ЛИТОЛОГИЯ И ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ, 2024, № 2, с. 143–162

УДК 552.12+551.43

ЛИТОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В РАЙОНАХ ПРОЯВЛЕНИЯ ЛЕДОВОЙ ЭКЗАРАЦИИ В ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ

© 2024 г. Е. А. Сухих[a, *], О. В. Кокин[a], А. Г. Росляков[b, c], Р. А. Ананьев[b], В. В. Архипов[a]

[a] *Геологический институт РАН, Пыжевский пер., 7, стр. 1, Москва, 119017 Россия*

[b] *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Нахимовский просп., 36, Москва, 117997 Россия*

[c] *Геологический факультет МГУ, Ленинские Горы, 1, Москва, 119991 Россия*

**e-mail: sukhikh_ea@mail.ru*

Поступила в редакцию 12.09.2023 г.
После доработки 12.10.2023 г.
Принята к публикации 03.11.2023 г.

Изучены донные отложения юго-западной части Карского моря, отобранные как непосредственно в ледово-экзарационных бороздах, так и на фоновых поверхностях, не нарушенных ледовой экзарацией. По результатам исследований физических свойств и литолого-минералогических особенностей донных осадков определена глубина залегания границы ледово-экзарационного воздействия в бороздах (экзарационный контакт). По данным рентгено-дифрактометрического анализа фракции <0.001 мм в образцах ниже данной границы, в отличие от вышележащих образцов, выявлена нетермостойкость структуры хлорита, что, вместе с результатами микроскопических исследований в петрографических шлифах, свидетельствует о его новообразовании. Присутствие вторичного хлорита в условиях близповерхностного залегания может быть индикатором гляциодинамического воздействия (давления) килей дрейфующих ледяных образований на донные отложения. Микротекстуры осадка борозд выпахивания отличаются как на разных полигонах района исследований, так и в пределах одной борозды в зависимости от расположения точки пробоотбора на поперечном профиле морфоскульптуры.

Ключевые слова: борозды выпахивания, донные осадки, нетермостойкий хлорит, гляциодинамическое воздействие, петрографические шлифы, микротекстура.

DOI: 10.31857/S0024497X24020017, **EDN:** zcdjzk

В настоящее время отсутствует единая стандартизированная система терминологии, описывающая воздействие льда на морское дно. Наиболее универсальными представляются следующие определения процесса ледового выпахивания и образующихся при этом форм микрорельефа: ледовое выпахивание (ледовая экзарация) – деструктивное механическое воздействие льдов на подстилающую поверхность грунта, связанное с динамикой ледяного покрова, его подвижностью, торошением и стамухообразованием под влиянием гидрометеорологических факторов и рельефа прибрежно-шельфовой зоны; борозда ледового выпахивания (ледово-экзарационная борозда) – отрицательная линейная форма рельефа дна, пляжа или осушки, сформировавшаяся в результате механического воздействия килей перемещающихся ледяных образований [Огородов, 2011].

В Карском море предельная глубина, где в настоящее время возможна экзарация дна морским льдом (торосы и стамухи) составляет 30±5 м. В более глубоководных областях могут быть распространены реликтовые борозды, образованные при более низком положении уровня моря, а также айсберговые борозды (современные или реликтовые). В частности, в рассматриваемой части Карского моря неоднократно документально фиксировались айсберги и обломки айсбергов предположительно новоземельского происхождения [Огородов, 2011].

В западном секторе Российской Арктики айсберговые борозды изучались в основном

на акватории Баренцева моря, для Карского моря информация носит весьма неполный характер [Maznev et al., 2023]. В настоящее время систематизируются и обобщаются данные, полученные в рейсах последних лет по параметрам и районам распространения айсберговых борозд выпахивания в юго-западной части Карского моря, которые задокументированы здесь до глубин 300 м и имеют максимальные размеры до 10 м видимой глубины и до 300 м ширины [Kokin et al., 2023a]. Однако, такие вопросы, как возраст борозд, их происхождение (морской лед или айсберги), исходные размеры и мощность заполняющих их осадков, особенности преобразования осадка и дальнейшего осадконакопления внутри борозд, остаются открытыми.

Борозды выпахивания, оставленные айсбергами, отличаются от следов экзарации прочих ледяных образований большей шириной и глубиной, а также формой – как правило, более близкой к корытообразной, часто с плоским днищем. При этом следует учитывать, что в ряде случаев выровненность днища может быть обусловлена частичным заполнением борозды осадками, которые нивелируют первоначальные неровности. В подобных случаях для выяснения природы борозд необходимо использование комплекса акустических исследований, включающего многолучевое эхолотирование и высокочастотное непрерывное сейсмоакустическое профилирование.

Воздействие ледяных образований на дно сопровождается, помимо выпахивающего эффекта, заметным изменением некоторых физических характеристик и структурно-текстурных особенностей отложений. Выраженность границы ледово-экзарационного воздействия (экзарационного контакта), т.е. поверхности, отделяющей отложения, испытавшие непосредственное воздействие ледяных образований, от более молодых морских осадков, частично или полностью заполняющих борозды (соответственно до- и постэкзарационные отложения), очевидно, зависит от интенсивности такого воздействия, которое, в свою очередь, определяется массой и скоростью движения ледяного образования, и соответственно, глубиной моря и гидрометеорологическими условиями.

Особенно слабо изучены борозды выпахивания на акватории с литолого-минералогической точки зрения в силу того, что отбор керна из относительно узкой борозды является сложной задачей. Исследования деформационных процессов в осадочной среде, сопутствующих ледовой экзарации, включая изучение структурно-текстурных особенностей до- и постэкзарационных отложений, а также образование вторичных минералов, чрезвычайно актуальны как в научном, так и в практическом аспекте. Первое обусловлено наличием тесной причинно-следственной связи интенсивности экзарационных процессов и айсбергообразования с палеогеографией позднего плейстоцена–голоцена, включая климатические изменения и колебания уровня моря [Nikiforov et al., 2019]. Второе связано с необходимостью оценки геологических рисков для строительства и эксплуатации морских инженерных сооружений (буровых платформ, эстакад, подводных трубопроводов и кабелей) со стороны движущихся ледовых образований в будущем. Определение глубины залегания экзарационного контакта, наряду с данными об абсолютном возрасте осадков и скорости осадконакопления в последующий за ледовой экзарацией период, дает возможность установить время образования борозды и, соответственно, оценить периодичность подобных событий и спрогнозировать вероятность их повторения в будущем.

В зарубежных исследованиях при изучении отложений, образовавшихся в морских, ледниковых и перигляциальных условиях, с успехом применяется микроморфологический анализ, предметом которого является взаимное расположения составных частей осадочной массы, к которым относятся обломочный материал алевритовой, песчаной и гравийно-галечной размерности, тонкодисперсное вещество, поровые и трещинные пространства, а также новообразования [Meer van der, Menzies, 2011]. Данный подход вполне близок структурно-текстурному анализу, более распространенному в отечественных работах. Таким образом, с учетом имеющейся базы микроморфологических проявлений воздействия различных видов ледовой нагрузки [Linch et al., 2012], в данном исследовании анализируются микротекстурные и микроструктурные особенности в петрографических шлифах осадков юго-западной части Карского моря, отобранных как непосредственно в ледово-экзарационных бороздах, так и на фоновых поверхностях, не нарушенных ледовой экзарацией. Выполнена попытка проследить проявления ледниковой нагрузки в микротекстуре исследуемых отложений на фоновых поверхностях дна, поскольку вопрос о положении границы последнего оледенения на акватории Карского моря остается дискуссионным.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

В работе использовался материал пробоотбора ударной грунтовой трубкой (УГТ-147), полученный в 51 рейсе НИС “Академик Борис Петров” в августе–сентябре 2022 г. Местоположение станций пробоотбора определялось в ходе рейса по данным акустической съемки дна, которая выполнялась с помощью многолучевого эхолота Seabat T50-ER с частотой сигнала 200 кГц. Обработка данных многолучевой батиметрической съемки проводилась в программном пакете PDS V3.4.7.1.

На борту судна выполнялось первичное литологическое описание отобранных осадочных колонок и измерялось сопротивление осадков недренированному сдвигу (прочность на сдвиг (ПНС), кПа) методом вращательного среза при помощи лабораторной микрокрыльчатки. По возможности, измерения производились в середине литологически однородных горизонтов до 40–50 см или через каждые 20–30 см при мощности однородных горизонтов более 40–50 см.

Микроскопическое исследование материала выполнялось в петрографических шлифах, выполненных из ненарушенных осадочных последовательностей. Изучение минерального состава отдельных гранулометрических фракций проводилось под бинокуляром.

Анализ химического состава отдельных минеральных зерен выполнялся на сканирующем микроскопе TESCAN (аналитик Н.В. Горькова, ГИН РАН).

Глинистые минералы изучались рентгенодифрактометрическим методом во фракции <0.001 мм. Препараты тонкодисперсных частиц были сняты со скоростью 2° 2θ в минуту в интервале от 2° до 34° 2θ (экспресс-съемка) в воздушно-сухом состоянии, насыщенные этиленгликолем и прогретые при 550°С в течение 2 ч (аналитик Е.В. Покровская, ГИН РАН).

Маркировка осадочных образцов в работе представлена в форме: № колонки_середина интервала пробоотбора в см.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе рассматриваются образцы, отобранные в пределах четырех полигонов юго-западной части Карского моря (с юга на север: Байдарацкая губа, центральная часть Западно-Карской области, Восточно-Новоземельский желоб и подводный склон архипелага Новая Земля) из колонок в ледово-экзарационных бороздах (№ колонок – 5115, 5116, 5120, 5122) и на фоновых поверхностях дна (№ колонок – 5123, 5124, 5126) (рис. 1, табл. 1).

По данным акустической съемки были выбраны борозды выпахивания на мелководье (интервал глубин 23–25 м) в осевой части Байдарацкой губы (см. рис. 1, рис. 2а, 2б) и ледово-экзарационные формы в Восточно-Новоземельском желобе на глубине 260–270 м, представляющиеся реликтовыми образованиями (см. рис. 1, 2в, 2г). Колонка 5120 отобрана в борозде (интервал глубин 48–49.5 м), расположенной к северо-западу от месторождения Ленинградское. Выход керна при пробоотборе составил всего 12 см.

В качестве фоновых рассматриваются колонки 5123 и 5124 в Восточно-Новоземельском желобе, близкие к колонке 5122 (см. рис. 2в), и колонка 5126, отобранная на глубине 119 м в непосредственной близости от архипелага Новая Земля. Характеристика пространственного расположения колонок представлена в табл. 1.

Литология и минеральный состав осадков

Для колонок осадков, отобранных на восточном борту Восточно-Новоземельского желоба (5122, 5123, 5124), характерен мощный верхний окисленный слой коричневого цвета. Верхний наилок темно-коричневого цвета сильно обводнен, имеет алеврито-пелитовую структуру и однородную текстуру (мощность около 10 см). Далее следует слой алеврито-пелитовых илов с переслаиванием осадков различных оттенков коричневого, иногда серо- и желто-коричневого цветов (рис. 3).

Ниже залегает слой алеврито-пелитового ила оливково-серого цвета с однородной текстурой, которая осложняется примазками гидротроилита, неравномерно распределенными по слою. Внутри этого горизонта встречаются прослои с изменением цвета осадка. Для колонок 5122 и 5123 – это зеленовато-коричневые прослои. В колонке 5124 встречены 2 прослоя темно-коричневого цвета, который аналогичен цвету поверхностного окисленного слоя.

Данные интервалы маркируются множественными минеральными стяжениями во фракции >0.25 мм. В колонке 5122 (интервал 66–72 см) – это серо-желто-коричневые железистые стяжения пластинчатой и округлой формы. Концентрация железа в них составляет 23% при концентрации марганца 1–3% (табл. 2).

В колонке 5123 верхний прослой (интервал 54–57 см) зеленовато-коричневого

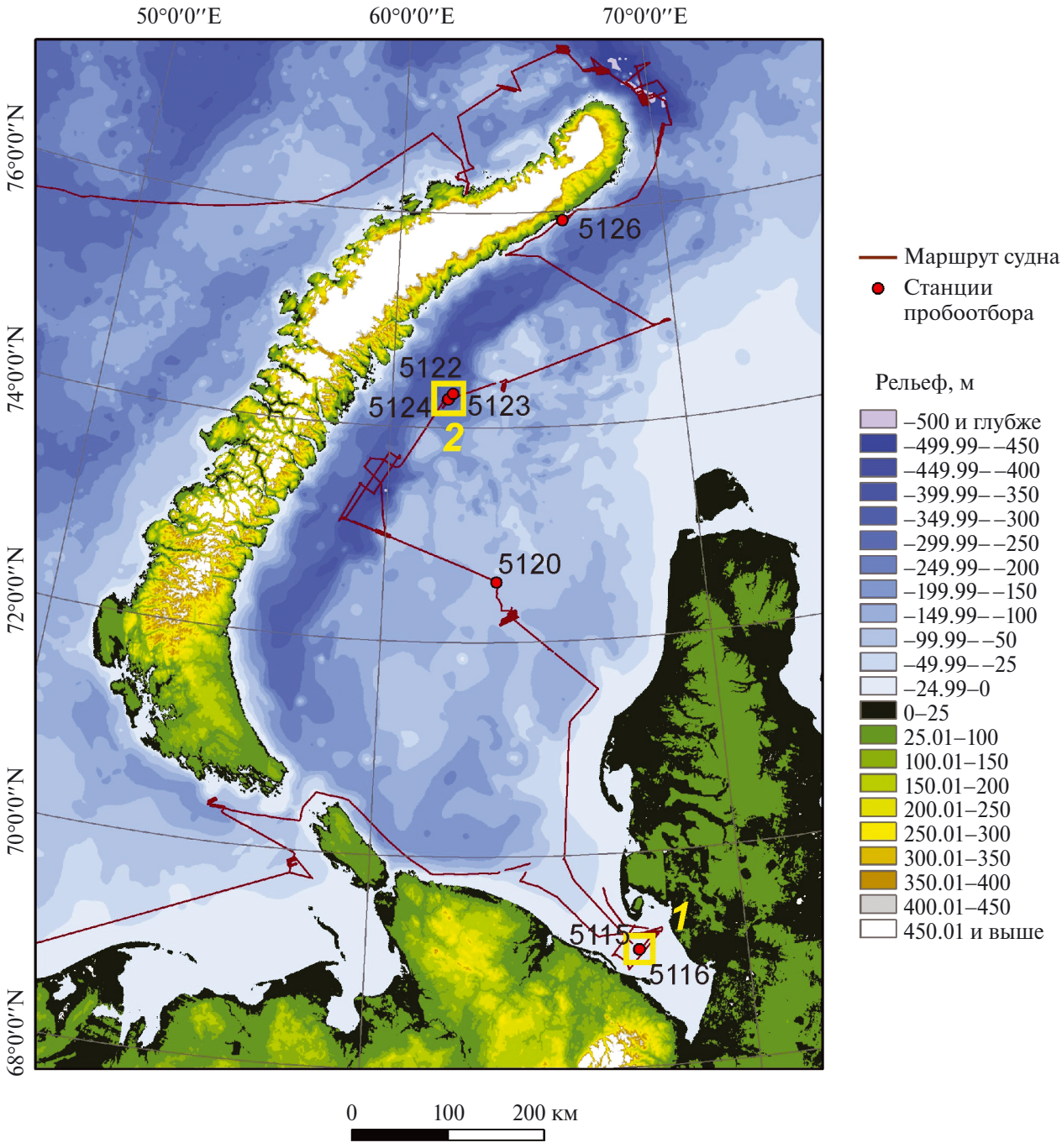


Рис. 1. Маршрут 51 рейса НИС “Академик Борис Петров” и положение станций пробоотбора, рассматриваемых в статье. Рельеф показан по данным IBCAO версии 3. Желтые квадраты – положение полигонов детальной батиметрической съемки, представленных на рис. 2а (*1)* и 2в (*2*).

цвета маркируется такими же стяжениями, что и в колонке 5122. В более мощном нижнем прослое (интервал 68–73 см) в песчаной фракции отмечены многочисленные радиально-лучистые агрегаты игольчатых кристаллов вивианита ($Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$), наблюдаются сростки агрегатов и наросты вивианита на других минеральных зернах (см. табл. 2).

Аналогичные агрегаты вивианита были обнаружены в колонке 5124 в диапазоне 148–152 см (рис. 4–*3*), также единичные агрегаты встречаются в образцах, отобранных

Таблица 1. Характеристика положения отобранных осадочных колонок на полигонах исследований 51 рейса НИС “Академик Борис Петров”

Колонка	Широта, °с.ш.	Долгота, °в.д.	Геоморфологическое положение	Географическое положение	Глубина моря, м	Длина керна, см
5115	69.09002	67.16803	Осевая часть борозды	Центральная часть Байдарацкой губы	23–25	90
5116	69.08764	67.17745	Прибортовая часть борозды			103
5120	72.55947	63.53548	Осевая часть борозды	Центральная часть Западно-Карской области	48–49.5	12
5122	74.31662	62.08508	Осевая часть борозды	Восточный борт Восточно-Новоземельского желоба	265–270	146
5123	74.31526	62.0923	Фоновая поверхность			265
5124	74.265	61.93667	Фоновая поверхность			280
5126	75.91817	66.18533	Фоновая поверхность	Северная часть подводного склона арх. Новая Земля	119	128

в интервале 223–280 см. Визуально цвет керна в этих диапазонах не отличается от соседних слоев, зелено-коричневые оттенки отсутствуют, осадок имеет оливково-серый цвет, присутствуют примазки гидротроилита ($FeS{\cdot}H_2O$). В интервале с наибольшим количеством гидротроилитных включений (165–223 см) вивианит не встречен.

Агрегаты вивианита из колонок 5123 и 5124 имеют черный цвет и не прозрачны только на поверхности, внутри агрегата кристаллы прозрачные, немного зеленоватые. По данным сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) поверхности агрегатов в их состав входит около 10% углерода (см. табл. 2).

Минеральные маркеры колонки 5124 в диапазонах с темно-коричневым оттенком (102–112 см и 117–122 см), аналогичным оттенку поверхностного окисленного слоя, несколько отличаются. В верхнем прослое встречены рыжие сцементированные агрегаты, вивианит в незначительном количестве, черные битуминозные агрегаты и единичные минеральные трубки-склейки (см. рис. 4–*1*). В нижнем темно-коричневом прослое отмечены многочисленные трубчатые и сферические минеральные склейки (см. рис. 4–*2*).

Согласно данным СЭМ в рассматриваемых интервалах преобладают железистые стяжения (см. табл. 2, рис. 4). Концентрации железа высоки и в цементирующем веществе трубчатых и сферических склеек. На рассматриваемых уровнях встречаются также марганцевые стяжения, однако в значительно меньшем количестве. Они имеют темно-коричневый и черно-коричневый цвет (см. табл. 2).

В верхней части южных колонок (5115, 5116), полученных на мелководье в Байдарацкой губе, в минеральном составе песчаной фракции преобладает кварц, выделяются зерна различной степени окатанности. Много разнообразной водорослевой органики, как обломков, так и хорошо сохранившегося раковинного материала. В нижней части колонок сокращается количество материала песчаной размерности, а также органических остатков. Встречаются только обломки раковин двустворок. Цельные раковины, как в вышележащих слоях, отсутствуют. Органический материал в колонках 5115 и 5116, несмотря на их близкое положение, отличается, как и микротекстурные особенности осадков, исследованные в петрографических шлифах. Возможно, это связано с тем, что колонка 5115 отобрана в осевой части борозды, а колонка 5116 – в прибортовой.

Структура осадка алеврито-пелитовая, текстура однородная. Верхний окисленный слой темно-коричневого цвета в осадках южных колонок отсутствует, либо имеет мощность до сантиметра. По разрезу варьируется количество гидротроилита, от редких примазок до крупных пятен и прослоев, делающих осадок темно-серым, до черного, в нижней части колонок.

Осадок в колонке 5120 представлен очень плотным глинисто-алевритовым суглинком (с чем и был связан малый выход керна при пробоотборе) серовато-оливкового цвета с однородной текстурой. Выше слоя суглинка лежит слой песков неустановленной мощности, размытый при пробоотборе.

В колонке 5126 поверхностный слой алеврито-пелитового ила мощностью около 5 см сильно обводнен, имеет серый цвет с коричневатым оттенком. Ниже до конца колонки следует однородный горизонт серого алеврито-пелитового ила с однородной текстурой и редкими примазками

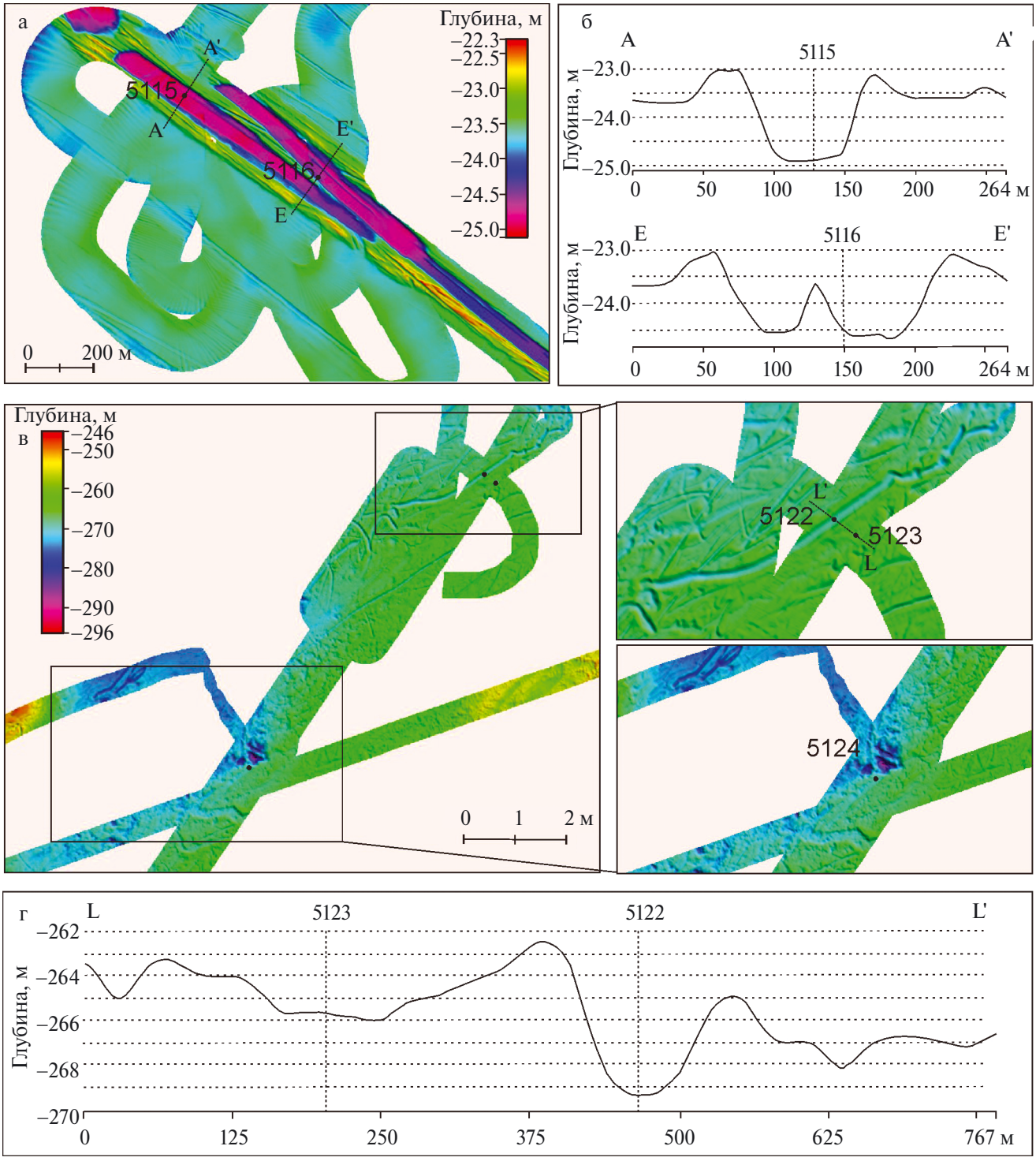


Рис. 2. Рельеф дна в районе станций пробоотбора в Байдарацкой губе (а) и в Восточно-Новоземельском желобе (в). Положение станций пробоотбора на поперечном профиле через ледово-экзарационные борозды (б, г).

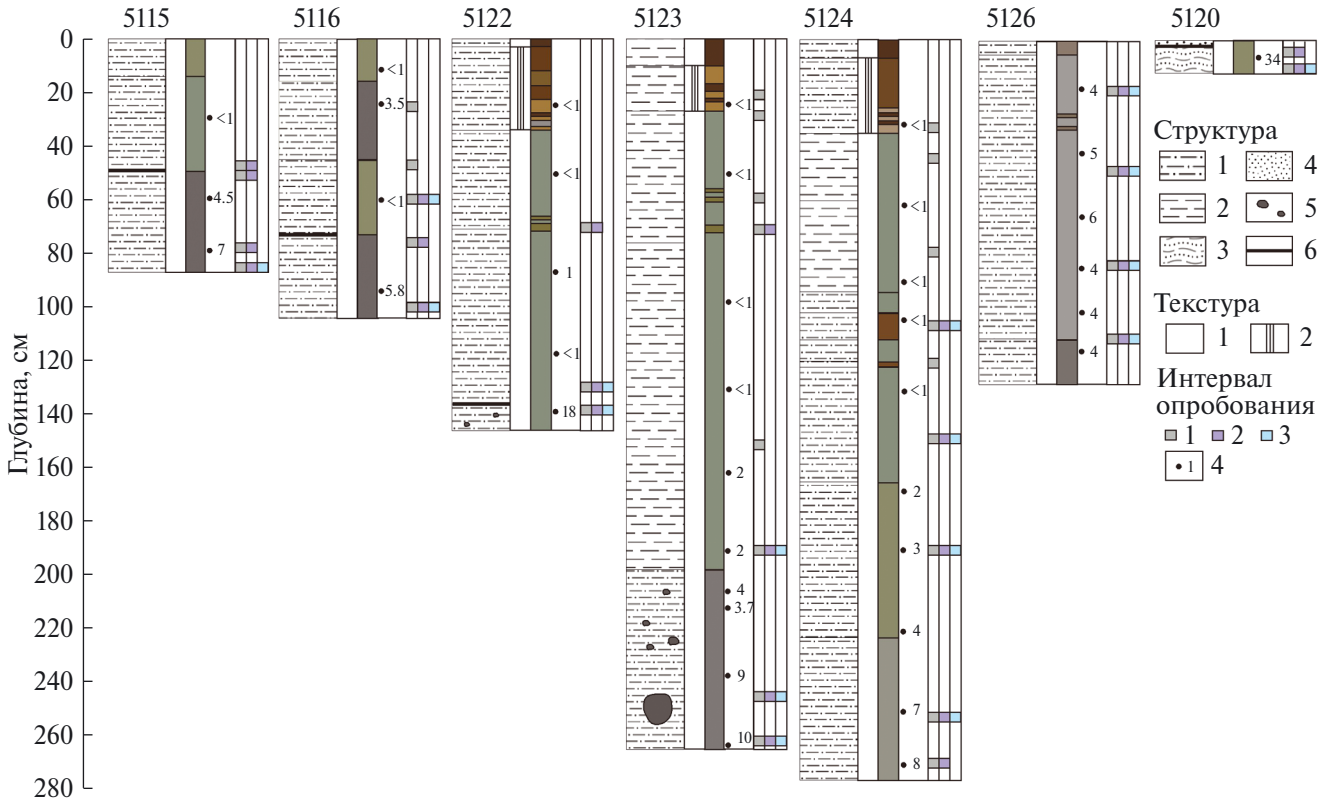


Рис. 3. Литологические колонки, отобранные в экзарационных бороздах (5115, 5116, 5120, 5122) и на фоновой поверхности (5123, 5124, 5126).
Структура: 1 – алеврито-глинистый ил, 2 – глинистый ил, 3 – глинисто-алевритовый суглинок, 4 – песок, 5 – грубообломочный материал, 6 – граница между до- и постэкзарационными отложениями в ледово-экзарационных бороздах (экзарационный контакт). Текстура: 1 – однородная, 2 – полосчатая. Анализируемый материал в интервале опробования: 1 – шлих, 2 – шлиф, 3 – глинистая фракция (<0.001 мм), 4 – точки измерения прочности осадка на сдвиг (единица измерения – кПа). Цветовые колонки схематично отображают цвет донных осадков.

гидротроилита. В исследованных образцах встречены раковины фораминифер. Раковины многокамерные, спирально-закрученные. Распределение раковинного материала по осадочному разрезу неравномерно, сохранность и размер раковин также различны. Крупные раковины (в гранулометрической фракции >0.25 мм) хорошей сохранности обнаруживаются в образцах верхней и нижней части колонки. В центральной части колонки (образец 5126_50) сокращается количество средне- и крупнозернистого алеврита, практически исчезает песчаная примесь, раковины фораминифер мелкие, единичные.

Прочность осадка на сдвиг

По данным измерений, прочность на сдвиг (ПНС, C_u, кПа) в изученных отложениях колеблется от <1 до 34 кПа (см. рис. 3, табл. 3). Судя по характеру распределения величин ПНС по разрезу, величина в 1 кПа может считаться порогом, который делит исследованные отложения с низкой (≤1 кПа; $C_u(l)$) и высокой (>1 кПа; $C_u(h)$) прочностью на сдвиг. Характер увеличения ПНС на контакте отложений с низкой и высокой ПНС описывается коэффициентом увеличения ПНС ($C_u(h)/C_u(l)$), который вычисляется как отношение $C_u(h)$ нижележащего горизонта отложений с высокой ПНС к $C_u(l)$ вышележащего горизонта с низкой ПНС (см. табл. 3). В колонках из борозд выпахивания (5115, 5116, 5122) на контакте отложений с низкой и высокой ПНС наблюдается резкий скачок величины ПНС (коэффициент увеличения ПНС колеблется в пределах 3.5–18 и, возможно, даже может достигать 34 в колонке 5120). На фоновых поверхностях (5123, 5124) увеличение ПНС на подобных контактах умеренное (коэффициент увеличения ПНС не превышает 2). Распределение ПНС в колонке фоновой поверхности на подводном склоне Новой Земли (5126) отличается от остальных

Таблица 2. Элементный состав Fe- и Mn-содержащих минеральных стяжений и агрегатов вивианита в осадках Восточно-Новоземельского желоба. Маркировка образца: № колонки_середина интервала пробоотбора, 1–8 – точки электорного сканирования (см. рис. 4а–4е)

Элемент, мас. %	5124_110				5124_120		5124_150		5123_70	5122_70	5122_70	5124_120	5124_110
	1	2	3	4	5	6	7	8					
Si	11.3	7.86	7.17	6.4	4.52	17.07	0.32	3.66	2.57	13.62	5.73	9.29	11.82
Ti	0.14	0.14	0.18	0.17		0.21				0.24	0.12	0.23	0.23
Al	4.35	2.88	3.19	2.42	1.25	6.08	0.21	1.33	1.07	6.47	2.54	4.18	5.17
Fe	12.83	26.37	16.53	12.87	29.16	4.98	11.42	18.11	16.07	22.73	22.81	3.99	4.15
Mn	0.37	1.84	3.78	4.7	1.78	6.14	5	3.59	4.74	1.15	3.15	13.47	15.49
Mg	1.08	1.04	2.42	2.37		0.88	5.27	2.64	5.21	2.37	1.37	1.33	1.25
Ca	1.89	1.4	0.51	0.39	0.35	0.36	0.14	0.2	0.25	2.39	2.07	0.6	0.68
Na	0.49	0.3	0.37			0.5						0.46	0.65
K	1.54	1.2	0.8	0.7	0.43	0.85		0.3	0.29	1.97	1.08	1.24	1.53
P	2.46	3.31	6.79	5.43			10.06	6.28	11.45		1.72		
As	0.18												
Cu	0.21										0.3		0.2
S								1.71					
Cl											0.18		
C	10.18	7.67	8.31	11.2	12.87	9.18	12.49	10.39	8.22	4.89	10.47	12.05	9.06
O	52.98	45.99	49.95	53.35	49.64	53.75	55.09	51.79	50.13	44.17	48.46	53.16	49.77
Σ, %	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Mn/Fe	0.03	0.07	0.23	0.37	0.06	1.23	0.44	0.2	0.29	0.05	0.14	3.38	3.73
Описание	Желто-коричневое стяжение	Вивианит			Трубчатая склейка	Сферическая склейка	Вивианит сросток	Вивианит нарост	Вивианит	Желто-коричневое стяжение	Красно-коричневое стяжение	Черно-коричневое стяжение	Черно-коричневое стяжение

колонок. Здесь измерениями не были выявлены отложения с низкой ПНС. Так же обращает на себя внимание колонка 5116 из прибортовой части борозды в Байдарацкой губе, где дважды наблюдается переслаивание горизонтов отложений с низкой и высокой ПНС, т.е. здесь имеется два контакта отложений с резким увеличением ПНС: верхний и нижний.

В нижней части колонок 5122, 5123 ниже границы увеличения ПНС (резкого в первом случае и постепенного – во втором) значительно увеличивается количество материала песчаной размерности, а также количество грубообломочного материала, что может служить индикатором субгляциальной (подледниковой) среды осадконакопления в данном интервале. Соответствуя по своим структурно-текстурным характеристикам ледниковым диамиктонам, залегающие ниже данной границы отложения могут являться позднеплейстоценовыми.

Микротекстурные особенности

В Байдарацкой губе микротекстуры донных осадков отличны для разрезов, полученных в различных частях одной борозды. В осадочных последовательностях колонки 5115, расположенной в осевой части борозды, прослеживаются многочисленные структурно-текстурные неоднородности. На границе резкого увеличения ПНС (рис. 5–*1*) отмечаются множественные, ориентированные в одном направлении дугообразные формы выстраивания минеральных зерен. В линейно ориентированном расположении зерен присутствуют микроразрывы со смещением. Ниже по разрезу (см. рис. 5–*2*) зоны скопления крупнозернистого материала имеют форму типа “будинаж”, что указывает на процесс растяжения осадка [Carr, 2001]. Безъядерные ротационные структуры или турбаты, выделяемые в нижней части разреза (см. рис. 5–*3*) являются индикаторами нагрузки при сдвиге. Виды деформаций в осадке колонки 5115 свидетельствуют об их хрупко-пластическом типе. Микроморфологические проявления деформации выделялись в соответствии с их классификацией для осадков борозд выпахивания [Linch et al., 2012].

Микротекстурные особенности образцов колонки 5116 отражают пластический тип деформации в прибортовой части борозды. Тонкодисперсное органическое вещество окрашивает осадок зонально, формируя текстуры потоков (см. рис. 5–*4*) в промежуточном (залегающем между горизонтами с высокой ПНС) горизонте отложений с низкой ПНС (интервал 45–73 см). Ниже по разрезу, под кровлей второго (от поверхности дна) горизонта отложений с высокой ПНС, наблюдаются микроскладчатые образования (см. рис. 5–*5*) с неоднородным распределением линз песчаного материала и тяготением их к гребневой зоне складки. Тело складки окрашено тонкодисперсным органическим веществом. В нижней части колонки (см. рис. 5–*6*), среди окрашенного органическим веществом обломочного материала отмечаются зоны линейной ориентации минеральных зерен. Присутствуют безъядерные ротационные структуры.

В микроморфологии осадков колонки, полученной в ледово-экзарационной борозде (5122) на восточном борту Восточно-Новоземельского желоба, наблюдаются иные закономерности. Выше границы резкого увеличения ПНС осадки сложены преимущественно материалом пелитовой размерности. Включения алевритовой и песчаной размерности не многочисленны, имеют линзовидный характер либо не ориентированное распределение. Ниже данной границы количество алевритового и песчаного материала резко возрастает. Внутри тонкодисперсного матрикса он образует несцементированные агрегаты с круговой ориентацией зерен, которые можно классифицировать как ротационные структуры [Linch et al., 2012]. По данным [Linch, Dowdeswell, 2016], подобные структуры не свойственны для осадков ледово-экзарационных борозд, но характерны для субгляциальных отложений, либо для осадков борозд выпахивания, сформированных в ледниковых тиллах. Однако микроморфологические исследования отложений ледово-экзарационной борозды в Байдарацкой губе это не подтверждают.

В контексте возможного воздействия (давления) ледникового льда на верхний слой донных осадков и в качестве индикатора субгляциальных условий стоит также рассмотреть явление микроштриховки, обнаруженное в петрографических шлифах образцов фоновых колонок 5124 и 5126.

Интервал с выявленной микроштриховкой (196–200 см) в колонке 5124 соответствует диапазону с наибольшим количеством гидротроилитных включений (165–223 см). Содержание алевритовой и песчаной фракций мало, положение крупнозернистого материала внутри глинистого матрикса носит линзовидный характер (рис. 6а, 6б). Штрихи имеют несколько направлений ориентировки, заполнены внутри материалом пелитовой размерности (см. рис. 6а). В отраженном свете проявляются следы перемещения отдельных минеральных зерен внутри осадка (см. рис. 6в).

Таблица 3. Результаты измерения прочности осадка на сдвиг (ПНС, кПа)

№ колонки	Горизонт, см	Глубина измерения, см	Измеренная ПНС (C_u), кПа	Расчленение колонки по ПНС	Коэффициент увеличения ПНС $C_u(h)/C_u(l)$	Глубина залегания контакта отложений с низкой и высокой ПНС, см
5115	14–49.5	30	<1	$C_u(l)$	4.5	49.5
	49.5–90	60	4.5	$C_u(h)$		
		80	7			
5116	1–16	11	<1	$C_u(l)$	3.5	16
	16–45	25	3.5	$C_u(h)$		
	45–73	60	<1	$C_u(l)$	5.8	73
	73–103	95	5.8	$C_u(h)$		
5122	3–34	24	<1	$C_u(l)$	18	136
	34–71	49	<1			
	71–136	85	1			
		115	<1			
	136–146	142	18	$C_u(h)$		
5123	10–27	23	<1	$C_u(l)$	2	~145
	27–76	50	<1			
	76–198	98	<1			
		131	<1			
		161	2	$C_u(h)$		
		190	2			
	198–265	206	4			
		213	3.7			
		238	9			
		265	10			
5124	7–35	32	<1	$C_u(l)$	2	164
	35–94	60	<1			
		89	<1			
	94–165	105	<1			
		131	<1			
	165–223	168	2	$C_u(h)$		
		189	3			
		220	4			
	223–280	250	7			
		271	8			
5120	1–12	6	34	$C_u(h)$	–	1(?)
5126	5(?)–111	17	4	$C_u(h)$	–	0–5(?)
		42	5			
		67	6			
		86	4			
		103	4			
	111–128	117	4			

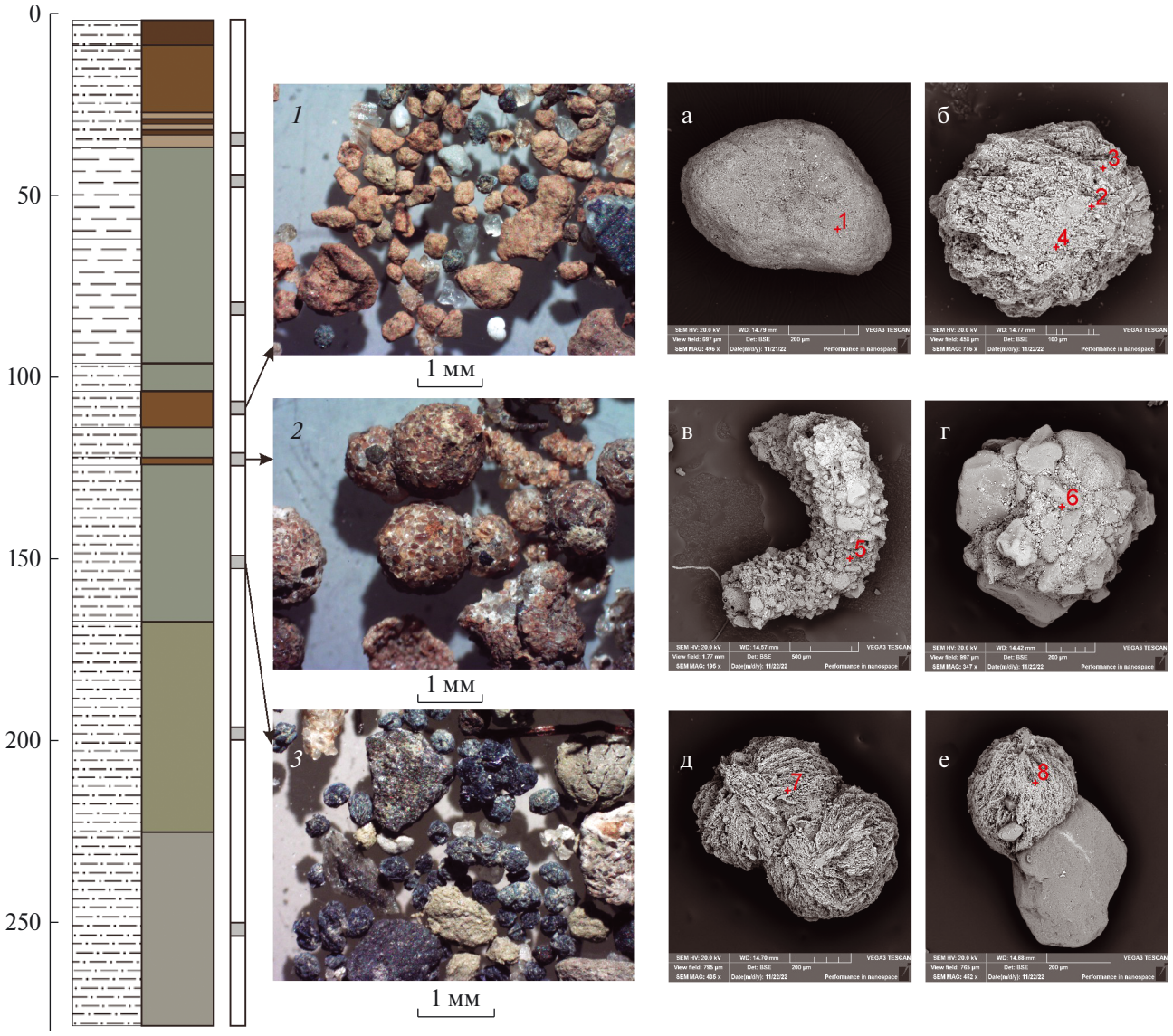


Рис. 4. Железосодержащие минеральные агрегаты в различных интервалах колонки 5124 во фракции >0.25 мм: 105–110 см (*1*), 117–122 см (*2*), 147–152 (*3*) – под бинокуляром.
а–е – сканирующая электронная микроскопия отдельных зерен из соответствующих интервалов. Данные об атомарном процентном содержании элементов в точках сканирования, обозначенных на фотографиях красным шрифтом, представлены в табл. 2. Условные обозначения структур см. рис. 3.

В образце из нижней части колонки 5126 (84–88 см) штриховка выражена цветовой микрополосчатостью (см. рис. 6г–6з). Возможно, это связано с высоким содержанием битуминозного вещества в образце, которое дает окрашивание по направлению действующего давления. Полосы располагаются неравномерно (см. рис. 6г, 6д), проходят по поверхности крупнозернистых включений (см. рис. 6з), что свидетельствует об их формировании уже после осадкообразования. В петрографических шлифах образцов выше и ниже рассматриваемого слоя микроштриховка отсутствует, либо наблюдаются единичные штрихи. В целях обнаружения проявлений микроштриховки в осадочных последовательностях шлифы выполнялись как в продольной, так и в поперечной плоскостях данных образцов.

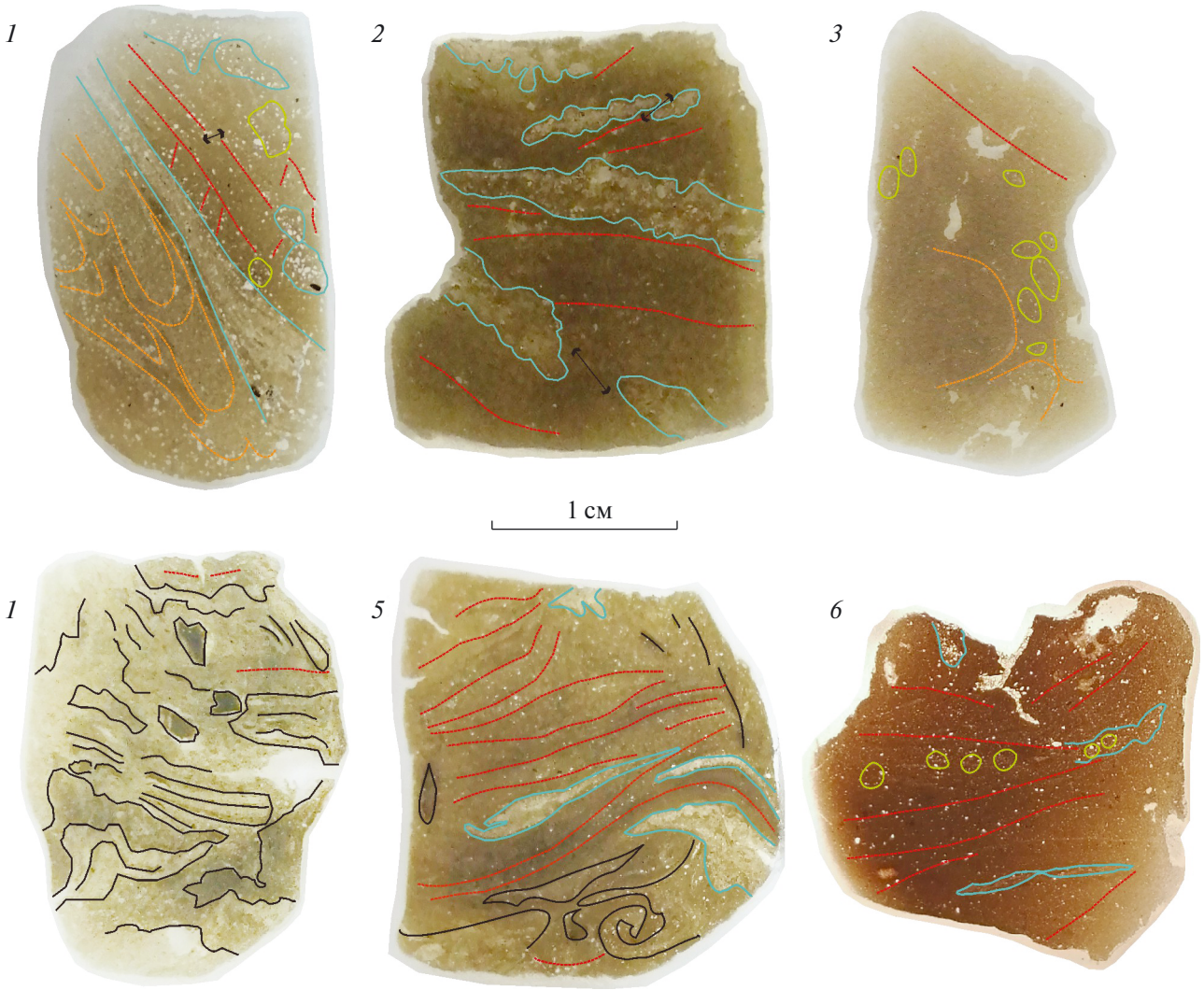


Рис. 5. Микроморфология образцов донных осадков, отобранных в осевой (колонка 5115) и прибортовой (колонка 5116) частях ледово-экзарационной борозды в Байдарацкой губе.
Интервалы для изготовления петрографических шлифов, колонка 5115: *1* – 49–52 см, *2* – 77–79 см, *3* – 86–90 см; колонка 5116: *4* – 57–62 см, *5* – 73–77 см, *6* – 98–100 см. Цветом обозначены следующие структурно-текстурные особенности: красный пунктир – линия ориентировки линейного расположения минеральных зерен, оранжевый пунктир – линия дугообразной ориентировки минеральных зерен, желтый – круговая ориентировка минеральных зерен (ротационная структура), голубой – линзы крупнозернистого песчаного материала, черный – зоны окрашивания тонкодисперсным органическим веществом. Стрелками обозначены микроразрывные нарушения.

Слоистые силикаты

По результатам рентгено-дифрактометрических исследований глинистого материала (<0.001 мм) в образцах ниже контакта отложений с низкой и высокой ПНС в колонках из борозд выпахивания выявлено наличие нетермостойкого хлорита (рис. 7). Для сравнения исследовались образцы, отобранные выше и ниже границы резкого увеличения ПНС (см. рис. 3), иногда в непосредственной близости друг от друга, как в колонке 5122. В образцах, отобранных в ледово-экзарационных бороздах выше данной границы, а также в образцах фоновых колонок, независимо от значений ПНС, на дифрактограммах рефлексы хлорита при прокаливании сохраняются (см. рис. 7).

В петрографическом шлифе образца 5122_127 (выше границы) хлорит имеет признаки привнесенного. Хорошо видно, что положение его обломков аналогично обломкам кварца. Обломочный материал песчаной размерности имеет вид линзовидных включений в окружающем

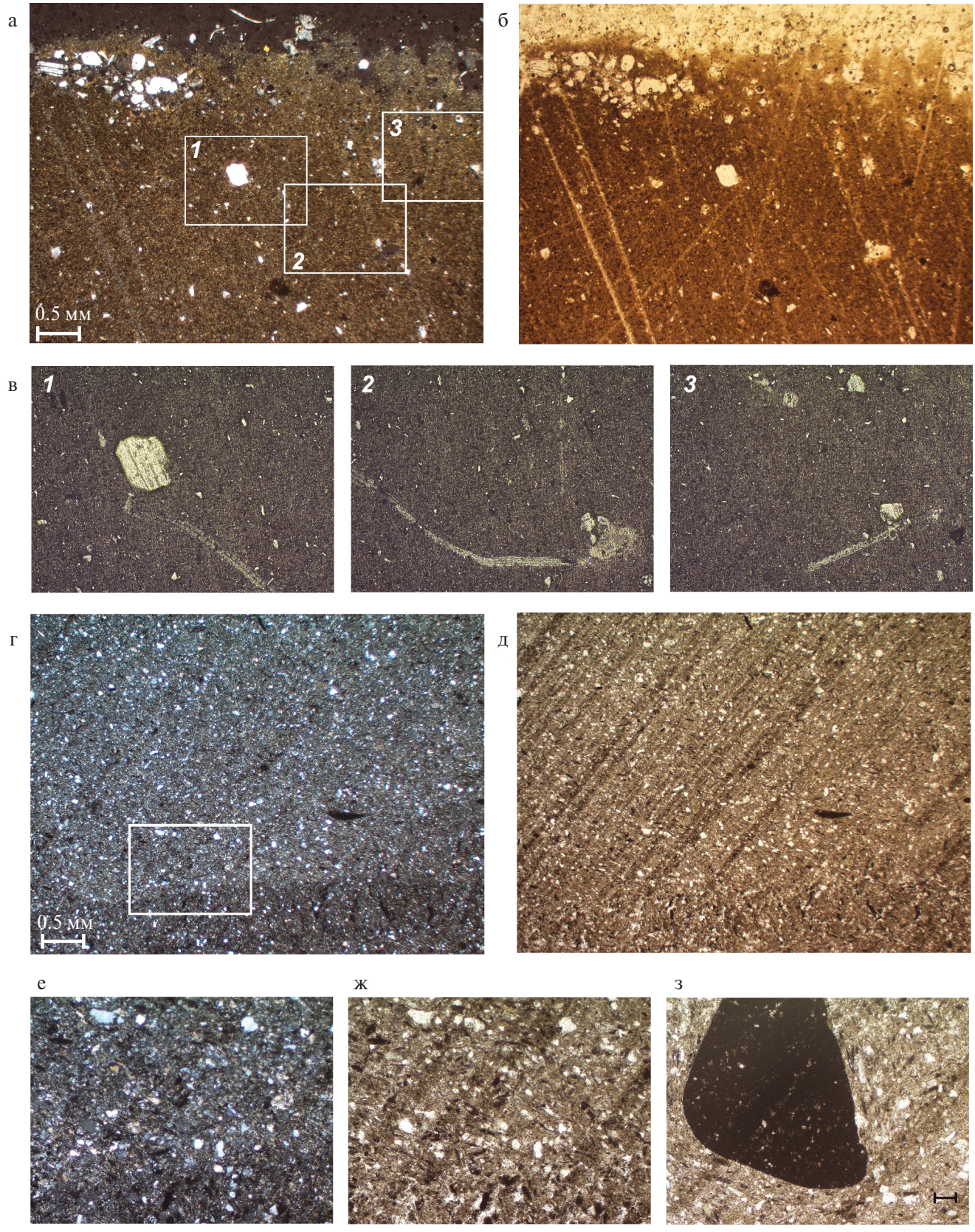


Рис. 6. Явление микроштриховки в образце 5124_198: петрографический шлиф, проходящий свет с анализатором (а) и без анализатора (б), отраженный свет, квадраты *1, 2, 3* (в); в образце 5126_86: петрографический шлиф проходящий свет с анализатором (г, е) и без анализатора (д, ж, з); е, ж – увеличенный фрагмент, выделенного участка.

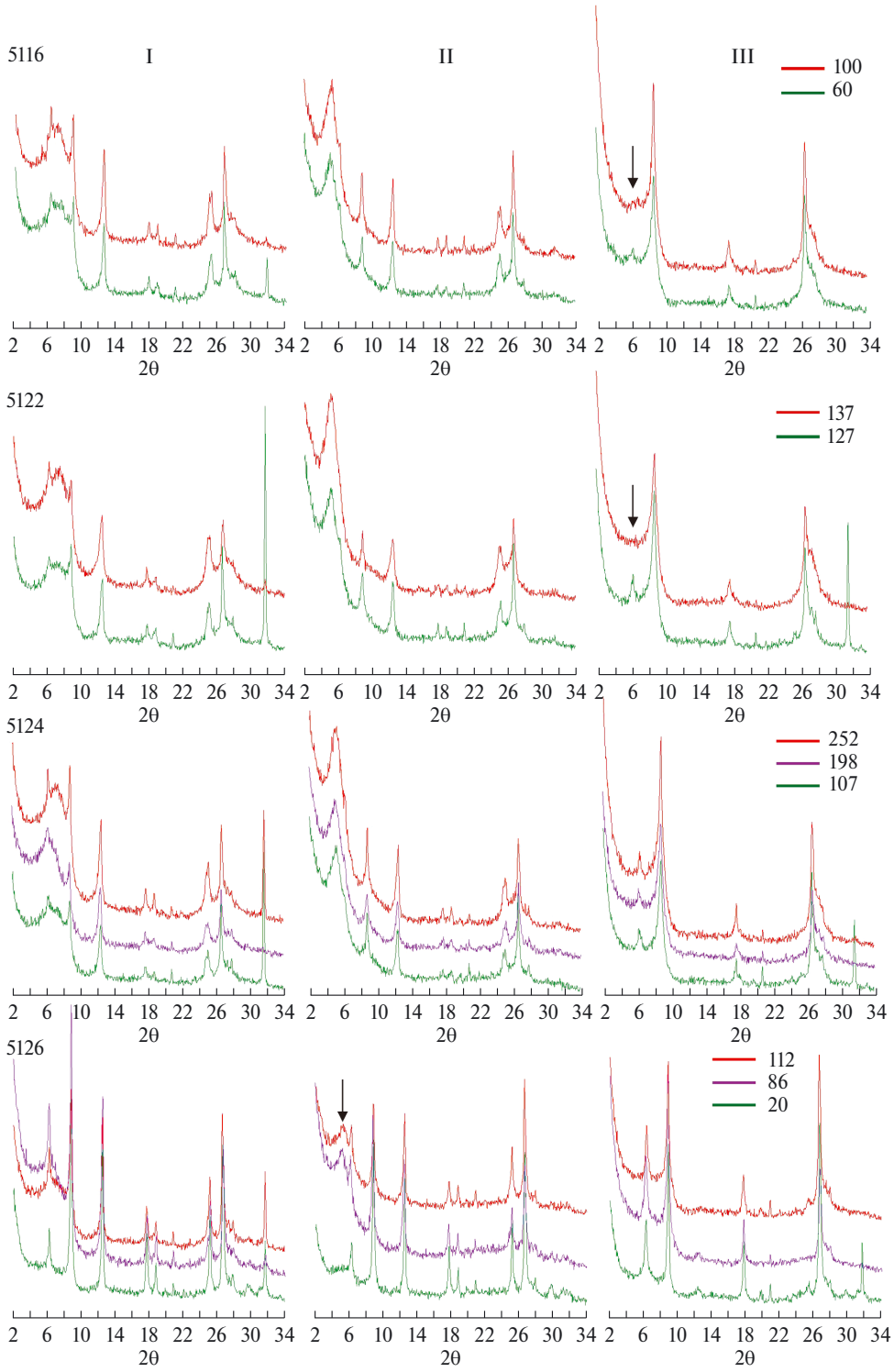


Рис. 7. Данные рентгено-дифрактометрической экспресс-съемки тонкодисперсных препаратов в трех состояниях: I – воздушно-сухом (природном), II – насыщенном этиленгликолем, III – прокаленном при T = 550°C.
Цвет линии: красный – препараты выполнены из материала в нижней части колонки с высокой прочностью на сдвиг, зеленый – материал верхней части колонки с низкой прочностью на сдвиг, фиолетовый – материал из зон с выраженной микроштриховкой. Черной стрелкой отмечено отсутствие пика хлорита при прокаливании в образцах ниже границы предполагаемого экзарационного воздействия в колонках из экзарационных борозд (5122, 5116). 5124, 5126 – фоновые колонки. Черной стрелкой для колонки 5126 отмечено проявление пика смектита при насыщении этиленгликолем в нижних образцах и его отсутствие в верхнем.

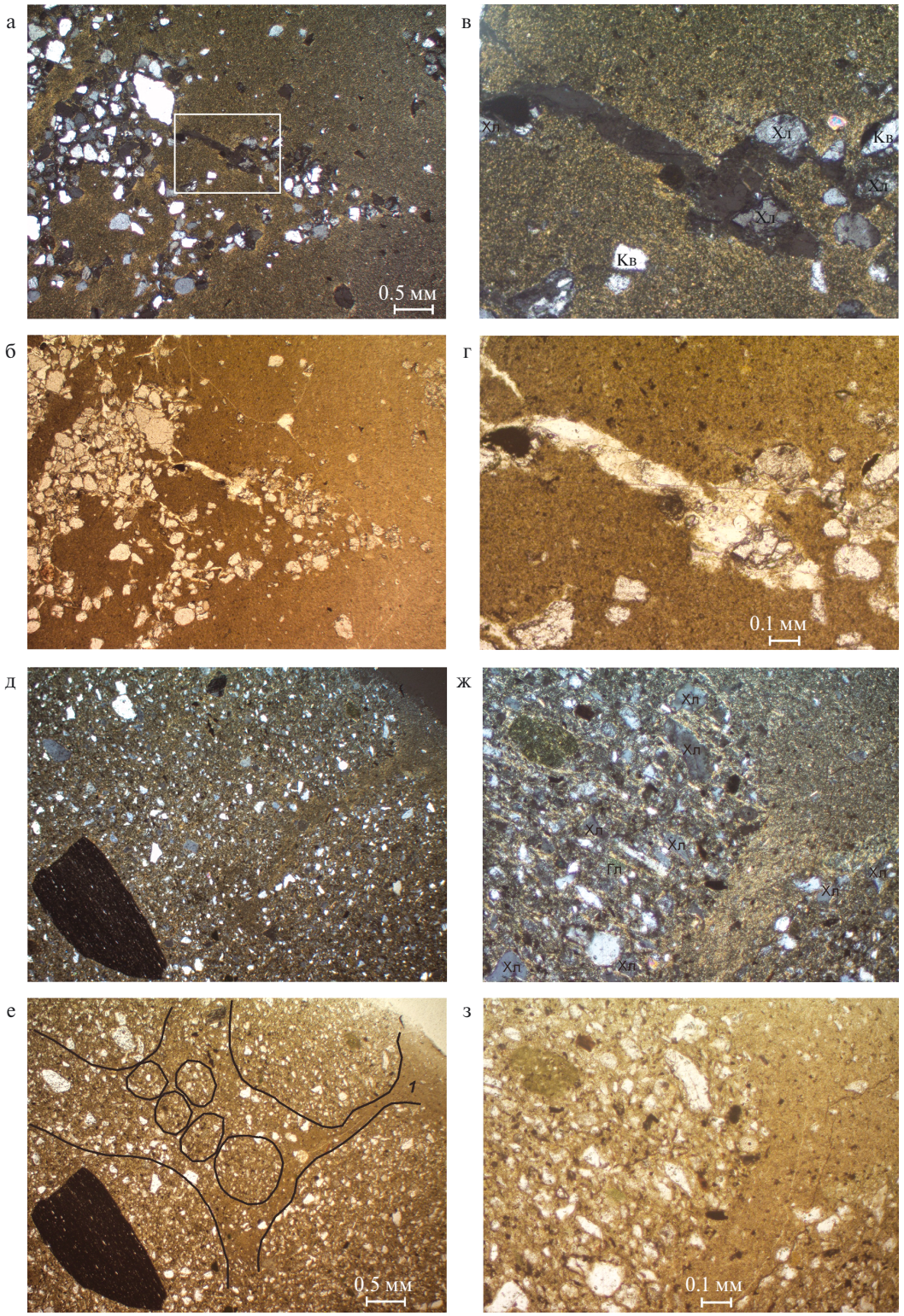


Рис. 8. Образцы 5122_127 и 5122_137, взятые в непосредственной близости от экзарационного контакта.
Образец 5122_127 (выше контакта), петрографический шлиф, проходящий свет с анализатором (а, в) и без анализатора (б, г); в, г – увеличение выделенного фрагмента на рис. 8а.
Образец 5122_137 (ниже контакта), петрографический шлиф, проходящий свет с анализатором (д, ж) и без анализатора (е, з); ж, з – увеличенный фрагмент на границе зон с различной размерностью и ориентацией зерен обломочного материала, обозначенный на рис. 8е цифрой 1.
Хл – хлорит, Кв – кварц, Гл – глауконит.

глинистом матриксе (рис. 8а, 8б). Обломки хлорита располагаются внутри песчаных линз, а также приурочены к зонам трещин, между ними и породой наблюдаются свободные пространства, зерна рассечены трещинками (см. рис. 8в, 8г). Этот хлорит, вероятно, сохранился в процессе переноса и, соответственно, имеет достаточно сформированную устойчивую структуру, которая остается неизменной при прокаливании.

В петрографическом шлифе образца 5122_137 (ниже границы) хлорит приурочен к более проницаемым участкам с обломками песчаной размерности, заключенным в мелкообломочной основной массе (см. рис. 8д, 8е). Участки хорошо выделяются по различной ориентировке смешанослойных глинистых образований. Видно, что хлорит заполняет свободные пространства в обломке и образует "комковатые" выделения, состоящие из отдельных "тонких игл" – формы, характерные для новообразований (см. рис. 8ж, 8з). Возможно, поэтому их структура не термостойка. Можно также отметить, что выделения хлорита располагаются преимущественно в граничных зонах гранулометрически различающихся участков, как бы оконтуривая ротационные структуры.

Для колонок, отобранных в Байдарацкой губе, комковатые новообразования хлорита иногда встречаются в зонах линейного и дугообразного ориентирования зерен в нижней части колонок, а также в ротационных структурах. По данным рентгено-дифрактометрического анализа в этих образцах также отмечена нетермостойкость структуры хлорита, в отличие от вышележащих (см. рис. 7). Отсутствие пика хлорита при прокаливании препарата глинистой фракции выявлено и в образце плотного суглинка колонки 5120.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В исследованных образцах осадков восточного борта Восточно-Новоземельского желоба обнаружены аутигенные минералы (гидротроилит, вивианит) и новообразования (кварцевые склейки трубчатой и сферической формы, бурые и рыжие "корки", плотные желто-коричневые стяжения), которые маркируют слои, выделяющиеся по цвету. Ведущую роль в их образовании играет железо.

Полученные результаты микроскопических исследований в отдельных гранулометрических фракциях и петрографических шлифах подтверждают наблюдаемую ранее противоположность распределения вивианита и гидротроилита [Rothe et al., 2016; Murdmaa et al., 2023], что связано с соотношением сульфидной серы и двухвалентного железа в иловых водах: избыток железа по отношению к сере препятствует осаждению гидротроилита и облегчает соединение железа с фосфат-ионом, который высвобождается при бактериальном разложении органического вещества (ОВ).

Вивианит образуется в условиях восстановительной среды. Цвет минерала может служить индикатором окислительно-восстановительных условий в осадке. В неизмененном виде кристаллы бесцветны, прозрачны или светлых оттенков, при частичном окислении на воздухе приобретают зеленовато-синий или синий оттенок до черного [Бетехтин, 2018].

Разница цветов внутри и на поверхности исследованных агрегатов вивианита может свидетельствовать о наличии на их поверхности углеводородных пленок, что подтверждается и результатами электронного сканирования (содержание углерода в точках сканирования на поверхности агрегатов составило около 10%). В петрографических шлифах видно, что вивианит тяготеет к трещинным пространствам также, как и ОВ, о чем свидетельствует более темный цвет трещинных оторочек. В недавних исследованиях вивианита прибрежно-морских отложений показывается связь аутигенеза вивианита с анаэробным бактериальным окислением метана [Egger et al., 2015].

Исследования железомарганцевых конкреций (ЖМК) в различных районах Карского шельфа ведутся достаточно давно [Батурин, 2011]. По данным геохимических исследований в железистой и марганцевой фазах ЖМК Карского моря был сделан вывод о сходстве комплекса элементов с пелагическими конкрециями океана, при пониженном содержании рудных элементов в конкрециях Карского моря [Батурин и др., 2016].

Описанным в данной работе микростяжениям соответствуют характерные для конкреций мелководных шельфовых морей комплекс элементов и диапазоны их концентраций. В составе железистых стяжений присутствует фосфор, который установлен в составе как железистой, так и марганцевой фаз более крупных ЖМК Карского моря, причем железистая фаза обогащена фосфором в два раза относительно марганцевой [Батурин и др., 2016]. Среди микроэлементов встречаются мышьяк (железистые стяжения) и медь (в стяжениях, обогащенных как марганцем, так и железом). Другие микроэлементы, а также редкоземельные элементы, описанные ранее в составе ЖМК Карского моря [Богданов и др., 1994; Батурин, 2011; Батурин и др., 2016], в рассматриваемых стяжениях не встречены.

По данным СЭМ в составе железомарганцевых стяжений и цементирующего вещества минеральных склеек также, как и в составе агрегатов вивианита, присутствует углерод. По результатам исследования ОВ в составе ЖМК северо-восточной части Карского моря [Шульга и др., 2017] выявлена интересная закономерность: для образцов ЖМК, обогащенных марганцем (Mn/Fe = 2.38 в среднем) превалирует вклад терригенной органики в состав ОВ. В железистых образцах (Mn/Fe = 0.2 в среднем) ОВ имеет преимущественно морское биогенное происхождение.

Повышенный коэффициент увеличения ПНС (3.5–18) на контакте отложений низкой и высокой ПНС в колонках из борозд выпахивания, вероятнее всего, связан с деформацией отложений в результате гляциодинамического воздействия движущихся килей ледяных образований. Это подтверждается микротекстурами хрупко-пластических и пластических деформаций в толще отложений до 25–40 см ниже рассматриваемого контакта в колонках из борозд выпахивания. Кроме того, только ниже контакта отложений низкой и высокой ПНС в колонках из борозд выпахивания наблюдается нетермостойкость структуры хлорита, в то время как в фоновых колонках и в бороздах выше контакта структура хлорита при прокаливании остается неизменной.

Исследование состава глинистых минералов, выполненное для осадочного материала, отобранного непосредственно в бороздах выпахивания выше и ниже границы резкого увеличения ПНС, интересно в контексте изучения преобразований осадка на начальном этапе диагенеза в нормальных условиях.

Новообразование хлорита по зонам нарушений ранее описывалось для тектонических зеркал скольжения, когда при перемещении крыльев в сместителе разрывов происходит разогрев и создается аномальное давление. Это приводит к динамокатагенезу и динамометаморфизму с новообразованием хлорита, серицита и других минералов [Юдин, 2013].

В рассматриваемом случае интересен факт присутствия новообразованного хлорита в определенном слое приповерхностных осадков, не прошедших необходимых стадий постседиментационных изменений и находящихся в условиях поверхностных температур. Нетермостойкость хлорита проявляется только для образцов ниже предполагаемой границы стрессового давления, обусловленного ледовой экзарацией.

Таким образом, контакт отложений с низкой и высокой ПНС в бороздах выпахивания является экзарационным контактом. Отложения, залегающие ниже контакта, представляют собой доэкзарационные отложения, деформированные в результате гляциодинамического воздействия движущимся килем ледяных образований. ПНС таких отложений может варьировать от 3.5 до 34 кПа. Отложения, залегающие выше контакта, представляют собой постэкзарационные отложения, заполняющие исходную форму борозды. ПНС данных отложений не превышает 1 кПа.

“Проработка” осадочного материала в ходе перемещений ледника, проявившаяся в явлении микроштриховки, не приводит к перестройке глинистых минералов, структура хлорита при прокаливании остается устойчивой (см. рис. 7, фиолетовые кривые).

Во всех рассматриваемых колонках состав глинистых минералов довольно близок. Это смектит, слюда, хлорит и каолинит (см. рис. 7). Только в колонке 5126 в образце 5126_20 отсутствует смектит, затем вниз по разрезу его количество постепенно увеличивается (см. рис. 7).

Мощность заполнения борозд постэкзарационными отложениями является функцией времени существования борозды, которое зависит от скорости осадконакопления. Из четырех проанализированных борозд мощность заполнения может быть оценена только в трех, т.к. в колонке 5120 осадочный материал, который, вероятно, представлял собой постэкзарационные отложения, был вымыт в процессе подъема грунтовой трубки. Учитывая возможность вымывания и/или разрушения осадков верхней части колонки в ходе пробоотбора с использованием ударной грунтовой трубки [Кондратенко, Неизвестнов, 2003], приведенные ниже оценки мощности заполнения борозд постэкзарационными отложениями являются минимальными.

В колонке 5116 (из прибортовой части борозды Байдарацкой губы) наблюдаются 2 контакта отложений с низкой и высокой ПНС. Однако положение точки пробоотбора вблизи борта борозды вместе с наличием пластических деформаций в промежуточном горизонте с низкой ПНС (см. рис. 5–*4*) позволяет считать, что в заполнении этой колонки, помимо прочего, принимали участие оползневые отложения с борта. Поэтому исходным экзарационным контактом следует считать нижний контакт отложений с низкой и высокой ПНС, выше которого лежат постэкзарационные отложения, деформированные оползневым блоком с борта борозды. В таком случае,

верхний контакт является кровлей оползневого блока, который состоит из доэкзарационных отложений, деформированных в ходе гляциодинамического воздействия движущимся килем ледяного образования, но смещенных со своего исходного положения в результате оползневых процессов. Общая мощность заполнения борозды в районе колонки 5116 составляет 73 см вместе с оползневым блоком, толщина которого составляет около 30 см, т.е. мощность отложений, накопленных в ходе нормальной седиментации, равна 43 см. В колонке 5115 (осевая часть борозды) мощность постэкзарационных отложений достигает 50 см. По сути, колонки 5115 и 5116 располагаются в одновозрастной системе борозд, сформированных одним и тем же ледяным образованием. Полученные минимальные оценки мощностей, 50 и 43 см, близки и соответствуют представлениям о заполнении борозды осадками вдоль поперечного профиля, когда максимальная мощность отложений достигается в осевой части борозды, а к бортам она уменьшается.

В районе Байдарацкой губы имеются оценки скорости осадконакопления в борозде выпахивания и ее возраста с помощью метода неравновесного свинца [Kokin et al., 2023b]. Возраст борозды, располагающейся на глубине около 35 м перед входом в Байдарацкую губу, составил 1810±30 AD. С момента ее образования в борозде накопилось около 70 см постэкзарационных отложений при средней скорости осадконакопления около 0.33 см/год. Стоит отметить, что скорость осадконакопления на фоновой поверхности за последние 100 лет была в 2 раза меньше (около 0.16 см/год). Если допустить, что в изученной борозде из Байдарацкой губы (колонки 5115, 5116) средняя скорость осадконакопления была такой же, как в борозде перед входом в губу (0.33 см/год), то ее возраст может быть как минимум около 150 лет (~1870 AD).

Борозда Восточно-Новоземельского желоба (колонка 5122) имеет мощность постэкзарационных отложений не менее 135 см. Это максимальная мощность постэкзарационных отложений среди изученных колонок. По некоторым оценкам, борозды в этом районе сформировались в ходе трансгрессии после последнего ледникового максимума, когда происходило разрушение шельфового ледника, полностью перекрывавшего Восточно-Новоземельский желоб [Миронюк, Иванова, 2018; Рыбалко и др., 2020]. Если эта оценка возраста верна, то средняя скорость осадконакопления в борозде 5122 должна быть не более 0.01 см/год, что в 33 раза меньше, чем в борозде перед входом в Байдарацкую губу [Kokin et al., 2023b]. По имеющимся оценкам, скорость седиментации в Восточно-Новоземельском желобе в верхних 15–30 см в точках, ближайших к колонке 5122, может быть как 0.25±0.12 см/год, так и 0.9±0.14 см/год [Русаков и др., 2019]. Учитывая, что эти скорости получены для фоновых поверхностей, в бороздах Восточно-Новоземельского желоба скорость осадконакопления, как это ни странно, может быть даже больше, чем в бороздах Байдарацкой губы. Это может объясняться различием в глубине моря. На мелководье Байдарацкой губы могут происходить периодические размывы дна, связанные с экстремальными штормами. В желобе же их влияние благодаря существенной глубине моря сведено к нулю. Здесь происходит направленная седиментация без периодических размывов. В случае, если скорости осадконакопления в бороздах Восточно-Новоземельского желоба близки к значениям 0.25–0.33 см/год, возраст изученной борозды может оказаться не послеледниковым, а позднеголоценовым (минимум 400 л.н.). Но тогда возникает вопрос, какой ледник при современном уровне моря мог быть источником для айсберга с килем более 270 м, принимая во внимание тот факт, что желоб является замкнутой котловиной с максимальной глубиной на входе не более 100 м? Другими словами, с таким строением котловины при современном уровне моря айсберг, достающий до дна на глубине более 260 м, мог появиться только внутри желоба.

Различие микротекстур осадков в ледово-экзарационных бороздах на исследуемых полигонах указывает на преимущественно пластический тип деформации при ледовой экзарации в мелководных условиях Байдарацкой губы. Для колонки в прибортовой части борозды в петрографических шлифах выявлены следующие микроморфологические проявления деформации осадка: микроскладчатые образования, текстуры потоков, линейная ориентировка расположения минеральных зерен. Для колонки в осевой части борозды: микроразрывные нарушения, линейная и дугообразная ориентировка расположения минеральных зерен, будинаж и ротационные структуры.

Множественные ротационные структуры в осадке ниже экзарационного контакта в борозде на борту Восточно-Новоземельского желоба являются индикатором значительного ледового давления на исследуемый слой относительно вышележащих горизонтов и осадков борозд Байдарацкой губы. Граничные зоны между ротационными структурами и тонкодисперным материалом вмещающего матрикса маркируются комковатыми новообразованиями хлорита.

Отсутствие значительного давления во время ледовой экзарации в Байдарацкой губе можно предположить и по выявленным закономерностям изменения по разрезу величины ПНС. Для борозд Восточно-Новоземельского желоба и центральной части юго-запада Карского моря значения ПНС возрастают ниже экзарационного контакта в несколько десятков раз. Между до- и постэкзарационными отложениями в Байдарацкой губе столь резкий скачок ПНС отсутствует, что может свидетельствовать о существенно меньшем размере ледяного образования, сформировавшего эту борозду.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследованы литолого-минералогические особенности осадков ледово-экзарационных борозд и фоновых поверхностей на четырех полигонах в юго-западной части Карского моря.

В осадках восточного борта Восточно-Новоземельского желоба ведущую роль в формировании аутигенных новообразований (кварцевые склейки трубчатой и сферической формы, бурые и рыжие “корки”, плотные желто-коричневые стяжения) и минералов (гидротроилит, вивианит) играет железо. Можно сделать вывод о разнообразии микробиальных сообществ на разных уровнях осадочного разреза.

По данным изменения по разрезу прочности осадка на сдвиг, в ледово-экзарационных бороздах определена глубина залегания экзарационного контакта (как минимум до 135 см). Для борозд Восточно-Новоземельского желоба и центральной части Западно-Карской области характерен резкий скачок величины ПНС между до- и постэкзарационными отложениями. Отсутствие столь резкого изменения ПНС осадков на границе в борозде в Байдарацкой губе может объясняться существенно меньшими размерами айсберга (или другого ледяного образования) по сравнению с айсбергами, формировавшими борозды в глубоководных районах юго-западной части Карского моря.

Микротекстурные индикаторы деформаций осадка в бороздах выпахивания также указывают на отсутствие значительного давления при образовании исследованной борозды в Байдарацкой губе. Микротекстуры осадка ледово-экзарационных борозд отличаются как на разных полигонах района исследований, так и в пределах одной борозды в зависимости от расположения точки пробоотбора на поперечном профиле (осевая и прибортовая части борозды).

Присутствие новообразованного хлорита в осадке исследованных борозд выпахивания ниже экзарационного контакта свидетельствует о том, что в процессе ледовой экзарации создаются условия, делающие возможным вторичное минералообразование, для которого требуются определенные постседиментационные преобразования осадка в условиях повышенных температур и давления. Таким образом, присутствие вторичного хлорита в условиях близповерхностного залегания может быть индикатором гляциодинамического воздействия (давления) килей дрейфующих ледяных образований на донные отложения.

Проявление микроштриховки в образцах колонок фоновых поверхностей, не нарушенных ледовой экзарацией, в совокупности с изменением по разрезу гранулометрического состава и прочности на сдвиг, может служить индикатором ледникового воздействия в районе приновоземельских полигонов исследования.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-77-20038, ГИН РАН, https://rscf.ru/project/21-77-20038/). Микроскопические исследования в петрографических шлифах выполнялись в рамках темы государственного задания ГИН РАН № FMMG-2022-0001. Измерения прочности осадка на сдвиг выполнялись в рамках темы госзадания ИО РАН № FMWE-2021-005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Батурин Г.Н. Вариации состава железомарганцевых конкреций Карского моря // Океанология. 2011. Т. 51. № 1. С. 153–161.

Батурин Г.Н., Дубинчук В.Т., Новигатский А.Н. Фазовое распределение элементов в железомарганцевых конкрециях Карского моря // ДАН. 2016. Т. 471. № 3. С. 334–339.

Бетехтин А.Г. Курс минералогии: учебное пособие / Науч. ред. Б.И. Пирогов, Б.Б. Шкурский / 4-е изд., испр. и доп. М.: ИД КДУ, 2018. 736 с.

Богданов Ю.А., Горшков А.И., Гурвич Е.Г. и др. Железомарганцевые конкреции Карского моря // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 789–800.

Кондратенко А.В., Неизвестнов Я.В. Сравнительная оценка сохранности глубоководных грунтовых проб, поднятых на борт судна различными пробоотборниками // Труды НИИГА-ВНИИОкеангеология. Т. 198. Морские инженерно-геологические исследования. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2003. С. 90–98.

Миронюк С.Г., Иванова А.А. Микро- и мезорельеф гляциального шельфа Западно-Арктических морей в свете новых данных // Бюлл. Комиссии по изучению четвертичного периода. 2018. № 76. С. 41–58.

Огородов С.А. Роль морских льдов в динамике рельефа береговой зоны. М.: Изд-во МГУ, 2011. 173 с.

Русаков В.Ю., Борисов А.П., Соловьева Г.Ю. Скорости седиментации (по данным изотопного анализа ^{210}Pb и ^{137}Cs) в разных фациально-генетических типах донных осадков Карского моря // Геохимия. 2019. Т. 64. № 11. С. 1158–1174.

Рыбалко А.Е., Миронюк С.Г., Росляков А.Г. и др. Новые признаки покровного оледенения в Карском море: мегамасштабная ледниковая линейность в Восточно-Новоземельском желобе // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2020. Вып. 7. С. 175–181.

Шульга Н.А., Дроздова А.Н., Пересыпкин В.И. Железомарганцевые конкреции Карского моря: связь органического вещества с рудными элементами // ДАН. 2017. Т. 472. № 6. С. 697–700.

Юдин В.В. Надвиговые и хаотические комплексы. Симферополь: ИТ “АРИАЛ”, 2013. 250 с.

Carr S. Micromorphological criteria for discriminating subglacial and glacimarine sediments: evidence from a contemporary tidewater glacier, Spitsbergen // Quaternary International. 2001. V. 86. P. 71–79.

Egger M., Jilbert T., Behrends T. et al. Vivianite is a major sink for phosphorus in methanogenic coastal surface sediments // Geochim. Cosmochim. Acta. 2015. V. 169. P. 217–235.

Kokin O., Maznev S., Arkhipov V. et al. The distribution of maximum ice scour sizes by sea depth at the seabed of the Barents and Kara Seas / Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC, Glasgow, UK, 12–16 June 2023. Glasgow, UK, 2023a. P. 1–11.

Kokin O., Usyagina I., Meshcheriakov N. et al. Pb-210 Dating of Ice Scour in the Kara Sea // J. Mar. Sci. Eng. 2023b. V. 11. 1404.

Linch L.D., Meer van der J.J.M., Menzies J. Micromorphology of iceberg scour in clays: Glacial Lake Agassiz, Manitoba, Canada // Quaternary Science Reviews. 2012. V. 55. P. 125–144.

Linch L.D., Dowdeswell J.A. Micromorphology of diamicton affected by icebergkeel scouring, Scoresby Sund, East Greenland // Quaternary Science Reviews. 2016. V. 152. P. 169–196.

Maznev S.V., Kokin O.V., Arkhipov V.V., Baranskaya A.V. Modern and relict evidence of iceberg scouring at the bottom of the Barents and Kara seas // Oceanology. 2023. V. 63. P. 84–94.

Meer van der J.J.M., Menzies J. The micromorphology of unconsolidated sediments // Sedimentary Geology. 2011. V. 238. P. 213–232.

Murdmaa I.O., Ovsepyan E.A., Ivanova E.V., Iakimova K.S. Granulated vivianite in the Cambridge strait, Franz Josef Land (Barents Sea) // Lithology and Mineral Resources. 2023. V. 58. № 4. P. 311–316.

Nikiforov S.L., Ananiev R.A., Libina N.V. et al. Ice Gouging on Russia’s Arctic Shelf // Oceanology. 2019. V. 59. P. 422–424.

Rothe M., Kleeberg A., Hupfer M. The occurrence, identification and environmental relevance of vivianite in waterlogged soils and aquatic sediments // Earth-Science Reviews. 2016. V. 158. P. 51–64.

LITHOLOGICAL AND MINERALOGICAL CHARACTERISTIC OF THE BOTTOM SEDIMENTS IN THE AREAS OF ICE SCOURING IN THE SOUTH-WESTERN KARA SEA

E. A. Sukhikh[1, *], O. V. Kokin[1], A. G. Roslyakov[2, 3], R. A. Ananiev[2], V. V. Arkhipov[1]

[1]Geological Institute RAS, Pyzhevsky lane, 7, bld. 1, Moscow, 119017 Russia

[2]Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Nakhimovsky prosp., 36, Moscow, 117997 Russia

[3]Faculty of Geology, Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991 Russia

**e-mail: sukhikh_ea@mail.ru*

Sedimentary material sampled in the western Kara Sea both directly in the ice scours and on the background surfaces not disturbed by ice scouring has been studied. Based on the results of research of the physical properties and lithological and mineralogical features of bottom sediments in the ice scours, the bedding depth of the ice gouging impact boundary (ploughing contact) was identified. According to X-ray diffraction analysis of the <0.001 mm fraction, in the samples obtained below this boundary, in contrast to the overlying samples, chlorite has non-heat-resistant structure, which, together with the results of microscopic studies in thin sections, indicates its neoformation. The presence of secondary chlorite in near-surface conditions may be an indicator of the glaciodynamic impact (pressure) of iceberg keels on bottom sediments. The microstructures of the ice scour sediments differ both on the different polygons of the study area and within the same scour, depending on the location of the sampling point on the transverse profile of the morphosculpture.

Keywords: ice scours, bottom sediments, non-heat-resistant chlorite, glaciodynamic impact, thin sections, microstructure.