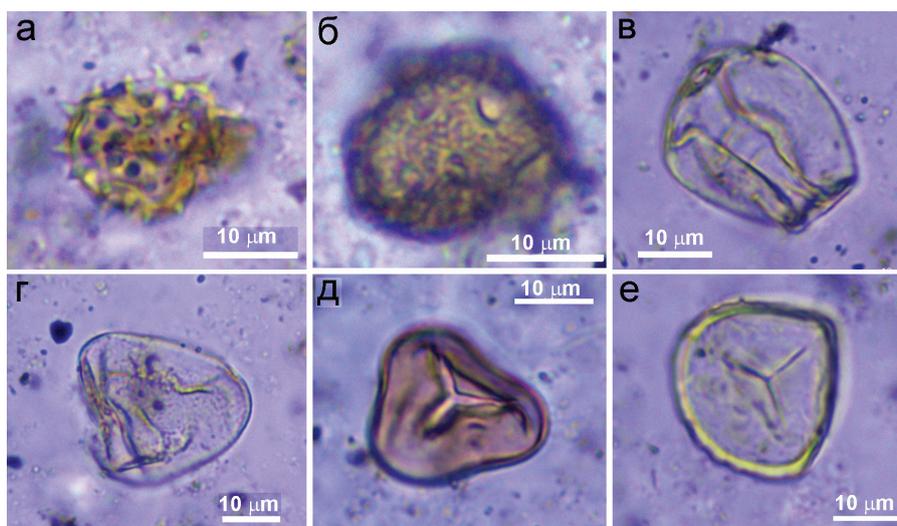


Рис. 11. Пыльца трав, споры папоротников и мхов.

а – сложноцветные (*Asteraceae*); б – гвоздичные (*Caryophyllaceae*); в – злаковые (*Poaceae*); г – осоковые (*Cyperaceae*); д – папоротник-орлец (*Pteridium aquilinum*); е – сфагнум (*Sphagnum sp.*).

Fig. 11. Pollen of grasses, spores of ferns and mosses.

а – *Asteraceae*; б – *Caryophyllaceae*; в – *Poaceae*; г – *Cyperaceae*; д – *Pteridium aquilinum*; е – *Sphagnum sp.*

зается проба HS-I-1, для которой отмечено самое высокое содержание спор сфагнума и пыльцы ели (см. рис. 9). Эти данные позволяют сделать вывод о подчиненной роли атмосферного переноса в формировании состава СПС образцов.

Непыльцевые палиноморфы образцов серии IRS представлены очень редкими и сильно деформированными колониями зеленых водорослей

Botryococcus sp. и *Pediastrum sp.*, частями экзоскелета ветвистоусых (*Cladocera*) и веслоногих (*Soropoda*) рачков, а также их яйцами (см. рис. 12), спорами грибов, фрагментами тканей растений и насекомых (рис. 13). Из водных организмов зеленые водоросли, в частности, род *Pediastrum*, характерны для пресноводных водоемов, а ветвистоусые и веслоногие рачки встречаются как в пресновод-

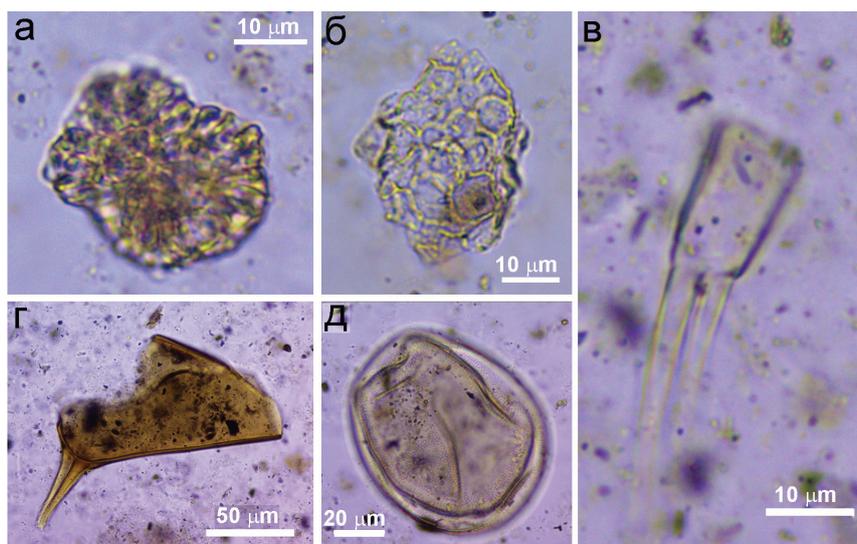


Рис. 12. Водные непыльцевые палиноморфы.

а, б – зеленые водоросли: а – *Botryococcus* sp., б – *Pediastrum* sp.; в, г – веслоногие рачки (*Cladocera*): в – постабдоминальный коготок, г – апикальный шип; д – яйцо ветвистоусого рачка (*Copepoda*).

Fig. 12. Aquatic non-pollen palynomorphs.

а, б – green algae: а – *Botryococcus* sp., б – *Pediastrum* sp.; в, г – *Cladocera*: в – postabdominal claw, г – apical spine; д – *Copepod* egg.

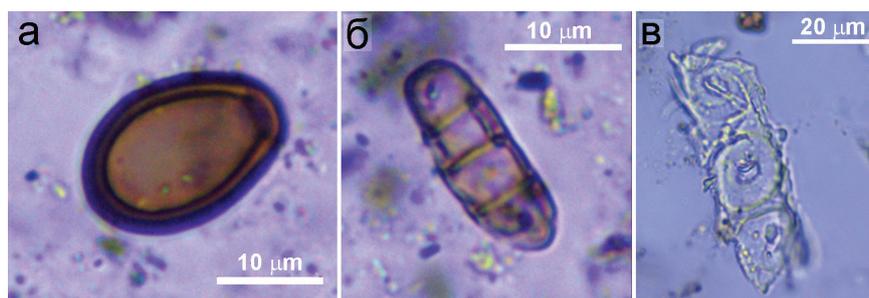


Рис. 13. Наземные непыльцевые палиноморфы.

а, б – споры грибов; в – окаймленные поры в трахеиде хвойных (*Coniferae*).

Fig. 13. Terrestrial non-pollen palynomorphs.

а, б – spore of Fungi; в – bordered pits of *Coniferae* tracheid.

ных, так и в солоноводных условиях. В целом, исходя из состава непыльцевых палиноморф, можно сделать вывод о наличии континентального источника осадочного материала, а также важной роли донных осадков шельфа сибирских морей в качестве поставщиков осадочного материала для льдов, дрейфующих в районе плато Ермак и пролива Фрама.

Систематика редких и рассеянных элементов в пробах IRS из районов плато Ермак и пролива Фрама

В настоящее время уже имеется определенное количество аналитических данных о содержании

редких и рассеянных элементов в осадочном материале дрейфующих льдов разных районов Северного Ледовитого океана (Белогуб и др., 2017; Шевченко и др., 2017а, 2017б; Маслов и др., 2018). Мы использовали некоторые из этих данных (табл. 3) для сравнения распределения редких, рассеянных и редкоземельных элементов в пробах серий IRS и HS.

С этой целью нами построен ряд парных диаграмм, демонстрирующих соотношения между некоторыми индикаторными отношениями элементов-примесей в пробах осадочного материала из дрейфующих льдов и ряде референтных геологических объектов по (Condie, 1993). Так, на диаграмме La/Sc–Th/Co фигуративные точки соста-

Таблица 3
Содержание редких и рассеянных элементов в пробах IRS из района плато Ермак (Шевченко и др., 2017б) и пролива Фрама (Белогуб и др., 2017) и некоторых референтных объектах

Table 3
Contents of rare and trace elements of the Yermak Plateau (Shevchenko et al., 2017b), Fram Strait (Belogub et al., 2017) and some reference objects

| Компо- ненты, г/т | Плато Ермак | | | | | | | | | | Пролив Фрама | | | | | Референтные объекты | | | | |
|----------------------|-------------|-------|---------|---------|-------|-------|-------|---------|---------|---------|--------------|---------|--------|---------|---------|---------------------|--------------------|------|-------------------|--|
| | IRS-1 | IRS-2 | IRS-3-1 | IRS-3-2 | IRS-4 | IRS-5 | IRS-6 | IRS-7-1 | IRS-7-2 | IRS-3-1 | IRS-3-7 | IRS-7-1 | HS I-1 | HS II-3 | HS VI-1 | AR _{Гр} | AR _{Збаз} | PAAS | AR _{ГТТ} | |
| Sc | 160 | 14.0 | 12.0 | 12.0 | 15.0 | 17.0 | 20.0 | 12.0 | 14.0 | 17.0 | 17.0 | 24.0 | 14.0 | 13.0 | 16.0 | 4.00 | 35.0 | 16.0 | 7.00 | |
| Cr | 8.00 | 97.0 | 85.0 | 84.0 | 80.0 | 90.0 | 95.0 | 92.0 | 95.0 | 83.0 | 85.0 | 120 | 75.0 | 73.0 | 85.0 | 16.0 | 406 | 210 | 160 | |
| Co | 16.0 | 14.0 | 18.0 | 18.0 | 14.0 | 16.0 | 16.0 | 19.0 | 20.0 | 17.0 | 18.0 | 21.0 | 12.0 | 15.0 | 18.0 | 4.00 | 55.0 | 23.0 | 10.0 | |
| Zr | 114 | 122 | 131 | 129 | 107 | 116 | 122 | 128 | 128 | 113 | 113 | 117 | 53.0 | 67.0 | 82.0 | 155 | 98.0 | 210 | 160 | |
| La | 25.0 | 22.0 | 29.0 | 29.0 | 21.0 | 22.0 | 26.0 | 24.0 | 28.0 | 28.0 | 26.0 | 32.0 | 21.0 | 27.0 | 39.0 | 50.0 | 5.50 | 38.0 | 30.0 | |
| Ce | 54.0 | 44.0 | 55.0 | 55.0 | 46.0 | 46.0 | 56.0 | 48.0 | 54.0 | 61.0 | 58.0 | 67.0 | 38.0 | 56.0 | 66.0 | 95.0 | 15.0 | 110 | 22.0 | |
| Pr | 6.40 | 5.40 | 6.90 | 6.70 | 5.60 | 5.70 | 6.40 | 5.90 | 6.80 | 7.10 | 6.60 | 7.90 | 4.80 | 6.60 | 7.70 | — | — | — | — | |
| Nd | 25.0 | 20.0 | 25.0 | 25.0 | 21.0 | 21.0 | 25.0 | 22.0 | 25.0 | 26.0 | 24.0 | 29.0 | 20.0 | 25.0 | 28.0 | — | — | — | — | |
| Sm | 4.80 | 3.80 | 4.60 | 4.60 | 4.30 | 4.20 | 4.90 | 4.10 | 4.80 | 4.90 | 4.50 | 5.50 | 4.20 | 5.50 | 5.40 | — | — | — | — | |
| Eu | 1.20 | 1.00 | 1.10 | 1.10 | 1.10 | 1.10 | 1.20 | 1.00 | 1.10 | 1.20 | 1.10 | 1.40 | 0.94 | 1.10 | 1.30 | — | — | — | — | |
| Gd | 5.00 | 4.10 | 4.70 | 4.60 | 4.80 | 4.40 | 5.30 | 4.40 | 4.90 | 5.30 | 4.90 | 5.90 | 3.60 | 4.50 | 4.60 | — | — | — | — | |
| Tb | 0.66 | 0.50 | 0.58 | 0.60 | 0.65 | 0.59 | 0.67 | 0.52 | 0.62 | 0.64 | 0.60 | 0.75 | 0.51 | 0.63 | 0.68 | — | — | — | — | |
| Dy | 3.90 | 2.90 | 3.40 | 3.30 | 3.60 | 3.40 | 3.80 | 3.00 | 3.60 | 3.60 | 3.50 | 4.50 | 3.00 | 3.60 | 4.10 | — | — | — | — | |
| Ho | 0.77 | 0.62 | 0.66 | 0.68 | 0.74 | 0.67 | 0.78 | 0.61 | 0.70 | 0.72 | 0.71 | 0.93 | 0.58 | 0.69 | 0.75 | — | — | — | — | |
| Er | 2.20 | 1.80 | 1.90 | 1.90 | 2.10 | 2.00 | 2.20 | 1.60 | 2.00 | 2.10 | 2.10 | 2.60 | 1.60 | 1.90 | 2.10 | — | — | — | — | |
| Tm | 0.33 | 0.26 | 0.28 | 0.27 | 0.30 | 0.30 | 0.33 | 0.24 | 0.29 | 0.33 | 0.32 | 0.37 | 0.22 | 0.26 | 0.32 | — | — | — | — | |
| Yb | 2.40 | 1.90 | 1.71 | 1.80 | 2.30 | 2.00 | 2.10 | 1.70 | 1.80 | 2.10 | 2.00 | 2.40 | 1.40 | 1.60 | 2.00 | — | — | — | — | |
| Lu | 0.33 | 0.28 | 0.27 | 0.27 | 0.29 | 0.29 | 0.34 | 0.24 | 0.27 | 0.32 | 0.31 | 0.37 | 0.20 | 0.23 | 0.29 | — | — | — | — | |
| Hf | 3.70 | 3.80 | 4.00 | 3.90 | 3.20 | 3.40 | 3.50 | 3.90 | 3.80 | 3.40 | 3.50 | 3.40 | 1.50 | 2.00 | 2.50 | 4.50 | 2.20 | 80.0 | 56.0 | |
| Th | 7.20 | 6.50 | 7.60 | 7.20 | 5.40 | 6.10 | 7.30 | 6.10 | 7.30 | 7.70 | 7.00 | 8.80 | 6.20 | 8.30 | 7.20 | 15.0 | 1.00 | 15.0 | 4.00 | |

ва проб, отобранных и в районе плато Ермак и в проливе Фрама, расположены примерно на одном и том же расстоянии от референтных точек позднеархейских базальтов (AR_{Збаз}) и архейских гранитоидов (AR_{Гр}) и тяготеют к референтным точкам архейских тоналит-гранодиорит-гранитных ассоциаций (AR_{ГТТ}) и PAAS (*Post-Archean Average Australian Shale*) (рис. 14а). На диаграмме Co/Hf–Ce/Cr точки состава проб серий IRS и HS не приурочены к каким-либо выбранным референтным точкам, точки состава осадочного материала обоих районов на данной диаграмме расположены компактно (см. рис. 14б). Это, по всей видимости, указывает на заметное сходство состава источников слагающего пробы материала. Примерно такое же, как на диаграмме La/Sc–Th/Co, распределение проб наблюдается и на диаграмме Zr/Sc–Sc/Th (см. рис. 14в). Это показывает, что пробы, представляющие два разных района западного сектора Арктики, характеризуются сходным распределением ряда индикаторных элементов-примесей. Возможно, указанная особенность является следствием близости состава источников осадочного материала для дрейфующих в районе плато Ермак и пролива Фрама льдов.

Нормированные на хондрит (Тейлор, МакЛеннан, 1988) спектры распределения РЗЭ в пробах IRS, отобранных в районе плато Ермак (рис. 15), характеризуются следующими основными характеристиками: (La/Yb)_{Нсреднее} 8.94 ± 1.61, (Gd/Yb)_{Нсреднее} 1.97 ± 0.19 и Eu/Eu*_{среднее} 0.74 ± 0.03. Эти же параметры в пробах осадочного материала, отобранных из дрейфующих льдов пролива Фрама, составляют 11.48 ± 1.64, 2.03 ± 0.21 и 0.74 ± 0.04, соответственно. Оче-

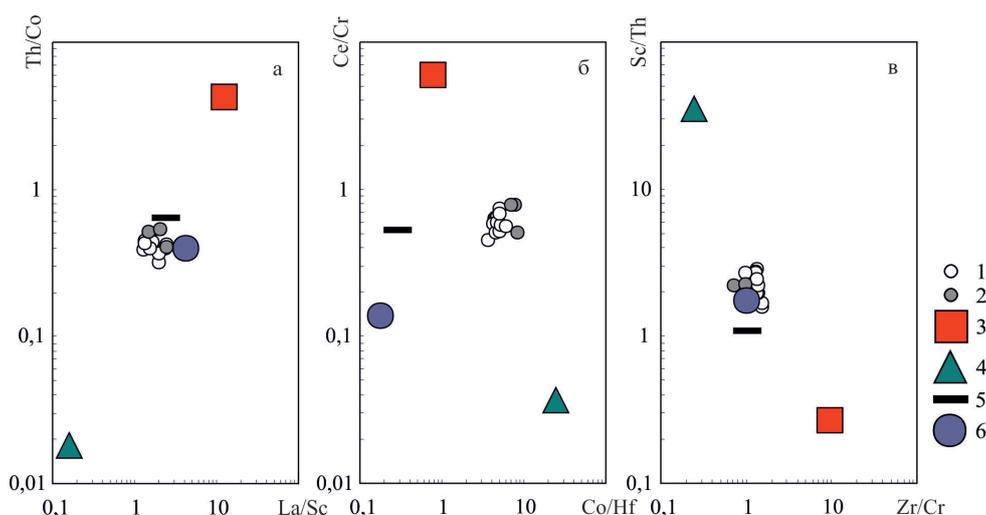


Рис. 14. Положение фигуративных точек состава проб осадочного материала из дрейфующих льдов и ряда референтных объектов на диаграммах La/Sc–Th/Co (а), Co/Hf–Ce/Cr (б) и Zr/Sc–Sc/Th (в).

1 – пробы IRS из района плато Ермак (серия IRS); 2 – пробы IRS из пролива Фрама (серия HS); 3 – архейские гранитоиды; 4 – верхнеархейские базальты; 5 – PAAS; 6 – архейские тоналит-трондьемит-гранитные ассоциации.

Fig. 14. Position of data points of composition of sediments from drifting ice and reference objects in La/Sc–Th/Co (a), Co/Hf–Ce/Cr (б) and Zr/Sc–Sc/Th (в) diagrams.

1 – IRS samples from the Yermak Plateau area (IRS series); 2 – IRS samples from Fram Strait (HS series); 3 – Archean granitoids; 4 – Upper Archean basalts; 5 – PAAS; 6 – Archean tonalite-trondjemite-granite associations.

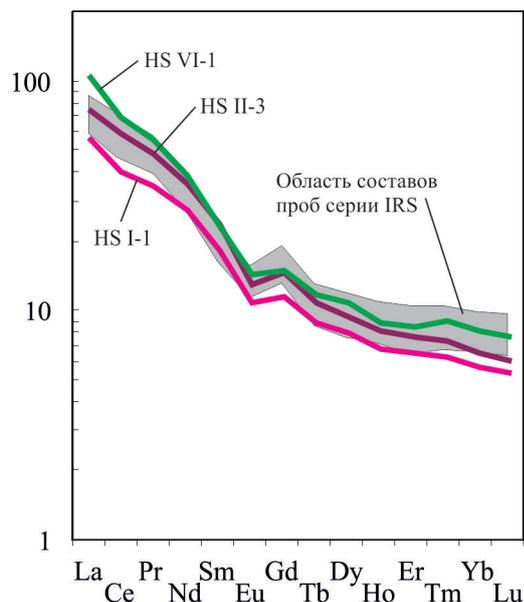


Рис. 15. Нормированные на хондрит спектры распределения РЗЭ в пробах IRS из района плато Ермак и пролива Фрама.

Fig. 15. Chondrite-normalized REE patterns of IRS samples of the Yermak Plateau and Fram Strait.

видно, что с учетом приведенных погрешностей, пробы IRS из обоих районов сопоставимы (хотя пробы из льдов пролива Фрама обеднены тяжелыми РЗЭ), что указывает на значительное сходство их источников.

Заклучение

Выполненный комплекс исследований позволяет сделать ряд выводов. Минеральный состав изученных проб сходен: в пробах IRS из района плато Ермак и пролива Фрама ведущую роль играют кварц и полевые шпаты с подчиненным количеством слюд, хлорита и редким амфиболом. В составе глинистой фракции преобладает иллит и, в меньшей степени, каолинит и смектиты. Среди частиц алевритовой размерности встречаются как окатанные, так и слабо окатанные, вплоть до неокатанных. На поверхности многих зерен присутствуют следы регенерации в виде мелких бугорков, в то время, как следы ударов, затушеванные дальнейшими процессами переноса и регенерации, фиксируются на единичных зернах кварца. Перечисленные признаки указывают на гетерогенный источник материала IRS с различной дальностью и формами переноса.

Сопоставление особенностей распределения редких и рассеянных элементов, а также РЗЭ IRS из района плато Ермак и пролива Фрама показывает, что образцы имели весьма сходные источники слагающего их осадочного материала. Это следует и из присущих им величин некоторых индикаторных отношений (La/Sc, Th/Co, Co/Hf, Ce/Cr, Zr/Sc и

Sc/Th), а также из общего облика нормированных на хондрит спектров распределения лантаноидов.

Результаты палинологического анализа осадочного материала из дрейфующего льда не могут служить единственным доказательством атмосферного переноса материала IRS. На него, также как и на водный перенос, однозначно указывает только характер поверхности некоторых зерен кварца. Пыльца древесно-кустарниковой растительности могла быть вынесена как льдами сибирских рек, так и перенесена ветром.

Присутствие в составе проб остатков пресноводных водорослей, фрагментов тканей растений, спор мхов, грибов и пыльцы водно-болотных растений свидетельствует о континентальной природе/источнике части исследованного материала. Наличие в IRS морских диатомовых водорослей позволяет предполагать, что пробы из плато Ермак, также как и пробы из пролива Фрама, содержат осадочный материал, захваченный льдом при взмучивании поверхностного слоя донных осадков в мелководных районах шельфа Сибирской Арктики, а также створки диатомовых водорослей, поступающие с брызгами из разводий и полыней среди дрейфующих льдов.

Авторы признательны экипажу НИС «Полярштерн» и Р. Штайну за помощь в экспедиции и академику А.П. Лисицыну за ценные советы. Аналитические исследования выполнены при финансировании тем госзадания ИМин УрО РАН. Интерпретация материалов выполнена в рамках госзадания ИО РАН (проект № 0149-2018-0016).

Литература

- Белогуб Е.В., Масленникова А.В., Шевченко В.П., Маслов А.В., Герланд С., Блинов И.А. (2017) Осадочный материал из дрейфующих льдов пролива Фрама: новые данные по минералогии, геохимии и спорово-пыльцевым спектрам. *Минералогия*, 3(4), 79–91.
- Захаров В.Ф. (1996) Морские льды в климатической системе. СПб., Гидрометеиздат, 213 с.
- Левитан М.А., Нюрнберг Д., Штайн Р., Кассенс Х., Маснер М., Шелехова Е.С. (1995) О роли криозолей в накоплении современных донных осадков Северного Ледовитого океана. *Доклады академии наук*, 344(4), 506–509.
- Лисицын А.П. (1994а) Ледовая седиментация в Мировом океане. М., Наука, 448 с.
- Лисицын А.П. (1994б) Маргинальный фильтр океанов. *Океанология*, 34(5), 735–743.
- Лисицын А.П. (2010) Новый тип седиментогенеза в Арктике – ледовый морской, новые подходы к исследованию процессов. *Геология и геофизика*, 51(1), 18–60.
- Маслов А.В., Шевченко В.П., Бобров В.А., Белогуб Е.В., Ершова В.Б., Верещагин О.С., Хворов П.В. (2018) Минералого-геохимические особенности осадочного материала льдов некоторых районов Арктики. *Литология и полезные ископаемые*, (2), 121–141.
- Полякова Е.И. (1997) Арктические моря Евразии в позднем кайнозое. М., Научный мир, 145 с.
- Тейлор С.Р., МакЛеннан С.М. (1988) Континентальная кора: ее состав и эволюция. М., Мир, 384 с.
- Шевченко В.П. (2000) Аэрозоли – влияние на осадконакопление и условия среды в Арктике. Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. М., Институт океанологии РАН, 213 с.
- Шевченко В.П., Лисицын А.П., Полякова Е.И., Детлеф Д., Серова В.В., Штайн Р. (2002) Распределение и состав осадочного материала в снежном покрове дрейфующих льдов Арктики (пролив Фрама). *Доклады академии наук*, 383 (3), 385–389.
- Шевченко В.П., Лисицын А.П., Штайн Р., Горюнова Н.В., Клювиткин А.А., Кравчишина М.Д., Кривс М., Новигатский А.Н., Соколов В.Т., Филиппов А.С., Хаас Х. (2007) Распределение и состав нерастворимых частиц в снеге Арктики. *Проблемы Арктики и Антарктики*, 75, 106–118.
- Шевченко В.П., Маслов А.В., Лисицын А.П., Новигатский А.Н., Штайн Р. (2017а) Систематика Ст, Со и редкоземельных элементов в осадочном материале дрейфующих льдов северной части круговорота Бофорта. *Литосфера*, 17(3), 59–70.
- Шевченко В.П., Маслов А.В., Штайн Р. (2017б) Распределение ряда редких и рассеянных элементов в осадочном материале, переносимом дрейфующими льдами в районе плато Ермак, Северный Ледовитый океан. *Океанология*, 57(6), 949–959.
- Abelmann A. (1992) Diatom assemblages in Arctic sea ice – indicator for ice drift pathways. *Deep-Sea Research*, 39 (Suppl 2), 525–538.
- Condie K.C. (1993) Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales. *Chemical Geology*, 104, 1–37.
- Cremer H. (1999) Distribution patterns of diatom surface sediment assemblages in the Laptev Sea (Arctic Ocean). *Marine Micropaleontology*, 38(1), 39–67.
- Eicken H., Reimnitz E., Alexandrov V., Martin T., Kassens H., Viehoff T. (1997) Sea-ice processes in the Laptev Sea and their importance for sediment export. *Continental Shelf Research*, 17, 205–233.
- Faegri K., Iversen J. (1989) Textbook of Pollen Analysis. Chichester, John Wiley and Sons, 328 p.
- Gordeev V.V., Martin J.-M., Sidorov I.S., Sidorova M.V. (1996) A reassessment of the Eurasian river input of water, sediment, major elements, and nutrients to the Arctic Ocean. *American Journal of Sciences*, 296, 664–691.

Goudie A.S., Watson A. (1981) The shape of desert sand dune grains. *Journal of Arid Environments*, **4**, 185–190.

Kolatschek J., Eicken H., Alexandrov V.Yu., Kreyscher M. (1996) The sea-ice cover of the Arctic Ocean and the Eurasian marginal seas: a brief overview of present day patterns and variability. *Berichte zur Polarforschung*, **212**, 2–19.

Krinsley D.H., Donahue J. (1968) Environmental interpretation of sand grain surface textures by electron microscopy. *GSA Bulletin*, **79**, 743–748.

Lisitzin A.P. (2002) Sea-ice and iceberg sedimentation in the Ocean: recent and past. Berlin-Heidelberg-New York, Springer, 563 p.

Lisitzin A.P., Shevchenko V.P. (2016) Glacial-marine sedimentation. *Encyclopedia of Marine Geosciences*. Harff J., Meschede M., Petersen S., Thiede J. (Eds). Dordrecht: Springer Science+Business Media, 288–294.

Narayana A.C., Mohan R., Mishra R. (2010) Morphology and surface textures of quartz grains from freshwater lakes of McLeod Island, Larsemann Hills, East Antarctica. *Current Science*, **99**, 1420–1424.

Nürnberg D., Wollenburg I., Dethleff D., Eicken H., Kassens H., Letzig T., Reimnitz E., Thiede J. (1994) Sediments in Arctic sea ice: Implications for entrainment, transport and release. *Marine Geology*, **119**, 185–214.

Pfirman S., Lange M.A., Wollenburg I., Schlosser P. (1990) Sea ice characteristics and the role of sediment inclusions in deep-sea deposition: Arctic-Antarctic comparisons. *Geological History of the Polar Oceans: Arctic versus Antarctic*. Bleil U., Thiede J. (Eds). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 187–211.

Reimnitz E., Dethleff D., Nürnberg D. (1994) Contrasts in Arctic shelf sea-ice regimes and some implications: Beaufort Sea versus Laptev Sea. *Marine Geology*, **119**, 215–225.

Shevchenko V., Kukina N. (2005) Ice-rafted sediments. *Scientific cruise report of the Arctic expedition ARK-XX/3 of RV «Polarstern» in 2004: Fram Strait, Yermak Plateau and East Greenland continental margin* / Stein R. (Ed). *Berichte zur Polar- und Meeresforschung*. 517, 15–21.

Shevchenko V.P., Lisitzin A.P., Kuptzov V.M., Ivanov G.I., Lukashin V.N., Martin J.M., Rusakov V.Yu., Safarova S.A., Serova V.V., Van Grieken R., Van Malderen H. (1995) Composition of aerosols over the Laptev, Kara, Barents, Greenland and Norwegian seas. *Berichte zur Polarforschung*, **176**, 7–16.

Ter Braak C.J.F., Smilauer P. (2002) CANOCO Reference Manual and CanoDraw for Windows User's Guide: Software for Canonical Community Ordination (Version 4.5). Microcomputer Power, Ithaca.

Warrier A.K., Pednekar H., Mahesh B.S., Mohan R., Gazi S. (2016) Sediment grain size and surface textural observations of quartz grains in late quaternary lacustrine sediments from Schirmacher Oasis, East Antarctica: Paleoenvironmental significance. *Polar Science*, **10**, 89–100.

References

Abelmann A. (1992) Diatom assemblages in Arctic sea ice – indicator for ice drift pathways. *Deep-Sea Research*, **39** (Suppl 2), 525–538.

Belogub E.V., Maslennikova A.V., Shevchenko V.P., Maslov A.V., Gerland S., Blinov I.A. (2017) [Ice-rafted sediments from the Fram strait: new data on mineralogy, geochemistry and spore-pollen spectra]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, **3**(4), 79–91. (in Russian)

Condie K.C. (1993) Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales. *Chemical Geology*, **104**, 1–37.

Cremer H. (1999) Distribution patterns of diatom surface sediment assemblages in the Laptev Sea (Arctic Ocean). *Marine Micropaleontology*, **38**(1), 39–67.

Eicken H., Reimnitz E., Alexandrov V., Martin T., Kassens H., Viehoff T. (1997) Sea-ice processes in the Laptev Sea and their importance for sediment export. *Continental Shelf Research*, **17**, 205–233.

Fægri K., Iversen J. (1989) Textbook of Pollen Analysis. Chichester, John Wiley and Sons, 328 p.

Gordeev V.V., Martin J.-M., Sidorov I.S., Sidorova M.V. (1996) A reassessment of the Eurasian river input of water, sediment, major elements, and nutrients to the Arctic Ocean. *American Journal of Sciences*, **296**, 664–691.

Goudie A.S., Watson A. (1981) The shape of desert sand dune grains. *Journal of Arid Environments*, **4**, 185–190.

Kolatschek J., Eicken H., Alexandrov V.Yu., Kreyscher M. (1996) The sea-ice cover of the Arctic Ocean and the Eurasian marginal seas: a brief overview of present day patterns and variability. *Berichte zur Polarforschung*, **212**, 2–19.

Krinsley D.H., Donahue J. (1968) Environmental interpretation of sand grain surface textures by electron microscopy. *GSA Bulletin*, **79**, 743–748.

Levitin M.A., Nyurnberg D., Shtayn R., Kassens KH., Masner M., Shelekhova Ye.S. (1995) [The role of cryosols in accumulation of modern sediments of the Arctic ocean.]. *Doklady akademii nauk [Doklady Academy of Sciences]*, **344**(4), 506–509. (in Russian)

Lisitzin A.P. (1994a) [Ice sedimentation in the World ocean]. Moscow, Nauka, 448 p.

Lisitzin A.P. (1994b) [Marginal filter of the oceans]. *Okeanologiya [Oceanology]*, **34**(5), 735–743. (in Russian)

Lisitzin A.P. (2002) Sea-ice and iceberg sedimentation in the Ocean: recent and past. Berlin-Heidelberg-New York, Springer, 563 p.

Lisitzin A.P. (2010) Marine ice-rafting as a new type of sedimentogenesis in the Arctic and novel approaches to studying sedimentary processes. *Russian Geology and Geophysics*, **51**(1), 12–47.

Lisitzin A.P., Shevchenko V.P. (2016) Glacial-marine sedimentation. *Encyclopedia of Marine Geosciences*. Harff J., Meschede M., Petersen S., Thiede J. (Eds). Dordrecht: Springer Science+Business Media, 288–294.

- Maslov A.V., Shevchenko V.P., Bobrov V.A., Belogub E.V., Ershova V.B., Vereshchagin O.S., Khvorov P.V.** (2018) Mineralogical-geochemical features of ice-rafted sediments in some Arctic regions. *Lithology and Mineral Resources*, **53** (2), 110–129.
- Narayana A.C., Mohan R., Mishra R.** (2010) Morphology and surface textures of quartz grains from freshwater lakes of McLeod Island, Larsemann Hills, East Antarctica. *Current Sciences*, **99**, 1420–1424.
- Nürnberg D., Wollenburg I., Dethleff D., Eicken H., Kassens H., Letzig T., Reimnitz E., Thiede J.** (1994) Sediments in Arctic sea ice: Implications for entrainment, transport and release. *Marine Geology*, **119**, 185–214.
- Pfirman S., Lange M.A., Wollenburg I., Schlosser P.** (1990) Sea ice characteristics and the role of sediment inclusions in deep-sea deposition: Arctic-Antarctic comparisons. *Geological History of the Polar Oceans: Arctic versus Antarctic*. Bleil U., Thiede J. (Eds). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 187–211.
- Polyakova Ye.I.** (1997) [The Arctic seas of Eurasia in Late Cenozoic]. Moscow, Nauchnyy mir, 145 p. (in Russian)
- Reimnitz E., Dethleff D., Nürnberg D.** (1994) Contrasts in Arctic shelf sea-ice regimes and some implications: Beaufort Sea versus Laptev Sea. *Marine Geology*, **119**, 215–225.
- Shevchenko V.P.** (2000) [Aerosols – influence on sedimentation and environmental conditions in the Arctic. *Thesis for Degree of Candidate of Geological and Mineralogical Sciences*. M., Institute Oceanology RAS, 213 p. (in Russian)]
- Shevchenko V., Kukina N.** (2005) Ice-rafted sediments. *Scientific cruise report of the Arctic expedition ARK-XX/3 of RV «Polarstern» in 2004: Fram Strait, Yermak Plateau and East Greenland continental margin* / Stein R. (Ed.) *Berichte zur Polar- und Meeresforschung*. № 517, 15–21.
- Shevchenko V.P., Lisitsyn A.P., Polyakova E.I., Dethleff D., Serova V.V., Stein R.** (2002) Distribution and composition of sedimentary material in the snow cover of Arctic Drift ice (Fram Strait). *Doklady Earth Sciences*, **383**, 278–281.
- Shevchenko V.P., Lisitzin A.P., Kuptzov V.M., Ivanov G.I., Lukashin V.N., Martin J.M., Rusakov V.Yu., Safarova S.A., Serova V.V., Van Grieken R., Van Malderen H.** (1995) Composition of aerosols over the Laptev, Kara, Barents, Greenland and Norwegian seas. *Berichte zur Polarforschung*, **176**, 7–16.
- Shevchenko V.P., Lisitzin A.P., Shtayn R. (Stein R.), Goryunova N.V., Klyuvitkin A.A., Kravchishina M.D., Kriewis M., Novigatskiy A.N., Sokolov V.T., Filippov A.S., Haas C.** (2007) [The distribution and composition of insoluble particles in the snow of the Arctic]. *Problemy Arktiki i Antarktiki [Problems of the Arctic and Antarctic]*, **75**, 106–118. (in Russian)
- Shevchenko V.P., Maslov A.V., Lisitzin A.P., Novigatskiy A.N., Shtayn R.** (2017a) [Systematics of Cr, Co and rare earth elements in ice-rafted sediments of the northern part of Beaufort Gyre]. *Litosfera [Lithosphere]*, **17**(3), 59–70. (in Russian)
- Shevchenko V.P., Maslov V.A., Stein R.** (2017b) Distribution of some rare and trace elements in ice-rafted sediments in the Yermak Plateau area, the Arctic Ocean. *Oceanology*, **57**(6), 855–863.
- Ter Braak CJF, Smilauer P.** (2002) CANOCO Reference Manual and CanoDraw for Windows User's Guide: Software for Canonical Community Ordination (Version 4.5). Microcomputer Power, Ithaca.
- Taylor S.R., MacLennan S.M.** (1988) [Continental crust, its composition and evolution]. Moscow, Mir, 384 p.
- Warrier A.K., Pednekar H., Mahesh B.S., Mohan R., Gazi S.** (2016) Sediment grain size and surface textural observations of quartz grains in late quaternary lacustrine sediments from Schirmacher Oasis, East Antarctica: Palaeoenvironmental significance. *Polar Science*, **10**, 89–100.
- Zakharov V.F.** (1996) [Sea ice in the climate system]. SPb., Gidrometeoizdat, 213 p. (in Russian).

Статья поступила в редакцию 12 декабря 2018 г.