

УДК 551.467:549:582

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

Е.В. Белогуб¹, А.В. Масленникова¹, В.П. Шевченко², А.В. Маслов³, С. Герланд⁴, И.А. Блинов¹

¹Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс; belogub@mineralogy.ru

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

³Институт геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого УрО РАН, г. Екатеринбург

⁴Norwegian Polar Institute, Fram Centre, Troms

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

E.V. Belogub¹, A.V. Maslennikova¹, V.P. Shevchenko², A.V. Maslov³, S. Gerland⁴, I.A. Blinov¹

¹Institute of Mineralogy Urals Branch of RAS, Miass; belogub@mineralogy.ru

²Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow

³Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS, Yekaterinburg

⁴Norwegian Polar Institute, Fram Centre, Troms

Приведены результаты исследования вещественного состава осадочного материала из дрейфующих льдов (ice-rafted sediments, IRS) пролива Фрама. Алевропесчаная фракция проб представлена преимущественно агрегатами глинистых минералов, кварцем, полевыми шпатами, слюдами и хлоритом, реже – эпидотом, амфиболами и монацитом. Присутствие в составе данной фракции зёрен с различной степенью окатанности позволяет предполагать определённую гетерогенность источников силикокластики. Глинистая фракция характеризуется преобладанием слюд и хлоритов и сравнительно низким содержанием смектитов и каолинита. Это даёт основание считать возможными источниками IRS современные донные осадки мелководных шельфов востока моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря. Данному предположению не противоречит и распределение в пробах Cr, Co и лантаноидов. Спорово-пыльцевые спектры проб также указывают на гетерогенный источник IRS. Наличие в их составе пыльцы деревьев, нехарактерных для приполярных областей, указывает на далёкий ветровой или водный перенос материала. Полученные данные позволяют предполагать, что IRS из дрейфующих льдов пролива Фрама включают осадочный материал, захваченный льдом при взмучивании донных осадков восточной части моря Лаптевых, Восточно-Сибирского или Чукотского (?) морей, а также продукты дальнего атмосферного и водного переноса.

Илл. 12. Табл. 3. Библ. 29.

Ключевые слова: осадочный материал, дрейфующие льды, пролив Фрама, минералогия, геохимия, споры и пыльца.

The results of study of composition of ice-rafted sediments (IRS) from drifting ice of the Fram Strait are presented. The coarse fraction includes aggregates of clayey minerals, quartz, feldspars, mica and chlorites, rarely epidote, amphibole and monazite. The presence of grains with variable degree of roundness allows us to assume heterogeneous siliciclastic sources. Mica and chlorites are dominant in the clayey fraction. Smectite and kaolinite amount is relatively low. This indicates that present-day bottom sediments of the shallow shelf of the eastern part of the Laptev Sea and East Siberian Sea are potential IRS sources, which is also supported by the distribution of Co, Cr and

REEs. The spore-pollen spectra also indicate heterogeneous IRS source. The presence of pollens of trees atypical of subpolar areas is evident of a distal wind or water transportation of the material. Our data suggest that the IRS from the drifting ice of the Fram Strait include sedimentary matter captured by the ice during roil of the bottom sediments of the eastern part of the Laptev Sea, the East Siberian or Chukchi (?) seas, as well as the products of long-range atmospheric and water transport.

Figures 12. Tables 3. Referenses 29.

Key words: ice-rafted sediments, Fram Strait, mineralogy, geochemistry, spores and pollens.

Введение

Дрейфующие льды покрывают значительную часть Северного Ледовитого океана. Арктический морской лёд не только концентрирует растворённые и взвешенные формы минеральных и органических веществ морской воды, но и играет большую роль в их транспортировке и переотложении (Pfirman et al., 1990, 1995; 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; и др.). В ходе дрейфа происходит перенос огромных масс льда и осадочного материала на расстояния в тысячи километров. Генеральное направление движения дрейфующих льдов в Восточном полушарии – Трансполярный дрейф – берёт начало в Чукотском и Восточно-Сибирском морях, проходит вблизи полюса и заканчивается южнее пролива Фрама, где арктические льды тают при встрече с Норвежским тёплым течением. Именно здесь находится главный ледовый депоцентр Арктики (Лисицын, 2010). В районе полюса Трансполярный дрейф соприкасается с круговоротом Бофорта – направлением движения ледовых масс, образующихся в море Бофорта Западного полушария.

Важнейшими источниками льдов, которые несёт Трансполярный дрейф, являются море Лаптевых, в которое впадают рр. Лена и Яна, и Восточно-Сибирское море, питающееся в существенной степени водами р. Колымы (Захаров, 1996). Указанные крупные водные артерии несут колоссальное количество минеральной и органической взвеси, основная часть которой выпадает в маргинальных фильтрах этих рек (Лисицын, 1994б) и служит главным источником донных осадков шельфа.

Зимой в Северном Ледовитом океане в областях заприпайных полыней при очень низких температурах (до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) происходит переохлаждение не только поверхностного слоя, но и значительной толщи воды (Захаров, 1996). Начинается образование внутриводного (а иногда и донного) льда во-

круг ядер кристаллизации – частиц морской взвеси, существенную часть которой в придонном нефеллоидном слое составляют взмученные течениями и штормами компоненты донных осадков (Лисицын, 1994а, 2010). Кристаллики пресного льда, образующиеся при этом, всплывают на поверхность и собираются в виде шуги. Наиболее эффективно происходит вмерзание в образующийся морской лёд частиц пелитовой и алевроитовой размерности. Сильным ветром шуга сбивается к границам дрейфующего льда и смерзается. Далее частицы осадочного вещества, захваченные новообразованным льдом, мигрируют с ним вплоть до момента таяния. При образовании 1 м^3 льда в мелководных районах моря Лаптевых в него может быть включено до нескольких сотен граммов осадочного материала (Dethleff et al., 1993; Reimnitz et al., 1994), в то время как моря Западного полушария, характеризующиеся более узкими шельфами и небольшой протяжённостью периода чистой воды, дают значительно меньше осадочного материала (Pfirman et al., 1990; Reimnitz et al., 1994; Kolatschek et al., 1996). Лёд является также природным планшетом, на поверхности которого в течение всего времени его дрейфа накапливаются поступающие из атмосферы разнообразные аэрозольные частицы (сухие и мокрые выпадения литогенных и биогенных микро- и наночастиц и загрязнений) (Лисицын, 1994а; Шевченко и др., 2007).

Цель настоящей работы – оценка вклада различных источников в формирование IRS, отобранного из дрейфующих льдов в районе пролива Фрама. Для её достижения нами изучен минеральный и химический состав глинистой и алевропесчаной фракций трёх проб IRS и проведён спорово-пыльцевой анализ.

Материалы и методы исследования

Нами изучены три пробы IRS (№№ HS-I-1, HS-II-3 и HS-VI), отобранные С. Герландом (Norwegian Polar Institute, Fram Centre) в августе 2000 г. в

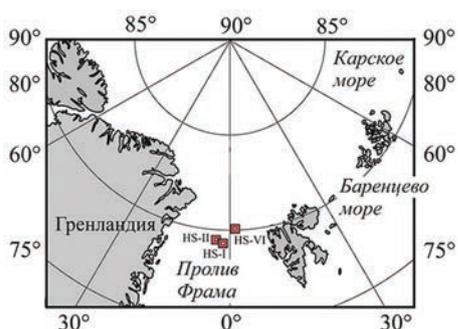


Рис. 1. Положение точек отбора проб IRS.
Fig. 1. Location of the IRS samples.

рейсе ARK XVI/1 НИС «Поларштерн» (Krause, Schauer, 2001; <http://expedition.awi.de/expedition/ARK-XVI/1>) из дрейфующих арктических льдов в проливе Фрама к северо-западу от архипелага Шпицберген (рис. 1). Осадочный материал находился в виде криоконитовых пеллет длиной 1–10 мм, распределённых в поверхностном слое льда толщиной 1–2 см, и сгустков там, где снег на поверхности льдов растаял. Отбор проб производился ножом из нержавеющей стали и пластиковым совком в пластиковые банки. В дальнейшем пробы были высушены при температуре 105 °С. Главными компонентами проб, по данным оперативного исследования смёр-слайдов, являются кварц, полевые шпаты, слюда и глинистые минералы. Среди тяжёлых минералов присутствуют пироксены, амфиболы (часто преобладают), эпидот, гранаты, Fe-гидроксиды и черные рудные.

Подготовка проб к исследованию включала: 1) мокрый рассев на сите 0.1 мм для выделения алевропесчаной фракции; 2) обработку ультразвуком в течение 0.5 ч; 3) взбалтывание пробы с дистиллированной водой в химическом стакане с высотой столба воды более 20 см. После отстаивания в течение 16 ч из верхних 20 см, в соответствии с методикой (Hubert et al., 2012; Eicken et al., 1997), была отобрана тонкая фракция. Она центрифугирована, высушена и взвешена. Жидкость после центрифугирования проб HS-I-1 и HS-VI опалесцировала, что указывает на присутствие частиц коллоидной размерности. Химическая обработка проб для удаления органической составляющей не применялись. Количество фракции <2 мкм в пробах HS-I-1, HS-II-3 и HS-VI составило соответственно 4.06, 0.05 и 2.25 мас. %.

Валовый минеральный состав проб и фракции <2 мкм определён при помощи рентгеноструктурного анализа методом Ритвельда (программный па-

кет SIROQUANT V.4). Дифрактограммы получены на дифрактометре SHIMADZU XRD-6000, Cu-K α излучение с монохроматором, скорость съёмки: валовые пробы 2 °/мин, глинистая фракция – 1 °/мин. Для уточнения состава глинистой фракции привлечены данные термогравиметрического анализа (дериватограф Q-1500D, скорость съёмки 10 °/мин, диапазон нагрева 20–980 °С).

Содержания редких и редкоземельных элементов (РЗЭ) установлены методом ИСП-ОЭС (спектрометр Varian 720-ES, аналитик К.А. Филиппова, ИМин УрО РАН); при этом использовано разложение IRS в смеси кислот и стандарт BSR-2.

Спорово-пыльцевой анализ проведён по общепринятой методике (Faegri, Iversen, 1989). Пробы IRS последовательно обрабатывались соляной кислотой, щёлочью и длительно кипятились с плавиковой кислотой. В целом полученные препараты характеризовались крайне малым количеством пыльцевых зёрен и спор и значительной долей деформированной пыльцы. В каждом образце подсчитывалось не менее 150 пыльцевых зёрен и спор. Процент участия таксонов в формировании спорово-пыльцевых спектров (СПС) вычислялся из суммы пыльцы, не включающей деформированные пыльцевые зёрна. Процентное содержание деформированной пыльцы рассчитывалось из общей суммы.

Минеральный состав IRS

Основу изученных проб составляют слоистые силикаты (мусковит, биотит, хлорит и их гидратированные разновидности), кварц, полевые шпаты (альбит, плагиоклаз среднего состава, ортоклаз), встречаются амфиболы ряда актинолит–роговая обманка (табл. 1). Во всех трёх пробах присутствуют органические, преимущественно растительные, остатки.

Фракция <2 мкм состоит из глинистых минералов – неупорядоченных смешанослойных образований рядов слюда–сметит и хлорит–сметит. Значительную роль, по сравнению с валовыми пробами, приобретает каолинит, исчезают полевые шпаты и резко уменьшается количество кварца (см. табл. 1). На присутствие хлорита и слюд, как минералов, по которым образовались смектиты, указывает поведение глинистой фракции при прокаливании, в результате которого на дифрактограммах остаются отражения слюд и хлоритов (14 Å и 10 Å, соответственно) и исчезают отражения каолинита

Таблица 1

Минеральный состав проб IRS, без учёта рентгеноаморфной фазы (прибл., мас. %)

Table 1

The mineral composition of the IRS samples, excluding the x-ray amorphous phase (approx., wt. %)

	Кварц	Ортоклаз+микролин	Альбит	Мусковит+иллит	Хлорит+сметит	Каолинит	Амфибол
Валовые пробы							
HS-I-1	45	7	24	16	6		1
HS-II-3	42	7	27	19	5	<LOD	<LOD
HS-VI	34	13	27	18	5		1
Фракция <2 мкм							
HS-I-1	2.9			68	3	23	
HS-II-3	5.2	<LOD		77	4	14	<LOD
HS-VI	4.1			60	17	22	

Примечание. <LOD – ниже предела обнаружения.

Note. <LOD – below limit of detection.

(7.15 Å). Различия минерального состава валовой пробы и выделенной из неё глинистой фракции иллюстрируют дифрактограммы (рис. 2). Следует отметить значительное содержание в тонкой фракции рентгеноаморфной фазы, состоящей, по-видимому, из субколлоидных частиц минерального и органического происхождения. О присутствии непреобразованной или слабо преобразованной органики свидетельствует низкая температура её выгорания – интенсивный экзотермический эффект на термограммах наблюдается в диапазоне 200–350 °C с максимумом 280–300 °C.

Алевропесчаная фракция изученных проб при общем сходстве различается деталями. В пробах HS-I-1 и HS-II-3 минеральные обломки имеют размер <0.05 мкм при преобладании агломератов тонких частиц силикатов (рис. 3а, б). Наиболее крупные зёрна в пробе HS-II-3 представлены многочисленными растительными остатками (см. рис. 3б). Проба HS-VI отличается от двух других повышенным количеством зёрен алевритовой и песчаной размерности и преобладанием в ней мономинеральных обломков (см. рис. 3в).

Алевропесчаная фракция пробы HS-I-1 содержит значительное количество субколлоидных частиц смектитов, образующих при высушивании плотные агрегаты, дезинтегрировать которые можно только с применением ультразвука и химических поверхностно-активных веществ (см. рис. 3а). В этих агрегатах встречаются фрагменты диатомовых водорослей пресноводного или слабо солоноводного рода *Aulacoseira* (рис. 4а, б).

Проба HS-II-3 состоит преимущественно из частиц размером <0.5 мкм, образующих плотные

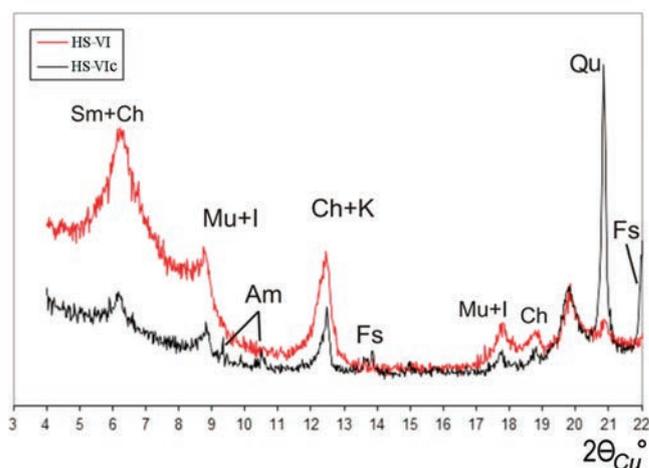


Рис. 2. Фрагменты дифрактограмм валовой пробы (HS-VI) и фракции <2 мкм (HS-VIc).

Qu – кварц, Fs – полевые шпаты, Am – амфибол, Mu – мусковит, Ch – хлорит, Sm – смектит, К – каолинит.

Fig. 2. Diffractogramm fragments of the bulk sample (HS-VI) and <2 μm fraction (HS-VIc). Qu – quartz, Fs – feldspar, Am – amphibole, Mu – muscovite, Ch – chlorite, Sm – smectite, K – kaolinite.

агрегаты. В ней также присутствуют многочисленные растительные остатки с налипшими на них минеральными частичками (рис. 5а) и обломки костей мелких рыб (см. рис. 3б). Среди обломков минералов встречаются полевые шпаты, мусковит, каолинит, иллит и смектитизированные хлориты (см. рис. 5б, в). Обломки размером >20 мкм в двух указанных пробах представлены только слоистыми силикатами – смектитизированными (по присутствию на энергодисперсионных спектрах этих частиц линий кальция) мусковитом, хлоритом и биотитом (см. рис. 4в).

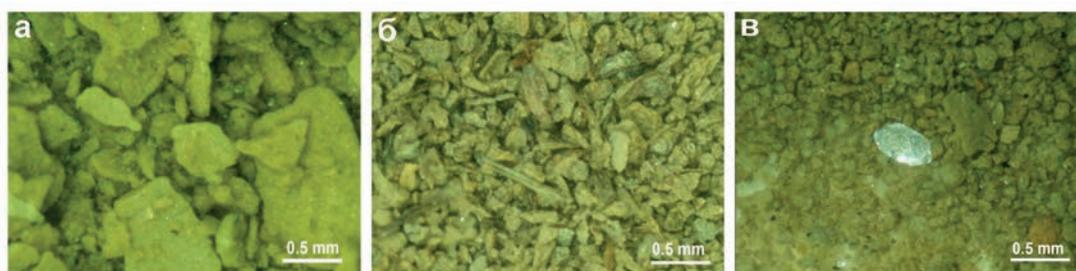


Рис. 3. Типичный вид алевропесчаной фракции проб IRS из района пролива Фрама.

а – микрозернистые агрегаты аморфного кремнезёма, полевых шпатов, кварца и смектитизированных слоистых силикатов, проба HS-I-1; б – органические остатки и тонкозернистые агрегаты слоистых силикатов, HS-II-3; в – чешуйка мусковита среди тонкозернистых глинистых агрегатов, HS-VI.

Fig. 3. Typical view of silt-sand fraction of the IRS samples from Fram strait.

а – fine-grained aggregates of the amorphous silica, feldspars, quartz and smectitized layer silicates, probe HS-I-1; б – organic remnants and finegrained aggregates of layer silicates, HS-II-3; в – muscovite flake among fine-grained clayey aggregates, HS-VI.

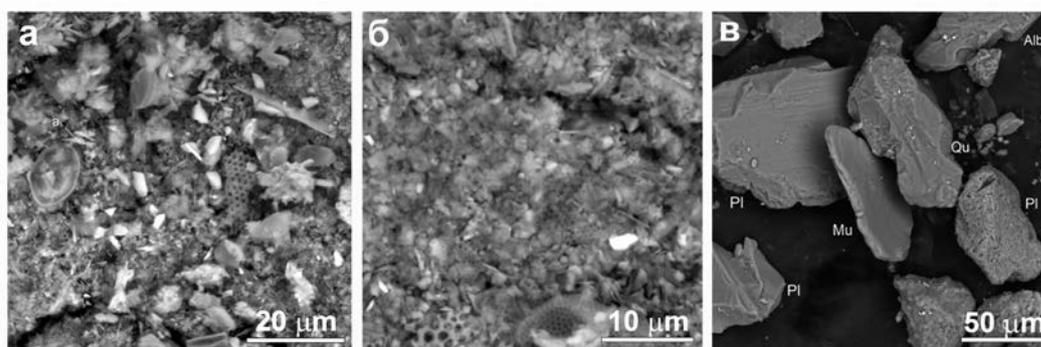


Рис. 4. Микрофотографии компонентов IRS, проба HS-I-1, в обратно-рассеянных электронах (BSE).

а, б – обломки скелетов диатомовых водорослей и одноклеточных микроорганизмов среди массы силикатов; в – минералы алевритовой фракции. Qu – кварц, Pl – средний плагиоклаз, Alb – альбит, Mu – мусковит.

Fig. 4. Microphoto of IRS components, probe HS-I-1, at back-scattered electrons (BSE).

а, б – clasts of the diatoms relics and unicellular microorganisms among silicate mass; в – silt fraction minerals. Qu – quartz, Pl – intermediate plagioclase, Alb – albite, Mu – muscovite.

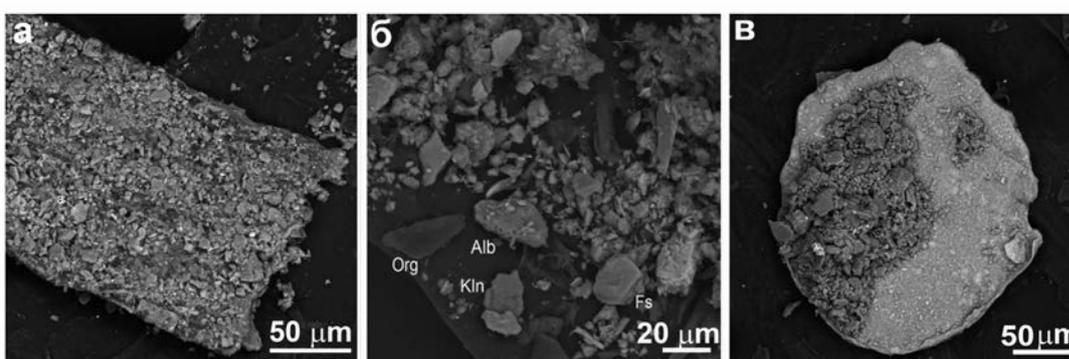


Рис. 5. Микрофотографии компонентов IRS, проба HS-II-3 (BSE).

а – растительный детрит с налипшими силикатными частицами, б – минералы алевритовой фракции, в – чешуйка смектитизированного хлорита. Обозначения минералов см. рис. 4.

Fig. 5. Microphoto of IRS components, probe HS-I-1 (BSE).

а – plant detritus with siliciclastic particles, б – minerals of the silt fraction, в – smectitised chlorite flake. Mineral denomination – see Fig. 4.

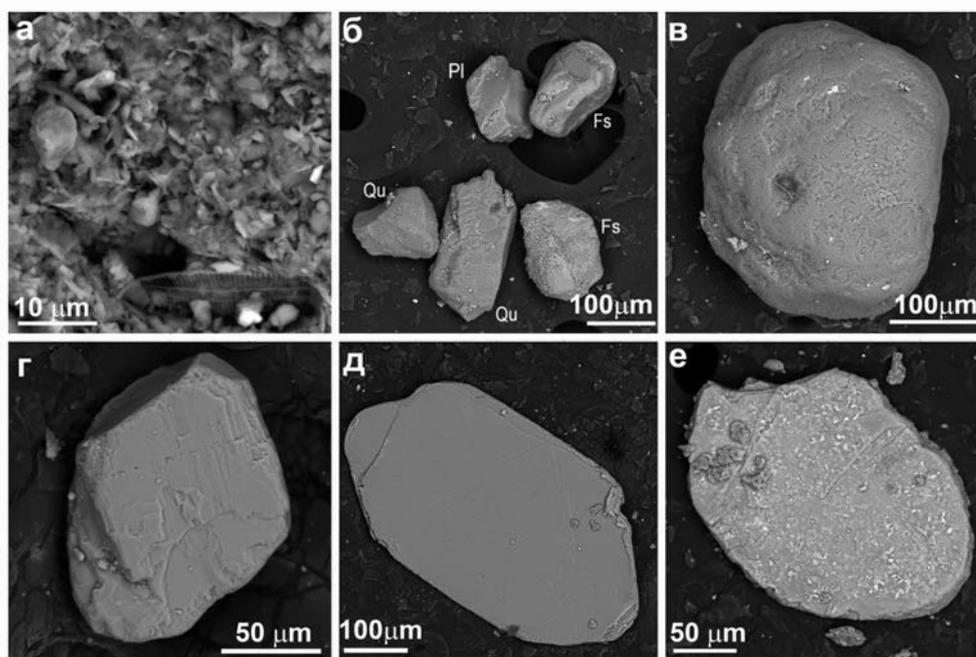


Рис. 6. Микрофотографии компонентов IRS, проба HS-VI, (BSE).

а – органический остаток среди силикатных минералов; б – минералы алевро-песчанистой фракции; в – окатанный обломок кварца; г – слабо окатанный обломок альбита, д – чешуйка мусковита; е – чешуйка смектитизированного хлорита. Обозначения минералов см. рис. 2 и 4.

Fig. 6. Microphoto of IRS components, probe HS-VI (BSE).

а – organic residue among silica minerals; б – minerals of the silt-sand fraction; в – rounded quartz clast; г – weakly rounded albite clast; д – muscovite flake; е – smectitised chlorite flake. Mineral denomination – see Fig. 4 and Fig. 2.

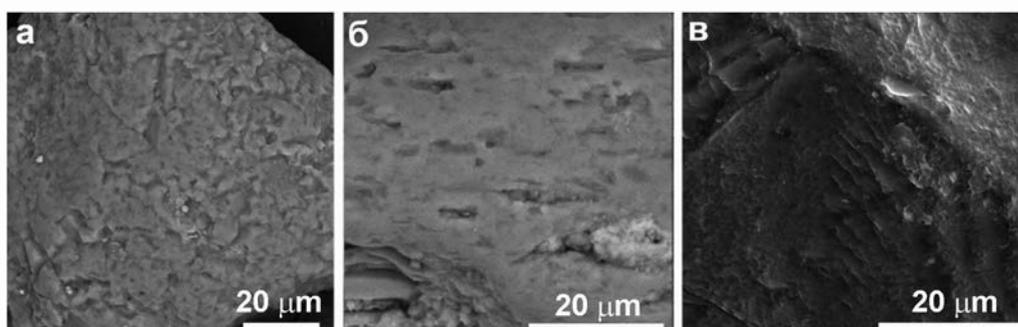


Рис. 7. Характер поверхности зёрен кварца, проба HS-VI (BSE).

а – осаждение кремнезёма на обломке кварца; б – следы коррозии; в – раковистый излом.

Fig. 7. The features of the quartz grain surfaces, probe HS-VI (BSE).

а – precipitation of silica on a fragment of quartz; б – corrosion signs; в – conchoidal fracture.

В пробе HS-VI, помимо растительных остатков (рис. 6а), можно видеть обломки кварца (см. рис. 6б, в), полевых шпатов (альбит, плагиоклаз среднего состава, калиевый полевой шпат) (см. рис. 6г), амфиболов актинолитового ряда, эпидота и слоистых силикатов – слюд и смектитизированных хлоритов (см. рис. 6д, е). Обломки имеют различную степень окатанности. Поверхность зёрен кварца неровная, обусловленная как регенерацией за счёт аморфного кремнезёма (?), так и коррозией (рис. 7).

Типичные для ветрового переноса свежие раковистые сколы на зёрнах кварца не обнаружены.

Результаты спорово-пыльцевого анализа

Спорово-пыльцевые комплексы проанализированных проб представлены пылью и спорами ветроопыляемых (анемофильных) растений. Наибольшим содержанием в исследованных препаратах характеризуется пыльца сосны (*Pinus*

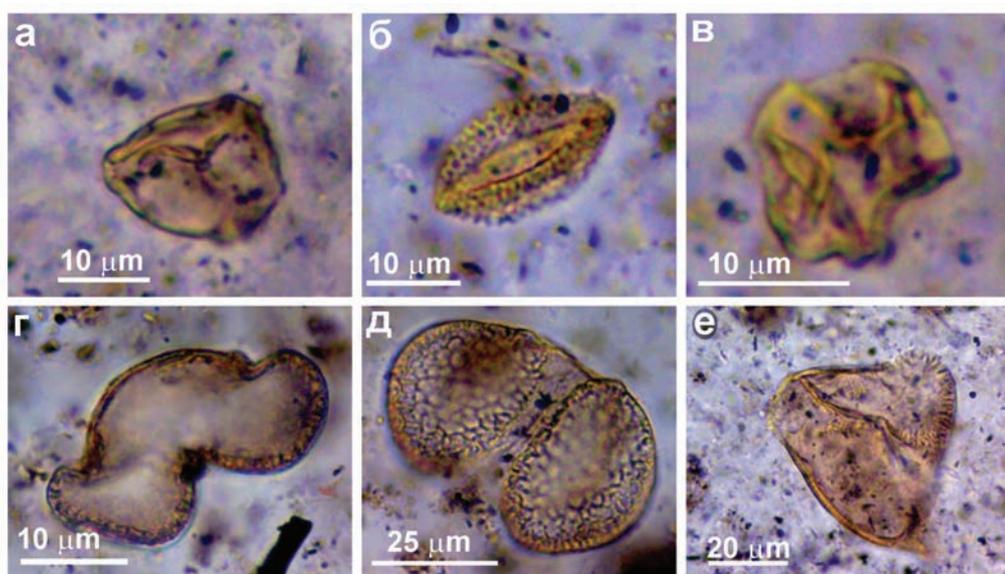


Рис. 8. Пыльца древесной растительности в пробах IRS из пролива Фрама.

а – берёза; б – ива; в – ольха; г, д – сосна; е – ель.

Fig. 8. Pollen of woody vegetation in IRS samples from the Fram Strait.

а – birch; б – willow; в – alder; г, д – pine; е – spruce.

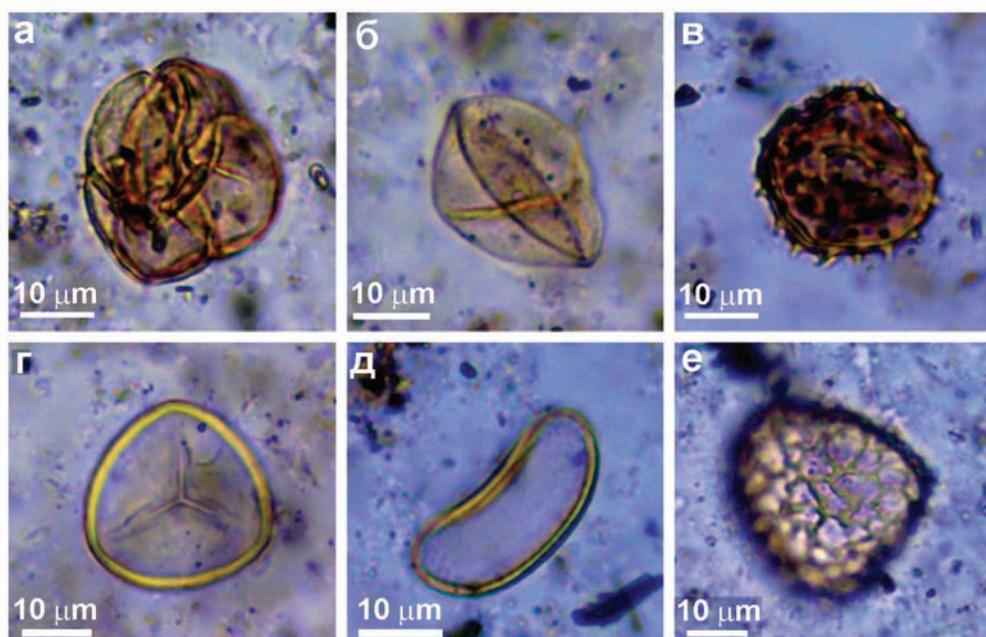


Рис. 9. Пыльца и споры кустарничковой и травянистой растительности из пролива Фрама.

а – вересковые; б – злаковые; в – сложноцветные; г – сфагновый мох; д – папоротник; е – плаун.

Fig. 9. Pollen and spores of shrubby and herbaceous vegetation from the Fram Strait.

а – Ericaceae; б – Poaceae; в – Asteraceae; г – sphagnum moss; д – fern; е – lycopodium.

sylvestris), кедр (*Pinus sibirica*), ели (*Picea spp.*) и берёзы (*Betula spp.*), переносящаяся на значительные (500–1000 км) расстояния (Некрасова, 1983). Также обнаружены единичные зёрна пыльцы ели (*Picea spp.*), ольхи (*Alnus spp.*) и ивы (*Salix spp.*) (рис. 8). Столь же редки в составе СПС пыльцевые зёрна разнотравья (*Asteraceae*, *Brassicaceae*,

Ranunculaceae, *Caryophyllaceae*) и споры папоротникообразных (*Polypodiaceae*, *Lycopodium spp.*) (рис. 9). Это предполагает отсутствие или ничтожную роль локальной растительности в формировании СПС.

Исходя из состава СПС, можно сделать вывод, что источники IRS для исследованных нами

Таблица 2

Результаты спорово-пыльцевого анализа проб IRS, %

Table 2

Results of spore-pollen analysis of IRS samples, %

Наименование таксона	Пробы		
	HS-I-1	HS-II-3	HS-VI
Пыльца деревьев	59.9	63.7	82.0
Пыльца трав	13.0	34.9	14.1
Пыльца споровых растений	27.1	1.4	3.9
<i>Betula spp.</i>	24.9	50.0	38.3
<i>Betula</i> (деформированные недиагностированные зёрна)	4.0	7.5	16.4
<i>Betula sect. Albae</i>	12.4	24.0	10.9
<i>Betula sect. Fruticosa</i>	1.1	2.7	0.0
<i>Betula sect. Nanae</i>	7.3	15.8	10.9
<i>Alnus spp.</i> + <i>Alnaster spp.</i>	0.6	2.7	0.8
<i>Salix spp.</i>	0.0	2.1	1.6
cf. <i>Spiraea</i>	0.6	0.0	0.0
<i>Artemisia spp.</i>	2.3	11.0	0.0
<i>Poaceae</i>	7.9	22.6	10.9
<i>Chenopodiaceae</i>	1.7	0.0	0.0
<i>Thalictrum spp.</i>	0.6	0.0	0.0
<i>Asteraceae</i>	0.0	0.7	0.0
<i>Caryophyllaceae</i>	0.0	0.7	1.6
<i>Cyperaceae</i>	0.0	0.0	1.6
<i>Ranunculaceae</i>	0.6	0.0	0.0
<i>Polypodiaceae</i>	2.3	0.7	0.8
<i>Sphagnum spp.</i>	23.2	0.7	3.1
<i>Lycopodium spp.</i>	1.7	0.0	0.0
Деформированная пыльца (не определённая)	8.3	7.0	19.5

проб различались. Для пробы HS-I-1 характерно максимальное содержание пыльцы ели (*Picea spp.*) и спор сфагновых мхов (*Sphagnum spp.*) (табл. 2). Пыльца древесных растений в пробе HS-II-3 принадлежит, в основном, берёзе (*Betula spp.*), в ней же наблюдается максимальное количество пыльцы ольхи (*Alnus spp.*) и ивы (*Salix spp.*). Для данного образца отмечено также высокое содержание пыльцы анемофильных трав, представленных, главным образом, злаками (*Poaceae*) и полынью (*Artemisia spp.*). Наибольшее содержание пыльцы древесных растений (82 %) характерно для СПС пробы HS-VI. Кроме того, для последней характерен и самый высокий процент деформированных зёрен (19 %), что может быть связано как с дальностью переноса, так и с условиями накопления пыльцы и спор в осадке.

Во всех пробах обнаружены также споры грибов и единичные колонии зелёных микроводорослей *Pediastrum boryanum* (Turpin) Meneghini., *Botryococcus sp.* (рис. 10). Для пробы HS-VI отмечается разнообразие цист динофлагеллят (*Echinidinium sp.*, *Protoperidinium sp.*, *Selenopemphix sp.*), здесь же найдены фрагменты головных капсул комаров-звонцов (*Chironomidae*) и створок рачков *Bosminidae*.

Пыльца и споры, обнаруженные в IRS в проливе Фрама, попали туда как вместе с взмученными донными осадками шельфа сибирских морей, так и в результате осаждения из атмосферы во время длительного (более 2 лет) дрейфа льдов. Например, в СПС поверхностного слоя донных осадков моря Лаптевых определена, с одной стороны, пыльца древесных и кустарниковых растений *Picea*, *Pinus*

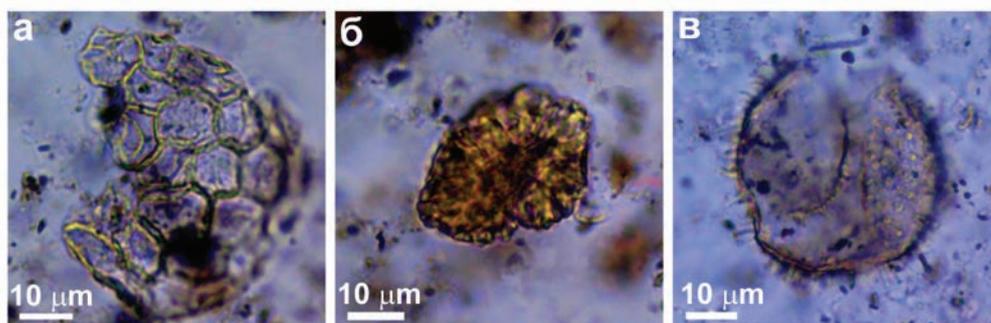


Рис. 10. Зелёные водоросли (а – *Pediatrum* sp., б – *Botryococcus* sp.) и циста динофлагеллят (в – *Echinidinium* sp.).
Fig. 10. Green algae (а – *Pediatrum* sp., б – *Botryococcus* sp.) and dinoflagellate cyst (в – *Echinidinium* sp.).

pumila, *Pinus sibirica*, *Larix*, *Betula sect. Nanae*, *Salix*, *Alnus*, а с другой, – пыльца тундровых травянистых растений и кустарничков – *Ericaceae*, *Cyperaceae*, *Poaceae*, *Asteraceae*, *Caryophyllaceae*, *Rosaceae*, *Ranunculaceae*, *Saxifragaceae* (Найдина, 2014). Пыльца наземных растений попадает в поверхностные донные осадки указанной части Арктики как со стоком рр. Лены, Яны и других водных артерий, так и эоловым путём. Так, по данным В.П. Шевченко с соавторами (Shevchenko et al., 1995), важным компонентом аэрозолей над морем Лаптевых и другими морями Российской Арктики являются именно пыльца и споры, которые могут переноситься по воздуху на сотни и тысячи километров. Примечательно, что пыльцу и споры как в аэрозолях (Rousseau et al., 2004), так и в снежном покрове на дрейфующих льдах (Шевченко и др., 2007), регулярно обнаруживают и в весьма удалённых от суши районах Арктики, включая окрестности Северного полюса.

Систематика Со, Сг и редкоземельных элементов в IRS

Как и при изучении геохимических особенностей осадочного материала из дрейфующих льдов северной части круговорота Бофорта (Шевченко и др., 2017а), задачей настоящих исследований являлся анализ систематики Со, Сг и РЗЭ в пробах IRS из пролива Фрама, и реконструкция на этой основе возможных его источников. Выбор указанных элементов обусловлен тем обстоятельством, что в литературе имеются данные по их содержаниям в современных донных осадках большинства морей Российской Арктики и моря Бофорта.

Содержание Сг и Со в валовых пробах IRS варьирует соответственно от ~73 до ~85 мкг/г и от ~12 до ~18 мкг/г (табл. 3). В среднем постаршей-

ском австралийском глинистом сланце (РАAS), одном из широко используемых в осадочной геохимии референтных объектов, концентрации названных элементов составляют 110 и 23 мкг/г (Тейлор, МакЛеннан, 1988), а в фанерозойских кратонных песчаниках – 30 и 2.5 мкг/г (Condie, 1993). В тонкой фракции этих же проб содержания Сг как выше, чем в валовых образцах, так и ниже, а Со – преимущественно выше.

Особенности локализации фигуративных точек валовых составов и тонкой фракции исследованных проб на диаграммах Со–La и Сг–La (рис. 11) показывают существенное сходство их с составом проб IRS, отобранных в районе плато Ермак (Шевченко и др., 2017б), и позволяют предполагать, что источниками осадочного материала могли выступать современные поверхностные донные осадки Восточно-Сибирского и Чукотского (?) морей, характеризующиеся близкими геохимическими параметрами.

Суммарное содержание РЗЭ максимальное в пробе HS-VI (~163 мкг/г, в РАAS ~185 мкг/г) и минимальное – в пробе HS-I-1. Эта величина коррелирует с содержанием минеральных обломков (плагноклазов, эпидота), и, по всей видимости, с соотношением в исследованных пробах разных гранулометрических фракций, поскольку при преобладании алевро-песчаных фракций сумма РЗЭ, как правило, меньше, чем в РАAS, так как существенная часть лантаноидов сорбируется именно тонкими глинистыми частицами (Тейлор, МакЛеннан, 1988). В то же время очевидно, что этот вывод следует считать сугубо предварительным, так как он опирается всего на данные для трёх проб. Более того, если в тонкой фракции проб HS-I-1 и HS-VI суммарное содержание РЗЭ в той или иной мере приближается к величине \sum РЗЭ в РАAS, то в тонкой фракции пробы HS-I-1 сумма лантаноидов

Таблица 3

Содержание Cr, Co и PЗЭ в валовых пробах и тонкой фракции проб IRS из пролива Фрама

Table 3

Cr, Co, and REE content in bulk samples and clayey fraction of IRS from Fram Strait

Компоненты, мкг/г	Валовая проба			Глинистая фракция		
	HS-I-1	HS-II-3	HS-VI	HS-I-1	HS-II-3	HS-VI
Cr	74.7	72.6	84.6	104	58.3	80.2
Co	12.1	15.4	17.8	19.2	15.5	20.4
La	20.7	27.4	39.3	12.9	28.4	26.2
Ce	38.3	56.4	66.4	26.8	58.5	55.3
Pr	4.80	6.63	7.69	3.29	6.96	6.43
Nd	19.7	25.3	27.6	12.7	25.8	24.1
Sm	4.24	5.47	5.41	2.7	5.18	5.19
Eu	0.94	1.14	1.26	0.72	1.18	1.14
Gd	3.55	4.48	4.57	2.99	4.8	4.51
Tb	0.51	0.63	0.68	0.44	0.69	0.66
Dy	3.03	3.61	4.13	2.49	3.56	3.64
Ho	0.58	0.69	0.75	0.49	0.72	0.74
Er	1.62	1.90	2.11	1.61	1.93	2.27
Tm	0.22	0.26	0.32	0.2	0.27	0.31
Yb	1.42	1.62	2.02	1.34	1.88	1.82
Lu	0.20	0.23	0.29	0.2	0.28	0.31

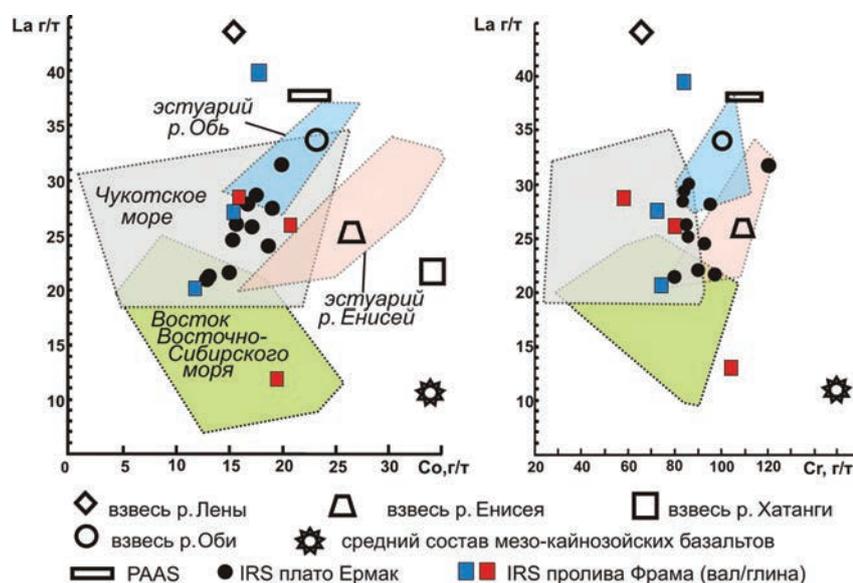


Рис. 11. Положение фигуративных точек валовых проб IRS и их глинистой фракции на диаграммах Co–La (а) и Cr–La (б). Поля составов современных донных осадков морей Российской Арктики и крупных речных артерий, а также референтные точки, по (Шевченко и др., 2017б, и ссылки там).

Fig. 11. Position of the data points of the bulk IRS probes and their clayey fraction on the Co–La (a) and Cr–La (b) diagrams. Fields of compositions of modern bottom sediments of the Russian Arctic seas and large rivers, as well as reference points, according to (Shevchenko et al., 2017b, and references therein).

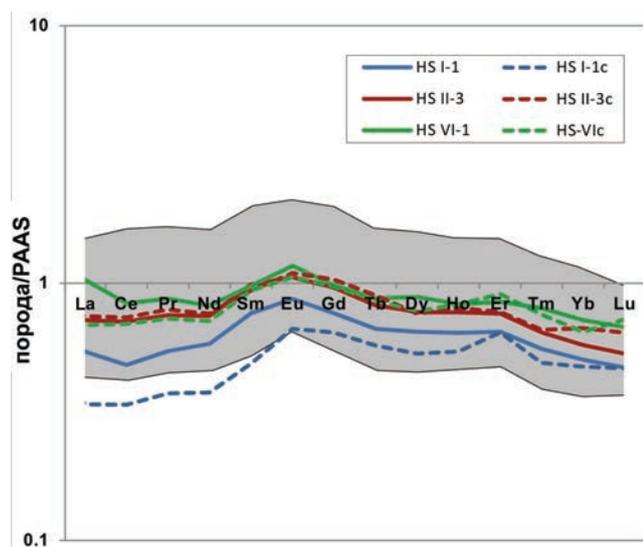


Рис. 12. Нормированные по PAAS спектры распределения РЗЭ в валовых пробах и глинистой фракции IRS из пролива Фрама.

Fig. 12. PAAS-normalized REE spectra of the bulk IRS probes and their clayey fraction from the Fram Strait.

составляет менее 40 % от величины данного параметра. Примечательно, что содержание легких РЗЭ в тонкой фракции пробы HS-I-1, содержащей среди всех рассмотренных нами проб минимальное количество кварца и хлорита (и максимальное – каолинита), значительно ниже, чем в валовой пробе. В менее выраженном виде это характерно и для пробы HS-VI. Следует отметить, что в пробах HS-I-1 и HS-VI при помощи СЭМ был обнаружен монацит в виде обломочных зёрен размером до 3–5 мкм. Спектр РЗЭ монацита ($Ce > La \approx Nd$) соответствует спектру монацитов магматогенного и метаморфогенного происхождения и вносит незначительный вклад в спектр РЗЭ валовых проб.

Нормированные по PAAS спектры распределения РЗЭ всех трёх изученных проб в определённой мере сходны (рис. 12) и соответствуют спектрам распределения лантаноидов, характерным для проб IRS, отобранных в других районах Арктики (Шевченко и др., 2017а, 2017б; Маслов и др., 2018). Вместе с тем, заметные различия в значениях \sum РЗЭ, а также $(La/Yb)_{PAAS}$ (соответственно ~ 100 мг/г и 1.08 для пробы HS-I-1, и ~ 163 мг/г и 1.43 для пробы HS-VI) позволяют предполагать, что осадочный материал в указанных пробах может происходить либо из разных районов шельфа, либо мог претерпеть различные трансформации (селективный отбор разных гранулометрических фракций) во время вмержания в морской лёд.

Заключение

Минеральный состав глинистой фракции проб IRS, отобранных в районе пролива Фрама, характеризующийся преобладанием слюд и хлоритов и сравнительно низким содержанием смектитов и каолинита, согласуется с предположением о том, что возможными источниками осадочного материала для них служили современные донные осадки мелководных шельфов моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря, имеющие преимущественно хлорит-иллитовый состав. Наличие в пробах материала, поставляемого на арктический шельф рр. Обью и Енисеем, в составе которого (особенно в последнем случае) существенную роль играет смектит (Wahsner et al., 1999), маловероятно. Этому предположению не противоречит и распределение в пробах IRS таких элементов-примесей, как Cr, Co и РЗЭ.

Содержание фракции >0.1 мм в пробах IRS составляет менее 1 %. Слагающие эту фракцию частицы представлены преимущественно агрегатами глинистых минералов с размерами отдельных частиц <5 мкм, а также кварцем, полевыми шпатами (ортоклаз, микроклин, альбит, плагиоклаз среднего состава), слюдами и хлоритом, реже – эпидотом, амфиболами, монацитом. Наиболее крупные выделения характеризуют слюды и хлорит. Присутствие обломков с различной степенью окатанности указывает на возможную гетерогенность источника или, во всяком случае, на принадлежность их к компонентам, испытывавшим перенос различной дальности, что весьма характерно для речной взвеси (Лопатин, 1952). Отсутствие на зёрнах кварца следов воздушного переноса указывает на незначительное влияние арктических островов на формирование IRS.

Различия в спорово-пыльцевых спектрах также указывают на гетерогенный источник IRS, а факт присутствия в составе исследованных проб IRS остатков пресноводных и слабо солоноводных водорослей и частиц комаров не противоречит предположению об их континентальном источнике. Следует особо остановиться на присутствии в осадках спор ели, которая нехарактерна для приполярных областей и могла быть вынесена в море Лаптевых водой и льдами р. Лены.

Приведённые данные позволяют нам предполагать, что пробы IRS из пролива Фрама включают как осадочный материал, захваченный льдом при взмучивании поверхностного слоя донных осад-

ков в мелководных районах восточной части моря Лаптевых, Восточно-Сибирского или Чукотского (?) морей, так и продукты дальнего атмосферного переноса, к числу которых принадлежит пыльца сосны, кедра, ели и берёзы.

Авторы признательны экипажу НИС «Полярштерн» за помощь в экспедиции и академику А.П. Лисицыну за ценные советы.

Исследования выполнены при финансовой поддержке проекта УрО РАН 15-15-5-4 и в рамках госзадания ИО РАН (проект № 0149-2016-0001).

Литература

- Захаров В.Ф.** (1996) Морские льды в климатической системе. СПб., Гидрометеоздат, 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.
- Лопатин Г.В.** (1952) Наносы рек СССР. М., Гидрометеоздат, 366 с.
- 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*. (В печати).
- Найдина О.Д.** (2014) Пыльца из послеледниковых осадков моря Лаптевых как биоиндикатор. *Стратиграфия. Геол. корреляция*, **22**(3), 115–124.
- Некрасова Т.П.** (1983) Пыльца и пыльцевой режим хвойных Сибири. Новосибирск, Наука, Сибирское отделение, 169 с.
- Тейлор С.Р., МакЛеннан С.М.** (1988) Континентальная кора: её состав и эволюция. М., Мир, 384 с.
- Шевченко В.П., Лисицын А.П., Штайн Р. (Stein R.), Горюнова Н.В., Клювиткин А.А., Кравчишина М.Д., Криве М. (Kriews M.), Новигатский А.Н., Соколов В.Т., Филиппов А.С., Хаас Х. (Haas C.)** (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 Sr, Co 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). (В печати).
- Condie K.C.** (1993) Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales. *Chem. Geology*, **104**, 1–37.
- Dethleff D., Nürnberg D., Reimnitz E., Saarsø M., Savchenko Y.P.** (1993) East Siberian Arctic Region Expedition '92: the Laptev Sea – its significance for Arctic sea-ice formation and transpolar sediment flux. *Berichte zur Polarforschung*, **120**, 3–44.
- 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.
- Hubert F., Caner L., Meuner A., Ferrage E.** (2012) Unraveling complex <2 μm clay mineralogy from soils using X-ray diffraction profile modeling on particle-size sub-fractions: Implications for soil pedogenesis and reactivity. *American Mineralogist*, **97**, 384–398.
- 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.
- Krause G., Schauer U.** (2001) The expeditions ARKTIS XVI/1 and ARKTIS XVI/2 of the research vessel «Polarstern» in 2000. *Berichte zur Polar- und Meeresforschung*, **389**, 108 p.
- Lisitzin A.P.** (2002) Sea-ice and iceberg sedimentation in the Ocean: recent and past. Berlin-Heidelberg-New York, Springer-Verlag, 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.
- 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.L., Eicken H., Bauch D., Weeks W.F.** (1995) The potential transport of pollutants by Arctic sea ice. *The Science of the Total Environment*, **159**, 129–146.
- 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.
- Rousseau D.-D., Duzer D., Etienne J.-L., Cambon G., Jolly D., Ferrier J., Schevin P.** (2004) Pollen record of rapidly changing air trajectories to the North Pole. *Journal of Geophysical Research*, **109**, 1–7, DOI:10.1029/2003JD003985.
- Shevchenko V.P., Lisitzin A.P., Kuptzov V.M., Ivanov G.I., Lukashin V.N., Martin J.M., Rusaikov 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.
- Wahsner M., Müller C., Stein R., Ivanov G., Levitan M., Shelekhova E., Tarasov G.** (1999). Clay-mineral distribution in surface sediments of the Eurasian Arctic Ocean and continental margin as indicator for source areas and transport pathways – a synthesis. *Boreas*, **28**, 215–233.
- 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*, (1), 12–47.
- Lopatyn G.V.** (1952) [River sediments of the USSR]. M., Gidrometeoizdat, 366 p. (in Russian)
- Maslov A.V., Shevchenko V.P., Bobrov V.A., Belogub E.V., Ershova V.B., Vereshchagin O.S., Khvorov P.V.** (2018) [Mineralogical and geochemical characteristics of ice sedimentary material from Arctic]. *Litologiya i poleznye iskopaemye [Lithology and Mineral Resources]* (In press). (in Russian)
- Naydina O.D.** (2014) The pollen complex from postglacial sediments of the Laptev Sea as a bioindicator. *Stratigraphy and Geological correlation*, **22**(3), 336–345.
- Nekrasova T.P.** (1983) [Pollen and pollen regime of Siberian coniferae]. Novosibirsk, Nauka, Siberian Branch, 169 p. (in Russian)
- Shevchenko V.P., Lisitzin A.P., Stein R., Goryunova N.V., Klyuvitkin A.A., Kravchishina M.D., Krievs M., Novigatskiy A.N., Sokolov V.T., Filippov A.S., Haas C.** (2007) [Distribution and composition of insoluble particles in the Arctic snow]. *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 sedimentary material of drifting ice north of the Beaufort Gyre]. *Litosfera [Lithosphere]*, **17**(3), 59–70. (in Russian)
- Shevchenko V.P., Maslov V.A., Stein R.** (2017b) [Distribution of rare and trace elements in sedimentary material carried by drifting ice in the Ermak Plateau region, Arctic Ocean]. *Okeanologiya [Oceanology]*, **57**(6). (in press). (in Russian)
- Taylor S.R., MacLennan S.M.** (1988) [Continental crust: its composition and evolution] M., Mir [World], 384 p. (in Russian)
- Zakharov V.F.** (1996) [Sea ice in the climate system]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 213 p. (in Russian)

Поступила в редакцию 8 ноября 2017 г.