

СВОЙСТВА МЕРЗЛЫХ ПОРОД И ЛЬДА

УДК 551.345

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-4(44-53)

СОСТАВ И МИКРОСТРОЕНИЕ ШЕЛЬФОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ КАРСКОГО МОРЯ

О.С. Калашникова¹, А.Н. Курчатова^{1,2}, Е.А. Слагода^{1,2}¹ Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН,625000, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия; olga.gasheva.91@mail.ru² Тюменский индустриальный университет, 625000, Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия

Приведены результаты исследований шельфовых отложений Карского моря на траверсе урочища Шпидлер (Югорский полуостров) и мыса Марресале (западное побережье п-ова Ямал) методами лазерной гранулометрии, порошковой дифрактометрии и электронной микроскопии. Выделены три фациальных типа донных осадков на основе литологических, минералогических, морфологических характеристик: морской и прибрежно-морской седиментации и континентального сноса. Установленные признаки криогенеза в изученных отложениях трактуются как привнесенные либо за счет разрушения прибрежных террас, либо за счет айсбергового переноса.

Арктический шельф, Карское море, донные осадки, микростроение, криогенез

SHELF SEDIMENTS OF THE KARA SEA: COMPOSITION AND MICROSTRUCTURE

O.S. Kalashnikova¹, A.N. Kurchatova^{1,2}, E.A. Slagoda^{1,2}¹ Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre, SB RAS,86, Malugina str., Tyumen, 625000, Russia; olga.gasheva.91@mail.ru² Tyumen Industrial University, 38, Volodarskogo str., Tyumen, 625000, Russia

The shelf sediments of the Kara Sea sampled along two profiles, northward from the Spindler Cape (Yugor Peninsula) and W–E between Spindler and the Marresale Cape (western Yamal Peninsula) have been investigated by several methods: laser particle-size analysis, powder X-ray diffractometry, and electron microscopy. The bottom sediments belong to the marine, coastal, and continental facies distinguished on the basis of lithology, mineralogy, morphology, and signatures of cryogenic weathering. The signatures of cryogenesis revealed in the sediments are attributed to coast retreat or ice rafting.

Arctic shelf, Kara Sea, bottom sediments, microstructure, cryogenesis

ВВЕДЕНИЕ

Арктический шельф является зоной стратегических интересов России, здесь проходит самая протяженная морская граница страны, для ее охраны ведется активное строительство военных баз, в шельфовой зоне сосредоточено до 70 % ресурсного потенциала углеводородов, являющихся основной статьей экспорта. При возведении инженерных сооружений необходимо знать особенности строения отложений, которые служат для них естественным основанием. Кроме того, данная территория является ключевой в вопросе понимания истории формирования и эволюции позднечетвертичных толщ Арктики. Этой тематике посвящено значительное количество научных работ и международных проектов, однако большинство из них сконцентрировано на изучении ледниковых образований материкового обрамления и архипелагов. Получаемые при этом данные переносятся на шельф, часто без учета специфики и фактического материала по морской части территории.

Инженерно-геологическое изучение арктического шельфа России началось с 1980-х гг. в связи с поиском нефтегазоперспективных площадей Баренцево-Карского шельфа. Первые данные, подтверждающие наличие мерзлых толщ на шельфе, обнаружены при бурении у северо-западного побережья п-ова Ямал и в Печорском море [Gritsenko, Bondarev, 1994]. Значительный объем фактического материала о строении, составе и физико-механических свойствах шельфовых отложений был получен при исследованиях морских акваторий и берегового обрамления Северного Ледовитого океана [Соловьев, 1988; Неизвестнов, Решетова, 1990; Данилов, 1992; Мельников, Спесивцев, 1995; Неизвестнов и др., 2012].

Одна из наиболее дискуссионных проблем палеогеографии Арктики – история развития шельфовой криолитозоны и роль трансгрессий арктического бассейна в деградации мерзлых толщ [Шполянская и др., 2006; Рокос, 2008]. Боль-

шинство исследователей предполагают, что шельфовая криолитозона была сформирована на суше во время глубокой поздневалдайской (сарганской) регрессии моря. Однако есть сведения и о современном образовании льдистых донных отложений, например, в юго-восточной части Баренцева и юго-западной части Карского морей [Маслов, 1988; Мельников и др., 1998], а также в море Лаптевых [Kassens et al., 2000].

В работе представлены результаты исследования состава и строения донных осадков шельфа Карского моря, полученные с помощью гравитационных трубок летом (август) 2007 г. экспедицией ВНИИОкеангеология на научно-исследовательском судне “Иван Петров” [Ванштейн и др., 2008].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы для исследований были отобраны по двум профилям шельфовой зоны Карского моря: вдоль меридиана от урочища Шпидлер (Югорский п-ов, профиль К-I) и через устьевую часть Байдаракской губы к мысу Марресале (западное побережье п-ова Ямал, профиль К-II) (рис. 1).

Опробование донных осадков на каждой геологической станции на гранулометрический и минералогический анализы проводилось с использованием гравитационной трубки. Замеры температуры выполнялись с интервалом 10 см по всему разрезу колонки, пробы на аналитические исследования отбирались из верхней, средней и нижней частей разреза. Интервал глубин водной толщи на траверсе урочища Шпидлер составляет от 22 до 220 м, при этом температура во время работ менялась скачкообразно от 8.6 °С в приповерхностном слое до –1.76 °С в придонном. Температура осадка мелководной части профиля составила –1.2 °С. На траверсе метеостанции Марресале глубина моря варьирует незначительно – от 12 до 36 м, температура поверхностного слоя изменялась в интервале от 3.2 до 5.9 °С, придонного слоя – от –1.05 до 3.15 °С, донных осадков – от –0.9 до 2.0 °С [Ванштейн и др., 2008].

Гранулометрический анализ был выполнен с использованием лазерного дифракционного анализатора размера частиц Mastersizer 3000 (Malvern) с водной дисперсией [Курчатова, Rogov, 2014]. Минеральный состав образцов определялся на рентгеноструктурном порошковом дифрактометре D2 PHASER (Bruker). Обработка дифрактограмм выполнена с использованием программного обеспечения Eva и Toraz. Результаты определения минерального состава образцов выделенных фракций использовались для вычисления коэффициента криогенной контрастности (ККК) [Конищев, Rogov, 1994]:

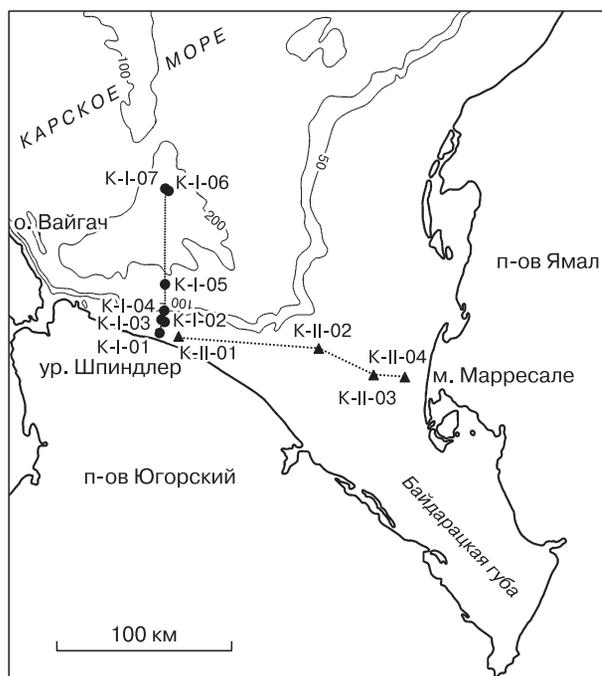


Рис. 1. Обзорная схема отбора донных осадков по профилям К-I (на траверсе урочища Шпидлер) и К-II (на траверсе м. Марресале).

$$ККК = \frac{Q_1/F_1}{Q_2/F_2},$$

где Q_1, F_1 – содержание кварца и полевых шпатов во фракции 0.05–0.01 мм; Q_2, F_2 – содержание кварца и полевых шпатов во фракции 0.10–0.05 мм.

Микроскопическое исследование образцов выполнено на сканирующем электронном микроскопе ТМ3000 (Hitachi), совмещенном с рентгеноспектральным анализатором SwiftED3000 (Oxford). При этом особое внимание было обращено на микротекстуру отложений и морфологию кварцевых частиц, являющихся важным диагностическим признаком криогенеза четвертичных осадков [Рогов, 2009].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Гранулометрический анализ. Установлено, что изученные образцы донных осадков шельфа Карского моря имеют высокое (от 50 до 74 %) содержание алевритовой фракции (0.005–0.05 мм), поэтому все отложения рассматриваются как семейства алевритов различной дисперсности (рис. 2) [Фролов, 1993]. Образцы донных осадков с содержанием глинистых частиц более 25 % и песчаных – менее 10 % были отнесены к *аледритам сильноглинистым*; в *аледритах песчано-сильноглинистых* установлено содержание глинистых частиц менее 25 % и песчаных – менее 20 %;

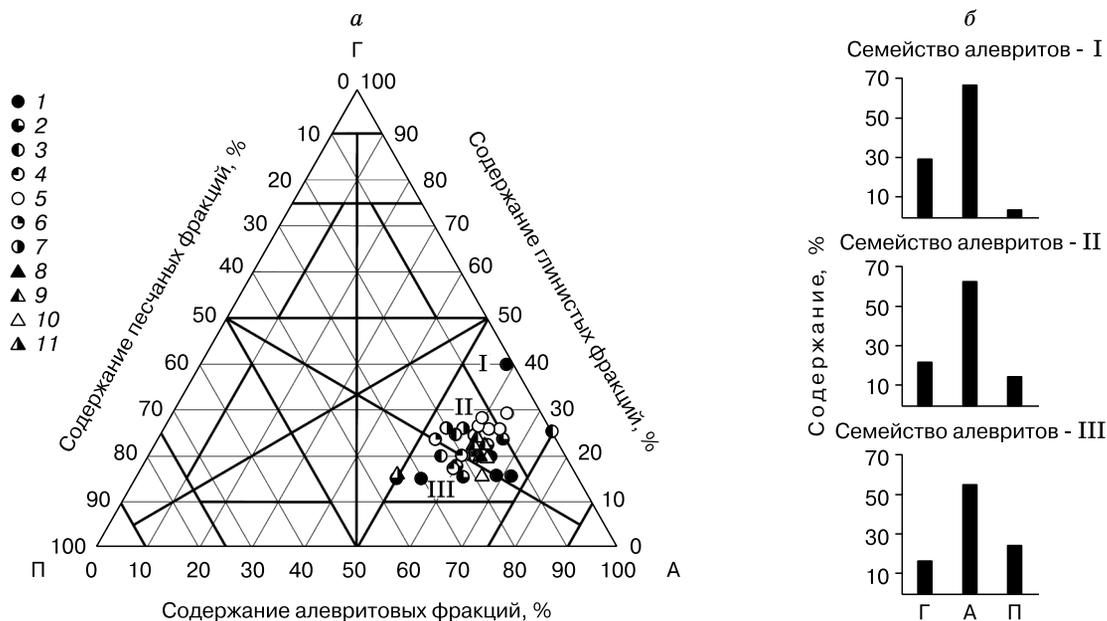


Рис. 2. Треугольная диаграмма гранулометрического состава изученных отложений шельфа Карского моря (а) [Фролов, 1993] и диаграммы гранулометрического состава семейств алевритов (б).

Г – глинистые фракции (<0.005 мм); А – алевритовые фракции (0.005–0.05 мм); П – песчаные фракции (0.05–2.5 мм).
 I – алевриты сильноглинистые; II – алевриты песчано-сильноглинистые; III – алевриты песчано-глинистые. Номера профилей и колонок: 1 – К-I-01; 2 – К-I-02; 3 – К-I-03; 4 – К-I-04; 5 – К-I-05; 6 – К-I-06; 7 – К-I-07; 8 – К-II-01; 9 – К-II-02; 10 – К-II-03; 11 – К-II-04.

в алевритах песчано-глинистых содержание глинистых – менее 20 % и песчаных частиц – более 25 %. Коэффициент сортировки во всех образцах не превышает 0.5, что свидетельствует о хорошей сортированности осадков.

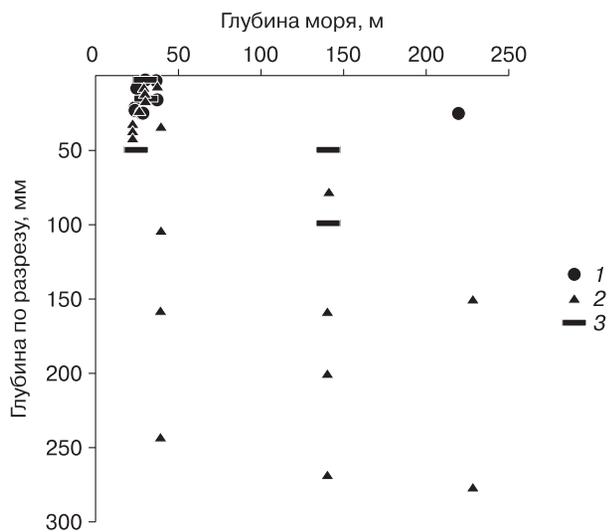


Рис. 3. Распределение образцов различных литогенетических типов в зависимости от глубины моря и положения в разрезе.

1 – алевриты песчано-глинистые; 2 – алевриты песчано-сильноглинистые; 3 – алевриты сильноглинистые.

Распределение образцов различных литогенетических типов в зависимости от глубины моря и положения в разрезе отражено на точечной диаграмме (рис. 3). Алевриты песчано-глинистые распространены на мелководье и по разрезу встречаются не глубже 30 см. Алевриты песчано-сильноглинистые распространены на различной глубине по разрезу, тем не менее встречаются и на мелководных участках. Алевриты сильноглинистые в большей степени распространены в глубоководной части шельфа; в изученных колонках донных осадков с глубины более 140 м они слагают весь разрез. Алевриты сильноглинистые плотные, темносерые, отмеченные также в колонках в прибрежной зоне Югорского полуострова, возможно, представлены плейстоценовыми глинами, слагающими береговые обнажения урочища Шпиндлер.

Для интерпретации литогенетических особенностей отложений на основе полученных данных были построены диаграммы Гостинцева (рис. 4) и Пассеги (рис. 5). Диаграмма Гостинцева строится по соотношению двух гранулометрических коэффициентов – асимметрии (A_s) и эксцесса (E_x), что отражает механическую дифференциацию обломочных частиц в различных фациальных условиях [Гостинцев, 1989]. По результатам анализа две трети (20 из 33) изученных образцов отнесены к участкам с активным волновым воздействием, с течениями и приливными явлениями

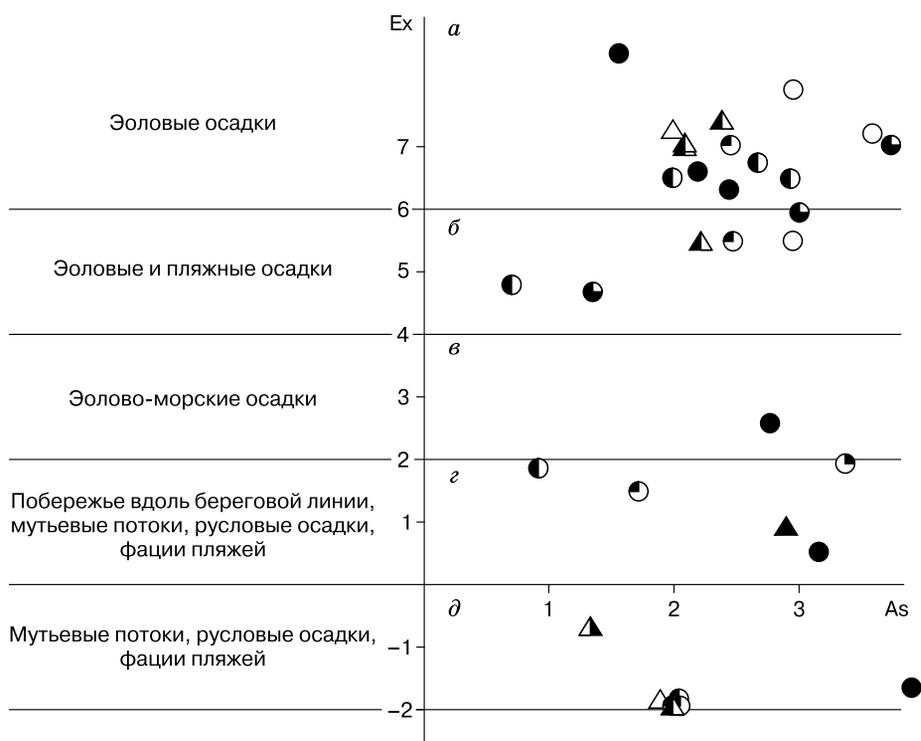


Рис. 4. Генетическая диаграмма динамометрических полей Гостинцева:

a – морские осадки, активное волновое воздействие, приливные явления; *б* – морские осадки, активное волновое воздействие; *в* – осадки рек и пойм; *г* – широкие участки устьев рек, мелководье, речные плёсы, морские фации; *д* – слабые течения, застойные зоны, озера и коры выветривания. As – асимметрия; Ex – эксцесс. Усл. обозн. см. на рис. 2.

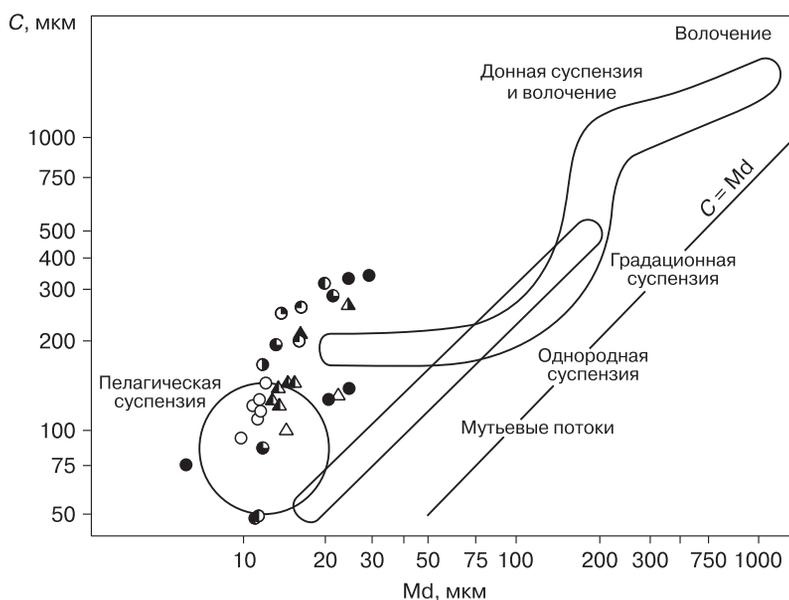


Рис. 5. Генетическая диаграмма Пассеги для определения транспортных путей обломочных частиц в водной среде.

C – 99%-й квантиль; *Md* – медиана гранулометрического состава отложений. Усл. обозн. см. на рис. 2.

(см. рис. 4, а, б); 7 образцов приурочены к осадкам слабых течений и застойных зон (д); 5 образцов характеризуются как отложения морских фаций мелководья (з), 1 образец попал в поле осадков рек и пойм (в).

Генетическая диаграмма Пассеги строится по соотношению медианы (М) и 99%-го квантиля (С) гранулометрического состава отложений, который характеризует максимальную подъемную мощность потока [Passega, Byramjee, 1969]. Она основана на представлении, что перенос осадка в движущемся потоке осуществляется как путем качения по дну, так и путем влечения в неоднородной суспензии. Из анализа диаграммы следует, что все отложения принадлежат полям пелагической и градационной суспензии и характеризуются как осадки “спокойной воды”.

Минералогический анализ. По минеральному составу выделены три типа отложений: морские, где содержание глин составляет 30–40 мас.%, прибрежно-морские (20–30 мас.%) и континентальные (10–20 мас.%). Эти типы соответствуют литологическим разновидностям: морской тип – алевриты сильноглинистые, прибрежно-морской – алевриты песчано-сильноглинистые, континентальный – алевриты песчано-глинистые (рис. 6).

По минеральному составу легкой фракции выделенные литотипы относятся к калишпат-плагиоклаз-кварцевой ассоциации; высокие значения массового содержания кварца по отношению к содержанию глин ($Q/\Sigma_{\text{clay}} > 1$), а также по отношению к содержанию полевых шпатов ($Q/F_s > 2.5$) являются индикаторами терригенного происхождения осадка. Так, для изученных образцов

донных осадков континентального типа средние значения указанных коэффициентов составляют $Q/\Sigma_{\text{clay}} = 4.0$ (3.3–4.6) и $Q/F_s = 4.9$ (4.4–5.5); прибрежно-морского типа – $Q/\Sigma_{\text{clay}} = 1.5$ (1.2–1.8) и $Q/F_s = 2.9$ (2.5–3.2); морского типа – $Q/\Sigma_{\text{clay}} = 0.8$ (0.1–1.0) и $Q/F_s = 2.0$ (2.0–2.1). Во всех типах среди глинистых минералов преобладают смешанослойные глинистые минералы группы иллит-сметита, что характерно для шельфовых отложений арктических морей [Левитан и др., 2004].

Микроскопические исследования. Отложения алевритов сильноглинистых характеризуются высоким содержанием глинистых частиц, плотным сложением и большой степенью однородности (рис. 7). В микротекстуре просматривается волнистая слоистость, преимущественно за счет ориентировки слюдяного материала. В отложениях сильноглинистого алеврита, отобранных в точках с наибольшими глубинами моря (220–228 м), обнаружены железомарганцевые конкреции, являющиеся типичными новообразованиями для фаций глубоководных отложений арктических морей [Боданов и др., 1994]. В изученных образцах при достаточно крупном увеличении различимы отдельные кварцевые частицы (>100 мкм) со сколами и раковистым изломом, что может свидетельствовать о криогенном преобразовании отложений [Рогов, 2009; Udayaganesan et al., 2011; Müller, Knies, 2013; Woronko, 2016].

Алевриты песчано-сильноглинистые характеризуются неоднородным мозаичным сложением с четким выделением отдельных зерен из глинистого матрикса, заполняющего межзеренное пространство (рис. 8). Глинистый материал образует

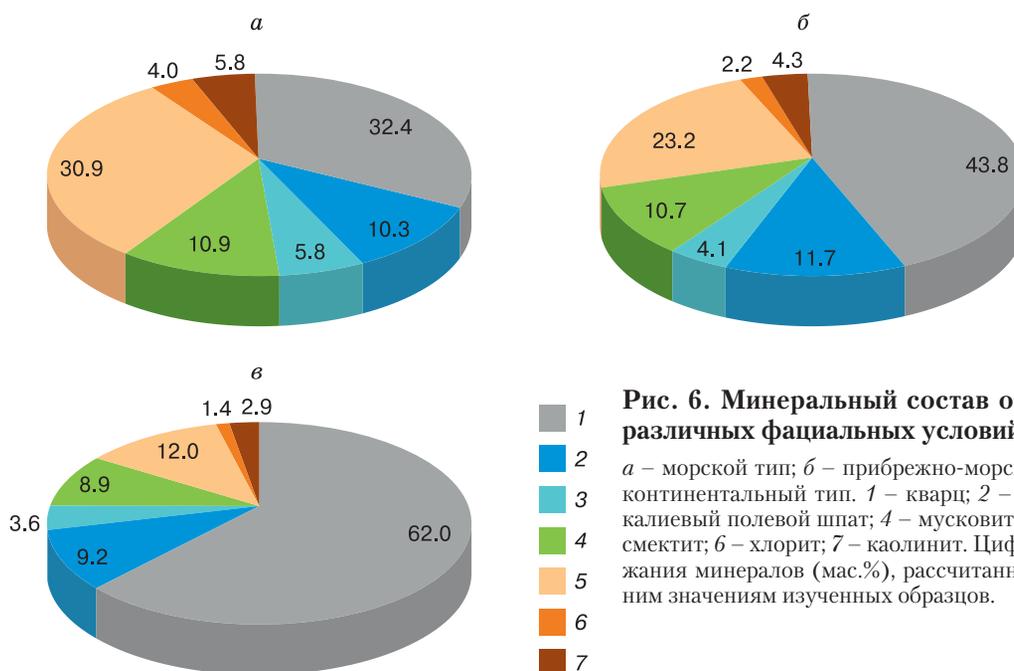


Рис. 6. Минеральный состав отложений различных фациальных условий:

- 1 – кварц; 2 – альбит; 3 – калиевый полевой шпат; 4 – мусковит; 5 – иллит/сметит; 6 – хлорит; 7 – каолинит. Цифры – содержания минералов (мас.%), рассчитанные по средним значениям изученных образцов.

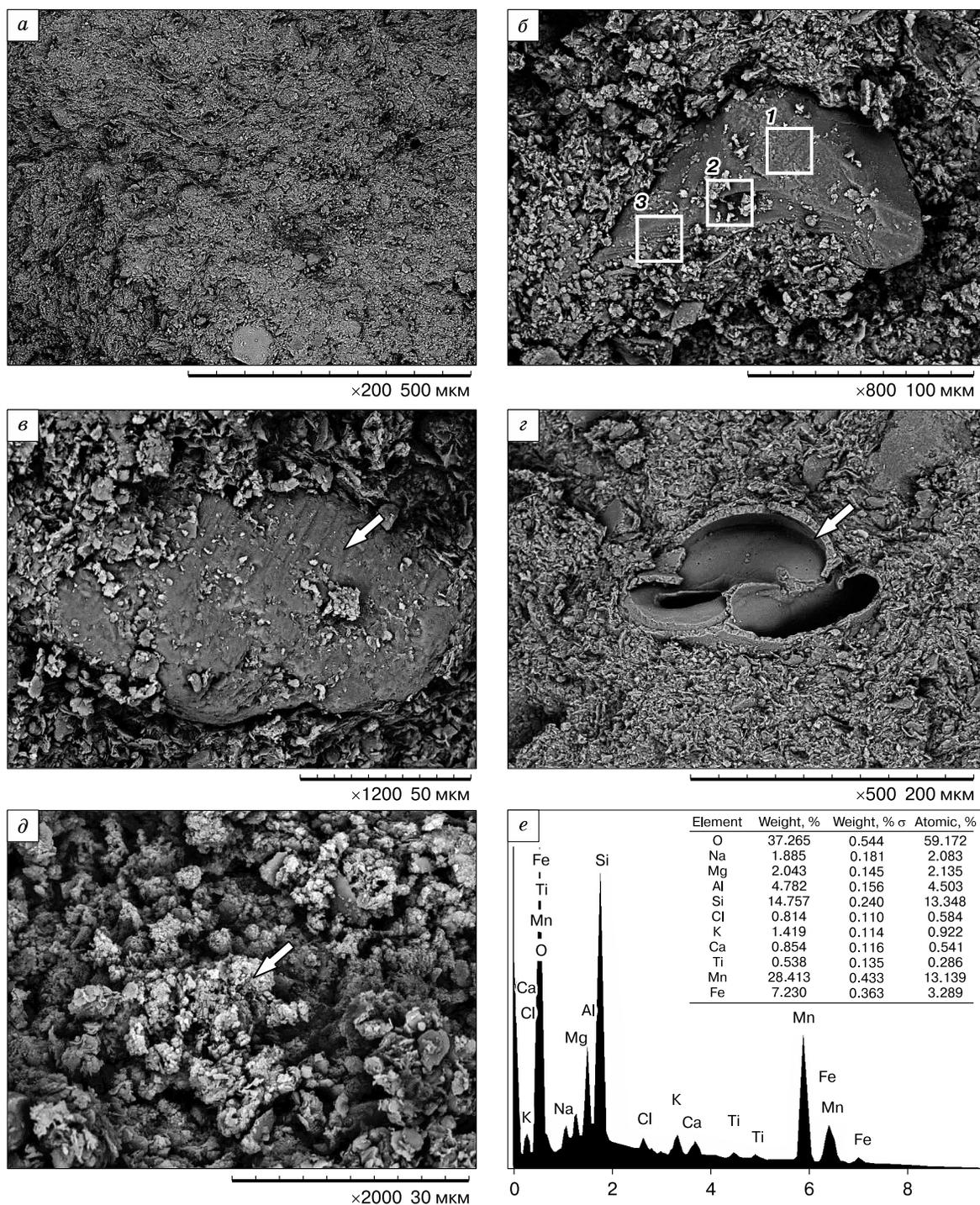


Рис. 7. Микростроение алеуритов сильноглинистых:

a – волнистая микротекстура отложений; *б* – частица кварца (1 – плоскостной скол, 2 – раковистый скол, 3 – субпараллельная штриховка); *в* – микроклин со ступенчатой поверхностью согласно спайности; *г* – раковина гастроподы; *д* – железомарганцевые конкреции; *е* – элементный состав и диаграмма спектрального анализа железомарганцевой конкреции.

“рубашки” на поверхности зерен, скапливается на контактах частиц, образуя скелетную микроструктуру, и не имеет ориентировки. Отложения этого

семейства алеуритов характеризуются наличием большого количества агрегатов размером от 30 до 75 мкм. Отдельные кварцевые частицы имеют

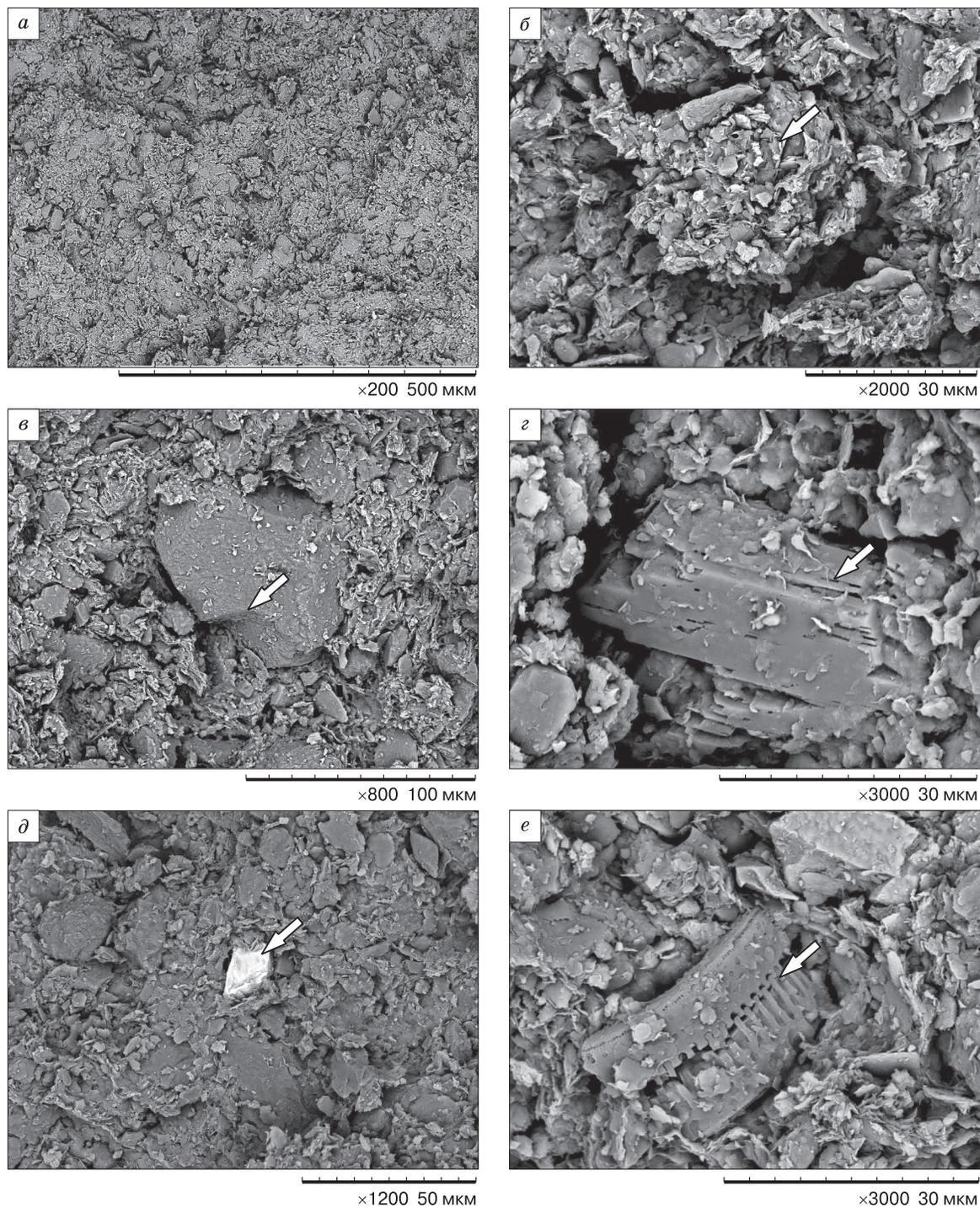


Рис. 8. Микростроение алевроитов песчано-глинистых:

a – мозаичная микротекстура отложений; *б* – глинистый агрегат; *в* – частица кварца с раковистым сколом; *г* – частица полевого шпата с трещинами по спайности; *д* – новообразование лантаноидов; *е* – створки скелета диатомовой водоросли.

угловатую форму, раковистый излом, причем как мелкие (<75 мкм), так и крупные (>100 мкм). В отложениях встречаются зерна полевого шпата с признаками выщелачивания и коллоидные стя-

жения легких лантаноидов (La, Ce, Nd), характерные для морского седиментогенеза.

Алевроиты песчано-глинистые характеризуются рыхлым сложением, глинистый материал ло-

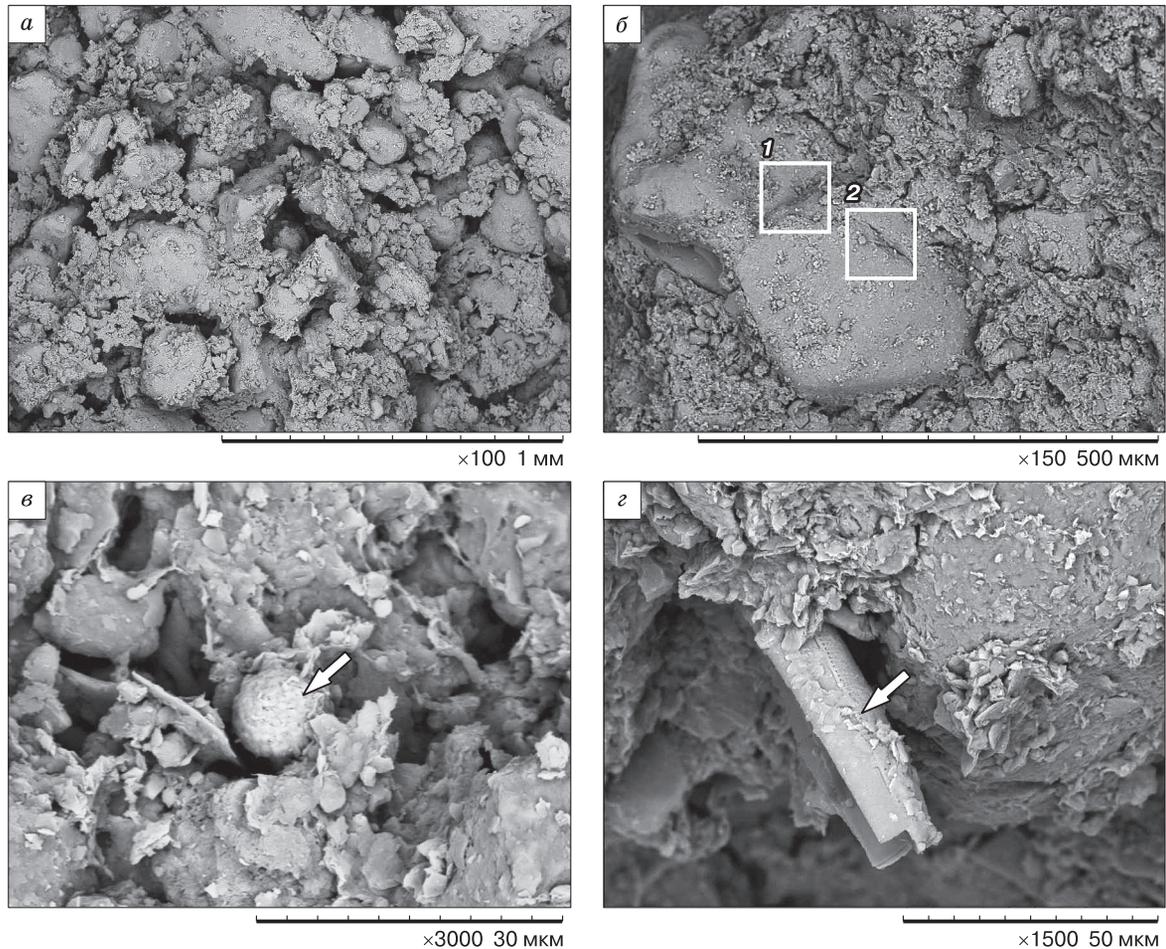


Рис. 9. Микростроение алевроитов песчано-глинистых:

a – рыхлое сложение осадка; *б* – частица кварца (1 – раковистый скол, 2 – трещина); *в* – стяжения гидротроиллита; *з* – створка скелета диатомовой водоросли.

кализован преимущественно в отдельные хлопья в межзеренном пространстве (рис. 9). Отмечено, что крупные частицы (>100 мкм), как правило, хорошо окатаны, в отличие от более мелких зерен, которые имеют сколы и раковистый излом. В образцах песчаных алевроитов обнаружены шарообразные стяжения гидротроиллита, приуроченные, как правило, к скоплениям глинистого материала.

Несмотря на отрицательную температуру придонных слоев мелководной зоны шельфа (в интервале глубин 20–30 м) и осадков, следов реликтовой или современной мерзлоты в микротекстуре отложений не обнаружено. Максимальные значения коэффициента криогенной контрастности (0.9) установлены в изученных пробах грунтовых колонок, отобранных на Байдарацкой губе. Эти образцы характеризуются преобладанием тонкопылеватой фракции (50–75 мкм) и присутствием кварцевых частиц с криогенными признаками в широком гранулометрическом спектре – от мелкого песка до тонкого алевроита. Это

может свидетельствовать о том, что влияние криогенеза на данные отложения осуществлялось в субэаральных условиях континентальных окраин, но в результате размыва позднеплейстоценовых террас они были переотложены течениями с активными волнениями приливно-отливного типа. Более крупные частицы кварца песчаной фракции имеют достаточно хорошо окатанную форму, характерную для отложений водных потоков.

Образцы более глубоководной шельфовой зоны, относящиеся к сильноглинистому и песчано-сильноглинистому алевроитам, характеризуются наличием единичных крупных (>100 мкм) угловатых кварцевых частиц с раковистыми сколами, присутствием железомарганцевых конкреций, большим количеством включений раковин гастропод и морских диатомовых. Можно сделать вывод, что данные отложения были сформированы в морских условиях с привнесением обломочного материала из айсбергов [Лисицын, 2010], подверженного криогенному преобразованию.

ВЫВОДЫ

1. Изученные донные осадки шельфа восточного сектора Карского моря по гранулометрическому составу классифицированы как алевриты различных семейств: сильноглинистые, песчано-сильноглинистые и песчано-глинистые. Диаграммы Гостинцева и Пассеги характеризуют отложения как морские осадки участков с активными и слабыми волнениями, но в целом как отложения “спокойной воды”. По условиям формирования мелководные отложения шельфа имеют прибрежно-морской генезис – до изобаты 50 м (локально – переотложенный континентальный) и морской генезис – глубже изобаты 50 м.

2. По минеральному составу выделены три фациальных типа шельфовых отложений: морской, прибрежно-морской и континентальный. Все фациальные типы соответствуют семействам алевритов: морской – алевриту сильноглинистому, прибрежно-морской – алевриту песчано-сильноглинистому, континентальный – алевриту песчано-глинистому.

3. Следы промерзания в микростроении изученных колонок донных осадков, свидетельствующие о существовании реликтовой или современной мерзлоты, не установлены. Признаки криогенеза в мелководных донных осадках восточного сектора Карского моря установлены на основе морфологических особенностей кварцевых зерен и являются унаследованными. Так, в алевритах песчано-глинистых присутствуют мелкие (<75 мкм) зерна кварца угловатой формы с раковистым изломом, характерные для переотложенных субаэральных отложений позднелейстоценовых террас. В алевритах сильноглинистых и песчано-сильноглинистых встречаются крупные (>100 мкм) частицы со сколами и раковистым изломом, которые могли быть привнесены в отложения вместе с обломочными материалам айсбергов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-00376).

Литература

Богданов Ю.А., Горшков А.И., Гурвич Е.Г., Богданова О.Ю., Дубинина Г.И., Иванов Г.В., Исаева А.Б., Муравьев К.Г. Железо-марганцевые конкреции Карского моря // *Океанология*, 1994, т. 34, № 5, с. 789–800.

Ванштейн Б.Г., Захаров В.Ю., Каминский Д.В., Касьянова Н.А., Кузнецова М.В., Серов П.И., Косс А.В. Экспедиционные исследования в юго-западной части Карского моря. Экспедиционные исследования ВНИИОкеангеология в 2007 году // *Ежегодный обзор*. СПб., ВНИИОкеангеология, 2008, с. 44–51.

Гостинцев К.К. Методические указания по дробному гранулометрическому анализу седиментационным способом. Ленинград, ВНИГРИ, 1989, 181 с.

Данилов И.Д. Арктическая криогенно-маринная формация и основные этапы ее формирования // *Геологическая исто-*

рия Арктики в мезозое и кайнозое. СПб., ВНИИОкеангеология, 1992, кн. II, с. 29–37.

Конищев В.Н. Методы криолитологических исследований / В.Н. Конищев, В.В. Рогов. М., Изд-во Моск. ун-та, 1994, 135 с.

Курчатова А.Н., Рогов В.В. Новые методы и подходы к изучению гранулометрического и морфологического состава криогенных грунтов // *Инж. изыскания*, 2014, № 5–6, с. 58–63.

Левитан М.А., Буртман М.В., Демина Л.Л., Крупская В.В., Седых Э.М., Чудецкий М.Ю. История голоценовой седиментации в южной части Карского моря // *Литология и полез. ископаемые*, 2004, № 6, с. 651–666.

Лисицын А.П. Новый тип седиментогенеза в Арктике – ледовый морской, новые подходы к исследованию процессов // *Геология и геофизика*, 2010, т. 51, № 1, с. 18–60.

Маслов А.Д. Криодиогенез в условиях субаквального осадконакопления // *Проблемы геокриологии*. М., Наука, 1988, с. 41–55.

Мельников В.П. Инженерно-геологические и геокриологические условия шельфа Баренцева и Карского морей / В.П. Мельников, В.И. Спесивцев. Новосибирск, Наука, 1995, 195 с.

Мельников В.П., Федоров К.М., Вольф А.А., Спесивцев В.И. Анализ возможного сценария образования придонных ледяных бугров на шельфе Печорского моря // *Криосфера Земли*, 1998, т. II, № 4, с. 51–57.

Неизвестнов Я.В., Козлов С.А., Кондратенко А.В. Изменчивость и неоднородность физико-механических свойств новейших отложений шельфа морей Северного Ледовитого океана // *Записки Горного ин-та*, 2012, т. 197, с. 203–208.

Неизвестнов Я.В., Решетова О.В. Инженерная геология шельфов морей Северного Ледовитого океана // *Инженерная геология СССР. Шельфы СССР*. М., Недра, 1990, с. 44–90.

Рогов В.В. Основы криогенеза. Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2009, 203 с.

Рокос С.И. Инженерно-геологические особенности приповерхностных зон аномально высокого пластового давления на шельфе Печорского и южной части Карского морей // *Инж. геология*, 2008, № 4, с. 22–28.

Соловьев В.А. Баренцевоморский шельф // *Геокриология СССР. Европейская территория СССР*. М., Недра, 1988, с. 259–262.

Шполянская Н.А., Стрелецкая И.Д., Сурков А.В. Криолитогенез в пределах арктического шельфа (современного и древнего) // *Криосфера Земли*, 2006, т. X, № 3, с. 49–60.

Фролов В.Т. Литология. М., Изд-во Моск. ун-та, 1993, кн. 2, 432 с.

Gritsenko I.I., Bondarev V.N. Subsea Permafrost, Gas Hydrates and Gas Pockets in Cenozoic Sediments of the Barents, Pechora and Kara Seas: Preprint 14th World Petroleum Congress, Stavanger, topic 6, 1994.

Kassens H., Bauch H., Drachev S., Gierlichs A., Niessen F., Taldenkova E., Roudouy A., Thiede J., Wessels M. The Transdrift VIII Expedition to the Laptev Sea: the shelf drilling campaign of “Laptev Sea System 2000” // *Sixth Workshop on Russian / German Cooperation: Laptev Sea System*. Terra Nostra, 2000, No. 8, p. 39–40.

Müller A., Knies J. Trace elements and cathodoluminescence of detrital quartz // *Climate of the Past*, 2013, vol. 9, p. 2615–2630.

- Passega R., Byramjee R.** Grain-size image of clastic deposits // *Sedimentology*, 1969, vol. 13, No. 3–4, p. 233–252.
- Udayaganesan P., Angusamy N., Gujar A.R., Rajamanickam G.V.** Surface microtextures of quartz grains from the central coast of Tamil Nadu // *J. Geol. Soc. India*, 2011, vol. 77, p. 26–34.
- Woronko B.** Frost weathering versus glacial grinding in the micromorphology of quartz sand grains: Processes and geological implications // *Sedimentary Geol.*, 2016, No. 335, p. 103–119.
- Bogdanov Yu.A., Gorshkov A.I., Gurchich E.G., Bogdanova O. Yu., Dubinina G.I., Ivanov G.V., Isaeva A.B., Muraviev K.G.** Iron-manganese concretions of the Kara Sea. *Oceanologiya* [Oceanography], 1994, vol. 34, No. 5, p. 789–800 (in Russian).
- Vanstein B.G., Zakharov V.Yu., Kaminsky D.V., Kasyankova N.A., Kuznetsova M.V., Serov P.I., Koss A.V.** Marine surveys of 2007 in the Southwestern Kara Sea. Surveys of 2007 by VNIIOkeangeologiya. In: Annual review. St. Petersburg, VNIIOkeangeologiya, 2008, p. 44–51 (in Russian).
- Gostintsev K.K.** Metodicheskie ukazaniya po drobnomu granulometricheskomu analizu sedimentatsionnym sposobom [Guidelines for Fractional Particle Size Analysis by the Sedimentation Method]. Leningrad, VNIGRI, 1989, 181 p. (in Russian).
- Danilov I.D.** Arctic cryogenic marine sediments and their main deposition stages. In: *Geologicheskaya istoriya Arktiki v mezozoe i kainozoe* [Mesozoic and Cenozoic Geological History of the Arctic]. St. Petersburg, VNIIOkeangeologiya, 1992, book II, p. 29–37 (in Russian).
- Konischev V.N., Rogov V.V.** Metody kriolitologicheskikh issledovaniy [Methods of Permafrost Research]. Moscow, Moscow University Press, 1994, 135 p. (in Russian).
- Kurchatova A.N., Rogov V.V.** New methods and approaches to the study of the granulometric and morphological composition of cryogenic soils. *Inzhinernye Izyskaniya* [Engineering Survey], 2014, No. 5–6, p. 58–63 (in Russian).
- Levitani M.A., Burtman M.V., Demina L.L., Krupskaya V.V., Sedykh E.M., Chudetsky M.Yu.** Holocene deposition history in the southern Kara Sea *Litologiya i Poleznye Iskopaemye* [Lithology and Minerals Deposits], 2004, No. 6, p. 651–666 (in Russian).
- Lisitsyn A.P.** Marine ice-rafting as a new type of sedimentogenesis in the Arctic and novel approaches to studying sedimentary processes. *Russian Geology and Geophysics*, 2010, vol. 51, No. 1, p. 12–47.
- Maslov A.D.** Cryodiagenesis in marine deposition. In: *Problemy Geokriologii* [Problems of Geocryology]. Moscow, Nauka, 1988, p. 41–55 (in Russian).
- Melnikov V.P., Spesivtsev V.I.** Inzhenerno-geologicheskie i geokriologicheskie usloviya shelfa Barentseva i Karskogo morei [Geotechnical and Geocryological Conditions of the Barents and Kara shelves]. Novosibirsk, Nauka, 1995, 195 p. (in Russian).
- Melnikov V.P., Fedorov K.M., Volf A.A., Spesivtsev V.I.** Analysis of the possible scenario of the formation of bottom ice mounds on the shelf of the Pechora Sea. *Kriosfera Zemli* [Earth's Cryosphere], 1998, vol. II, No. 4, p. 51–57 (in Russian).
- Neizvestnov Ya.V., Kozlov S.A., Kondratenko A.V.** Variability and heterogeneity of mechanical properties of recent sediments in the Arctic shelf. *Zapiski Gornogo Instituta* [Reports of the Mining Institute], 2012, vol. 197, p. 203–208 (in Russian).
- Neizvestnov Ya.V., Reshetova O.V.** Engineering geology of the Arctic shelves. In: *Inzhenernaya Geologiya SSSR. Shelfy SSSR* [Engineering Geology of the USSR. Shelves of the USSR]. Moscow, Nedra, 1990, p. 44–90 (in Russian).
- Rogov V.V.** *Osnovy kriogeneza* [Fundamentals of Cryogenesis]. Novosibirsk, Academic Publishing House “Geo”, 2009, 203 p. (in Russian).
- Rokos S.I.** Geotechnical features of near-surface overpressure zones in shelf reservoirs of the Pechora and southern Kara Seas. *Inzhenernaya Geologiya* [Engineering Geology], 2008, No. 4, p. 22–28 (in Russian).
- Soloviev V.A.** Barents Sea Shelf. In: *Geocryologiya SSSR. Evropeiskaya Territoriya SSSR* [Geocryology of the USSR. European USSR]. Moscow, Nedra, 1988, p. 259–262 (in Russian).
- Shpolyanskaya N.A., Streletskaya I.D., Surkov A.V.** Cryolithogenesis in Arctic shelf (recent and relict). *Kriosfera Zemli* [Earth's Cryosphere], 2006, vol. X, No. 3, p. 49–60 (in Russian).
- Frolov V.T.** *Litologiya* [Lithology]. Book 2. Moscow, Moscow University Press, 1993, 432 p. (in Russian).
- Gritsenko I.I., Bondarev V.N.** Subsea Permafrost, Gas Hydrates and Gas Pockets in Cenozoic Sediments of the Barents, Pechora and Kara Seas: Preprint 14th World Petroleum Congress, Stavanger, topic 6, 1994, <https://www.onepetro.org/conference-paper/WPC-26159>.
- Kassens H., Bauch H., Drachev S., Gierlichs A., Niessen F., Taldenkova E., Roudoy A., Thiede J., Wessels M.** The Transdrift VIII Expedition to the Laptev Sea: the shelf drilling campaign of “Laptev Sea System 2000”. In: *Sixth Workshop on Russian / German Cooperation: Laptev Sea System*. Terra Nostra, 2000, No. 8, p. 39–40.
- Müller A., Knies J.** Trace elements and cathodoluminescence of detrital quartz. *Climate of the Past*, 2013, vol. 9, p. 2615–2630.
- Passega R., Byramjee R.** Grain-size image of clastic deposits. *Sedimentology*, 1969, vol. 13, No. 3–4, p. 233–252.
- Udayaganesan P., Angusamy N., Gujar A.R., Rajamanickam G.V.** Surface microtextures of quartz grains from the central coast of Tamil Nadu. *J. Geol. Soc. India*, 2011, vol. 77, p. 26–34.
- Woronko B.** Frost weathering versus glacial grinding in the micromorphology of quartz sand grains: Processes and geological implications. *Sedimentary Geol.*, 2016, No. 335, p. 103–119.

*Поступила в редакцию 18 января 2018 г.,
после доработки – 22 января 2019 г.,
принята к публикации 10 марта 2019 г.*