

КРИОЛИТОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ОТЛОЖЕНИЙ ОСТРОВА ХЕЙСА АРХИПЕЛАГА ЗЕМЛЯ ФРАНЦА-ИОСИФА

Е.А. Слагода^{1,2}, А.В. Крылов³, К.А. Попов^{1,2}, О.Л. Опокина^{1,2}, Д.С. Дроздов^{1,2,7}, В.В. Рогов^{1,4},
А.Н. Курчатова^{1,2}, П.Т. Орехов¹, А.А. Ермак¹, Т.В. Ходжер⁵, И.В. Томберг⁵, М.Ю. Сулова⁵,
Н.А. Жученко⁵, А.А. Абрамов⁶

¹Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия; eslagoda@ikz.ru

²Тюменский государственный нефтегазовый университет, 625000, Тюмень, ул. Володарского, 56, Россия

³ЗАО "Поляргео", 199053, С.-Петербург, В.О., 24-я линия, 3/7, Россия

⁴Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический ф-т,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия

⁵Лимнологический институт СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Россия

⁶Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
142290, Пушкино, Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия

⁷Российский государственный геологоразведочный университет имени С. Орджоникидзе,
117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, Россия

Представлены результаты криолитологических исследований мерзлых отложений, вскрытых скважинами на острове Хейса архипелага Земля Франца-Иосифа. Определены химический, механический состав пород, видовой состав раковин и их возраст, криогенные текстуры, влажность мерзлой толщи. Выполнен микроморфологический анализ шлифов и реплик пород с помощью оптической и электронной микроскопии. Установлен делювиальный, элювиальный и прибрежный ледово-морской генезис голоценовых отложений разновысотных террас. На основе анализа изменения криотекстур и микростроения толщ в разрезах выявлены эпигенетический и сингенетический типы промерзания отложений в морской, литеральной и субаэральной обстановках.

Криогенное строение, генезис, возраст, тип промерзания отложений

CRYOLITHOLOGY OF SEDIMENTS OF THE HAYES ISLAND, ARCHIPELAGO FRANZ JOSEF LAND

E.A. Slogoda^{1,2}, A.V. Krylov³, K.A. Popov^{1,2}, O.L. Opokina^{1,2}, D.S. Drozdov^{1,2,7}, V.V. Rogov^{1,4},
A.N. Kurchatova^{1,2}, P.T. Orekhov¹, A.A. Ermak¹, T.V. Khodzher⁵, I.V. Tomberg⁵, M.Yu. Suslova⁵,
N.A. Zhuchenko⁵, A.A. Abramov⁶

¹Earth Cryosphere Institute, SB RAS, 625000, Tyumen, P/O box 1230, Russia; eslagoda@ikz.ru

²Tyumen State Oil and Gas University, 625000, Tyumen, Volodarskogo str., 56, Russia

³Polargeo Ltd., 199053, St. Petersburg, V.O., 24th Line, 3/7, Russia

⁴Lomonosov Moscow State University, Department of Geography, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1, Russia

⁵Limnological Institute, SB RAS, 664033, Irkutsk, Ulan-Batorskaya str., 3, Russia

⁶Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science, RAS, 142292, Pushchino, Moscow region, Russia

⁷Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University, 117997, Moscow, Miklouho-Maklay str., 23, Russia

The frozen deposits have been discovered in the boreholes on the Hayes Island, archipelago of Franz Josef Land. The results of cryolithological researches of these deposits are given in the work. Chemical and mechanical composition of rocks, species composition of shells and their age, cryogenic texture, moisture content of deposits have been identified in studies. Micromorphological analysis of thin sections and casts of rocks has been carried out by optical and electron microscopy. Talus, eluvial and coastal ice-marine genesis of the Holocene sediments has been determined for terraces of different ages. Epigenetic and syngenetic types of freezing of rocks have been identified from the change of cryotextures and microstructure of sediments in sections. These types of freezing have been determined in marine, intertidal and subaerial environments.

Structure, genesis, age, type of frozen sediments

ВВЕДЕНИЕ

Исследователи Арктики отмечают слабую обоснованность фактическими данными палеогеографических реконструкций, геологической и криогенной истории формирования позднекайно-

зойских толщ арктических островов и Баренцево-Карского шельфа. Специализированных геокриологических исследований мерзлых толщ на островах архипелага Земля Франца-Иосифа в XX в. не

проводилось. Расчетные характеристики мерзлых толщ, оценки типов промерзания четвертичных толщ требовали проверки. По расчетам [Кондратьева, 1980], глубина сезонного слоя (СТС) составляла 15–40 см, температуры пород на свободных от покровных льдов участках могли достигать от –7 до –13 °С. Предполагалось, что мерзлые толщи обладают массивными и слоистыми криогенными текстурами и объемной льдистостью от 0.2 в песчаных породах до 0.4 в суглинках. По типу промерзания четвертичные отложения были отнесены к парасингенетическим, дочетвертичные породы – к эпикриогенным [Геокриология СССР, 1988].

В 2010 г. в ходе исследований международной экспедиции с участием Института криосферы Земли (ИКЗ) СО РАН и Института арктической биологии Университета Аляски (Фэрбанк, США) эти результаты были подтверждены. По данным прямых измерений на о. Хейса, глубина СТС составляла 0.34–0.68 м, многолетнемерзлые породы имели температуру –8.0 до –10.5 °С, что несколько выше расчетных значений [Дроздов и др., 2011].

В.Д. Дибнером [1961, 1965] среди криогенных образований на 50, 25–20, 10–8.5-метровых террасах в голоценовых морских, склоновых, ледниковых отложениях мощностью 2.5–5.0 м были отмечены погребенный ледниковый и припайный льды, снежники и жильные льды. Выявлены современные ростки ледяных жил толщиной 2–3 мм [Дроздов и др., 2011]. Тем не менее криогенное строение отложений остается малоизученным.

Мерзлотно-фациальные обстановки аккумуляции и типы промерзания отложений диагностируют по изменениям криогенного строения толщ в разрезах [Катасонов, 1972; Строение..., 1979]. Сингенетически и эпигенетически промерзавшие отложения различают по льдистости, криогенным текстурам, соотношению полигонально-жильных льдов с вмещающей толщей. Протаявшие отложения и после вторичного промерзания в природных условиях сохраняют признаки первичного криогенного строения – псевдоморфозы и посткриогенные текстуры [Романовский, 1993; Каплина, 2011а,б].

Проблема определения типа криогенного строения толщ возникает, если в распоряжении исследователей есть только малоразмерные фрагменты отложений – керны скважин с элементами макропризнаков. В этих случаях используют криолитологические критерии (особенности гранулометрического, минералогического состава, структурно-текстурной организации отложений на макро- и микроуровнях), обусловленные воздействием криолитогеоза [Конищев, 1981, 1985; Микростроение..., 1988; Рогов, 2009; Курчатова, Рогов, 2014]. В синкриолитогенных субаэральных

и прибрежно-морских засоленных отложениях [Баду, 2010] многократное промерзание–протаивание приводит к разрушению седиментационной слоистости и терригенных частиц, новообразованиям минералов, агрегатных и кольцевых текстур [Зигерт, 1981; Зигерт, Слагода, 1990; Слагода, 1991; Слагода и др., 2014а]. Эпигенетически промерзавшие толщи не имеют подобных признаков циклического промерзания–протаивания, так как промерзание сверху наложено на литифицированные породы [Слагода, 2005], за исключением криогенного элювия – пород, преобразованных в деятельном слое [Конищев, 1981].

Следы криолитогеоза в микростроении эпигенетически и диагенетически промерзавших вязкопластичных при отрицательных температурах засоленных толщ практически не изучены [Микростроение..., 1988; Зайончек, Усов, 2003]. Выявление особенностей микростроения мерзлых засоленных морских толщ как элемента систематики признаков криолитогеоза в рамках криотрасологии нужны для объективной реконструкции истории накопления и промерзания отложений в высокоширотной Арктике и на шельфе.

РАЙОН И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Характеристика района исследований.

Остров Хейса является частью архипелага Земля Франца-Иосифа, расположенного на северо-востоке шельфа Баренцева моря, между 80° и 82° с.ш. (рис. 1). Острова архипелага имеют характер платообразных возвышенностей с высотами 400–490 м; слагающий их осадочно-вулканогенный чехол нарушен блоковыми неотектоническими движениями с амплитудой до 1000 м по крутопадающим разломам: поднятые блоки – острова, опущенные – проливы [Геокриология СССР, 1988]. Остров Хейса сложен юрскими и меловыми аргиллитами, песчаниками и алевролитами с покровами и силлами базальтов мощностью 5–40 м [Дибнер, 1965], которые прорваны мезозойскими дайками долеритов [Карякин и др., 2009]. Базальтовые тела залегают наклонно и горизонтально, бронируют песчаники, аргиллиты и создают квестовый рельеф. Дайки образуют невысокие островвершинные хребты северо-западного направления высотой до 100 м и ограничивают понижения в рельефе – депрессии с террасированной поверхностью высотой 0–50 м, ступенчато снижающейся к морю. Склоны дренирует сеть мелких ручьев – водосборы тающих снежников, ледника, которые стекают в неглубокие долины, врезанные в низкие морские террасы.

На острове расположен ледниковый купол Гидрографов с максимальной отметкой поверхности 242 м, приуроченный к возвышенным частям даек. На склонах даек выражены пологие наклонные ступени, а в коренных песчаниках – современ-

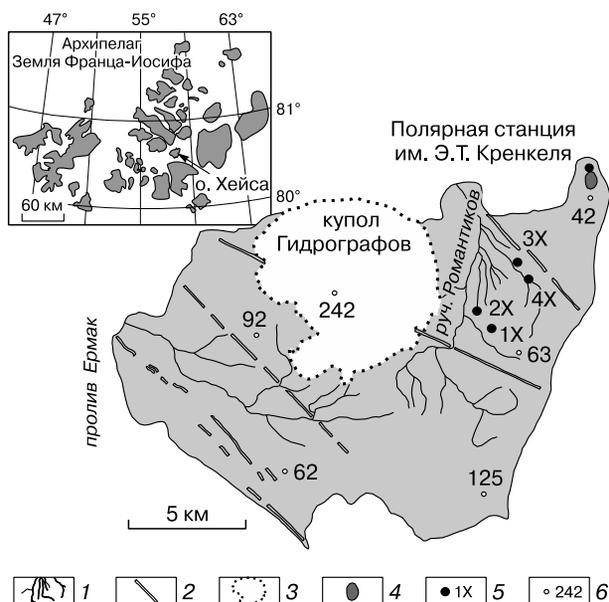


Рис. 1. Схема района исследований.

1 – гидросеть; 2 – дайки; 3 – ледник; 4 – озеро; 5 – скважины и расчистка; 6 – абсолютные отметки высот.

ные врезы ручьев, фиксирующие отступление ледника. На поверхности депрессии встречаются продукты недалекого разноса глыб и валунов, свидетельствующие, что площадь купола была больше современной. На северных склонах, уступах пород, ледника и в долинах ручьев распространены современные многолетние снежники, местами перекрытые эоловыми песками. Часть острова, не закрытая ледником, относится к природной зоне арктических пустынь.

Методы исследований. Три скважины (скв.) глубиной от 3 до 10 м и расчистка (расч.) в долине ручья, расположенные между дайкой высотой 40–80 м и ледником, показаны на условной схеме рельефа (рис. 2). По керну было изучено криогенное строение, определены весовая влажность, механический состав и состав водорастворимых солей отложений, химический состав расплава льда, стабильные изотопы кислорода, дейтерия льда (Х. Мейер, Институт полярных и морских исследований им. А. Вегенера). Определены стратиграфическая приуроченность, видовой состав морских моллюсков и ареалы их обитания (А.В. Крылов, ЗАО “Поляргео”), возраст их раковин из скважин (Т. Гослар, Познанская радиоуглеродная лаборатория).

Особенности микростроения отложений в шлифах и репликах из ориентированных монолитов изучены с помощью оптической и сканирующей электронной микроскопии (ИКЗ СО РАН) и использованы для определения фациально-генетических условий накопления и промерзания оса-



Рис. 2. Положение скважин в рельефе о. Хейса (условная схема):

1 – юрские песчаники, алевролиты; 2 – силлы базальтов; 3 – морские и прибрежные отложения; 4 – делювиальные, элювиально-делювиальные отложения.

дочных толщ как признаки, характерные для процессов криолитогенеза на Приморских равнинах Арктики [Слагода и др., 2013, 2014а,б; Slagoda, Kurchatova, 2008]. Среди этих признаков для синкриогенных отложений характерны тонко-слоистые и сетчатые криогенные текстуры, многопорядковые агрегаты, кольца обломков, трещиноватость минеральных зерен, смещения компонентов седиментационной текстуры породы. После вытаивания шлиров льда в природных условиях в отложениях сохраняются пустоты и поры, блоковая и комковатая отдельность – посткриогенные текстуры отложений. В эпикриогенных толщах присутствуют слоистые, решетчатые и наклонные ломаные криогенные текстуры, унаследованные или наложенные на седиментационную слоистость, диагенетические или первичные посткриогенные текстуры. После протаивания эпикриогенных уплотненных пород пустоты часто смыкаются, оставляя посткриогенные текстуры в виде смещения слоев, уплотнения, обезвоживания блоков пород, иногда ожелезнение на контактах с трещинами.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В зоне отступления ледника Гидрографов на наклонных ступенях поверхности высотой 30–27 м, осложняющих склон депрессии в центре о. Хейса, расположены скважины 1X и 2X глубиной 1 и 3 м (см. рис. 1, 2). На поверхности ступеней с уклоном 5–10° к западу преобладает открытый грунт, частично закрытый лишайником и мхом, отмечены высыпки щебня, выпученные и растрескавшиеся на месте вертикальные плиты, глыбы песчаников, конкреции сидерита (до 2 м). Крупные плоские полигоны (более 20 м) разделены мелкими канавами и осложнены пятнами-ме-

Таблица 1. Криолитологическое описание разрезов скважин о. Хейса

Скважина, слой	Глубина, (мощность), м	Литология	Криотекстура	Влажность, %
1	2	3	4	5
Скв. 1Х, сл. 1	1.0–0.64 (0.36)	Пески пылеватые темно- и светло-серые с полого-наклонной линзовидной слоистостью. Содержат рассеянную дресву, вертикально-ориентированные удлиненные обломки серых песчаников, алевролитов и коричневые линзы растительного детрита	Линзовидная, неполносетчатая, волнисто-слоистая, толщина шпиров от 0.2 до 2.5 см; в наклонных прослоях льда толщиной 4–6 см отмечены включения супеси, детрит, пузырьки воздуха	65.0
Скв. 1Х, сл. 2	0.64–0.48 (0.16)	Пески серые, желтоватые с прослоями коричневой супеси, с включениями охристых обломков песчаников	Наклонная линзовидная, неполносетчатая, вверху базальная; толщина шпиров увеличивается вверх по разрезу	78.1
Скв. 1Х, сл. 3	0.48–0.0 (0.48)	Супеси желто-коричневые с мелкими охристыми примазками, с растительным детритом	Толстошлировая (до 2.5 см) решетчатая. Вверху отмечены гнезда льда (5 см) с пустотами до 1 см. Мерзлая часть до глубины 0.35 м, выше – талая тиксотропная часть СТС	94.3
Скв. 2Х, сл. 1	2.9–1.9 (1.0)	Песчаники крепкие, мелкозернистые слоистые с прослоями темно-серых алевролитов, с охристыми пятнами, потеками. Переход к вышележащим пескам постепенный	Массивная с редкими тонкими (1–3 мм) линзами, секущими и по плоскостям наслоения; стенки криогенных пустот ожелезнены, с примазками белесых солей карбонатов	11.4–19.0
Скв. 2Х, сл. 2	1.9–1.25 (0.65)	Пески серые, слабосцементированные песчаники, алевролиты с четкой седиментационной слоистостью	Тонкая линзовидная в суглинках и алевролитах; в песках линзы льда до 2 см	36.9
Скв. 2Х, сл. 3	1.25–0.6 (0.65)	Супеси, суглинки темно-серые с подчиненными прослойками светлых алевролитов, тонких песков с охристыми пятнами, мелким растительным детритом, линзами серых суглинков, коричневых глин. Слоистость невыдержанная, горизонтальная и пологонаклонная	Тонкая линзовидная, редкие горизонтальные и наклонные шпирьы, на контактах со льдом породы ожелезнены. В песках с наклонной слоистостью встречены наклонные линзы льда толщиной до 0.5 см	14–19
Скв. 2Х, сл. 4	0.6–0.0 (0.6)	Супеси желтовато-коричневые и пески, светло-серые алевролиты с волнистой слоистостью, желтыми пятнами и растительным детритом, с линзами, слоями, криотурбациями коричневого суглинка	Тонкая частая линзовидная и массивная. Мерзлые породы до глубины 0.4 м, выше – талые сухие. Современный СТС	29.4
Скв. 3Х, сл. 1	6.5–10.0 (3.5)	Пески, супеси серые с черными пятнами и кольцами по ходам полихет, засоленные. В нижней части пески содержат уплощенные окатыши и угловатые кусочки глин, выше – дресву серых карбонатных и охристых песчаников, алевролитов, крупные толсто-стенные раковины. На мерзлых породах налет солей. Верхняя граница слоя размыта	Массивная с редкими наклонными ломаными, параллельными шпирями и тонкими вертикальными и горизонтальными шпирями, образующими решетку (см. рис. 2, 3)	25–31
Скв. 3Х, сл. 2	3.62–6.5 (2.9)	Пески тонкозернистые и супеси песчаные табачно- и темно-серые с черными пятнами, засоленные. Внизу преобладают наклонные прослойки (0.5–2.0 см) песков и темно-серой супеси с раковинами. В середине слоя выделены прослой, гнезда (0.10–0.15 м) желтовато-коричневой супеси с дресвой базальтов, присутствуют обломки тонкостенных раковин, целые, частично разложенные раковины, единичные растительные остатки хорошей сохранности (веточка ивы с корой). На мерзлых породах налет солей. Верхняя граница слоя размыта	Линзовидная наклонная и горизонтальная. В прослоях желто-коричневой супеси – атакситовая (рыхлый зернистый лед с включениями песка и пустотами)	37–41 95–100
Скв. 3Х, сл. 3	0.95–3.62 (2.7)	Пески с прослоями супеси. Внизу – сизовато-серые пески алевроитовые с тонкой наклонной слоистостью, выше – табачно-серые супеси, пески с нечеткой слоистостью с толстостенными целыми и разбитыми раковинами, засоленные. Характерны черные наклонные и вертикальные прожилки, кольца, продольные и поперечные срезы ходов полихет. На мерзлых породах налет солей. Кровля слоя размыта	Внизу слоя – наклонные линзы льда до 0.3 см с пустотами; в средней части – тонкие линзы, параллельные наклонной слоистости, вверху – лед-цемент, тонкие ледяные шпирьы и зияющие трещины, со стенками, покрытыми инеем	25–49

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
Скв. 3X, сл. 4	0.52–0.95 (0.43)	Пески мелкозернистые сизо-серые с черными пятнами, с обломками ракушек. Черные пятна окружают проникающие сверху затеки табачно-серых песков с охристыми пятнами. Нижняя граница резкая волнистая с мелкими узкими трещинами	Массивная с гнездами, корками и тонкими линзами льда. Переходный слой	56
Скв. 3X, сл. 5	0.0–0.52 (0.48)	Пески и супеси коричневатого и желтовато-серые с охристыми пятнами гидроокислов железа, с внедрениями, затеками и карманами	Внизу – базальная, атакситовая, выше – тонкая линзовидная и неполносетчатая массивная. Талые породы с плитчатой посткриогенной отдельностью до глубины 0.34 м. Современный СТС	77–98
Расч. 4X, сл. 1	3.2–2.2 (1.0)	Супеси коричневатого-серые с нечеткой слоистостью, образованной линзами, прослоями (2 см) желтоватого песка, с ржавыми пятнами, черными примазками. Кровля слоя размыта	Внизу слоя – крупноволнистая слоистая (шлиры льда 2–5 см), вверху – базальная, атакситовая неполносетчатая (шлиры толщиной 0.5 см)	–
Расч. 4X, сл. 2	2.2–1.25 (1.0)	Супеси темно-серые и пески охристые с тонко- и толстостенными раковинами, целыми и разбитыми на фрагменты. Пологонаклонная параллельная слоистость образована слоями супеси (8–20 см) и охристых песков (2–5 см)	Массивная и корковая (вокруг раковин)	–
Расч. 4X, сл. 3	1.25–0.5 (0.75)	Пески охристые и коричневатые суглинистые с дресвой, щебнем долеритов, с целыми и колотыми раковинами. Четкая косая, наклонная слоистость образована параллельными слоями (2–10 см). Нижняя граница резко наклонена к ручью	Массивная, на глубине 0.80–1.25 м залегает наклонная неровная линза льда длиной 60 см, толщиной 3–10 см	–
Расч. 4X, сл. 4	0–0.5 (0.5)	Пески светло-желтые неслоистые с обломками раковин. Кровля слоя наклонена к ручью	Талые, современный СТС	–

дальюнами и блоками грунта (0.1–0.3 м) между сезонными трещинами усыхания.

В скв. 2X (80°35'35" с.ш., 57°54'13" в.д.) в интервале глубин 1.9–3.0 м вскрыты мерзлые коренные породы (табл. 1; рис. 3, А, Б; 4, в–д).

Слой 1: крепкие мелко-тонкозернистые песчаники и алевролиты с примесью глинистых частиц 8–13 %, с наклонной слоистостью, низкой льдистостью и тонкими косыми трещинами со льдом.

Слой 2: льдистые выветрелые песчаники, пески с линзовидной криотекстурой.

Слои 3, 4, скв. 2X и слои 1–3, скв. 1X (покровные отложения, залегающие на коренных породах) – супеси, суглинки, пылеватые пески с нечеткой пологонаклонной слоистостью, параллельной дневной поверхности, с включениями выветрелых ожелезненных песчаников и мелким растительным детритом. Они характеризуются высокой льдистостью и массивными, линзовидными, сетчатыми, базальными и атакситовыми криотекстурами (см. табл. 1). В песках и песчаных алевритах повышено содержание крупноалевритовых частиц – 29.0–41.5 %, в глинистых алевритах частиц размером менее 0.005 мм – до 40 %. Отложения имеют низкую засоленность, для них характерен морской тип соотношения главных ионов солей $Cl > SO_4 > HCO_3$ и $Na + K > Mg > Ca$ (табл. 2).

В зоне распространения низких террас, пологонаклонных к западу под углом 3–5° в сторону

моря, пробурена скв. 3X глубиной 10 м, заложена расчистка обнажения 4X.

Скв. 3X (80°36'23" с.ш., 57°54'35" в.д.) расположена на 20-метровой террасе, расчлененной на сегменты руч. Романтиков, его притоками и промоинами, заложенными по морозобойным трещинам. На поверхности террасы выражены крупные полигоны, вытянутые параллельно невысоким (2.5–3.0 м) уступам к долине ручья; отмечены плоские канавы, трехлучевые сочленения морозобойных трещин с узкими валиками, повсеместно встречаются многочисленные раковины.

Отложения, вскрытые скв. 3X (см. табл. 1), представлены слоистыми алевритовыми песками с содержанием крупнопылеватых частиц 17–25 %, песчаными и глинистыми алевритами с преобладанием крупнопылеватой фракции – 30.0–56.2 % (см. рис. 3). Мерзлые сизо-серые, табачно-серые, реже желтовато-коричневые отложения содержат целые и колотые двусторчатые раковины моллюсков, многочисленные сизо-черные пятна и извилистые полосы – органические ткани полихет, разложенные на месте обитания (см. рис. 4). Отложения при испарении льда покрываются налетом солей, т. е. сильно засолены; по соотношению ионов $Cl > SO_4 > HCO_3$ и $Na + K > Mg > Ca$ характеризуются морским типом засоления (см. табл. 2).

В разрезе скв. 3X по различиям литологического и криогенного строения, резким границам размыва выделено пять слоев.

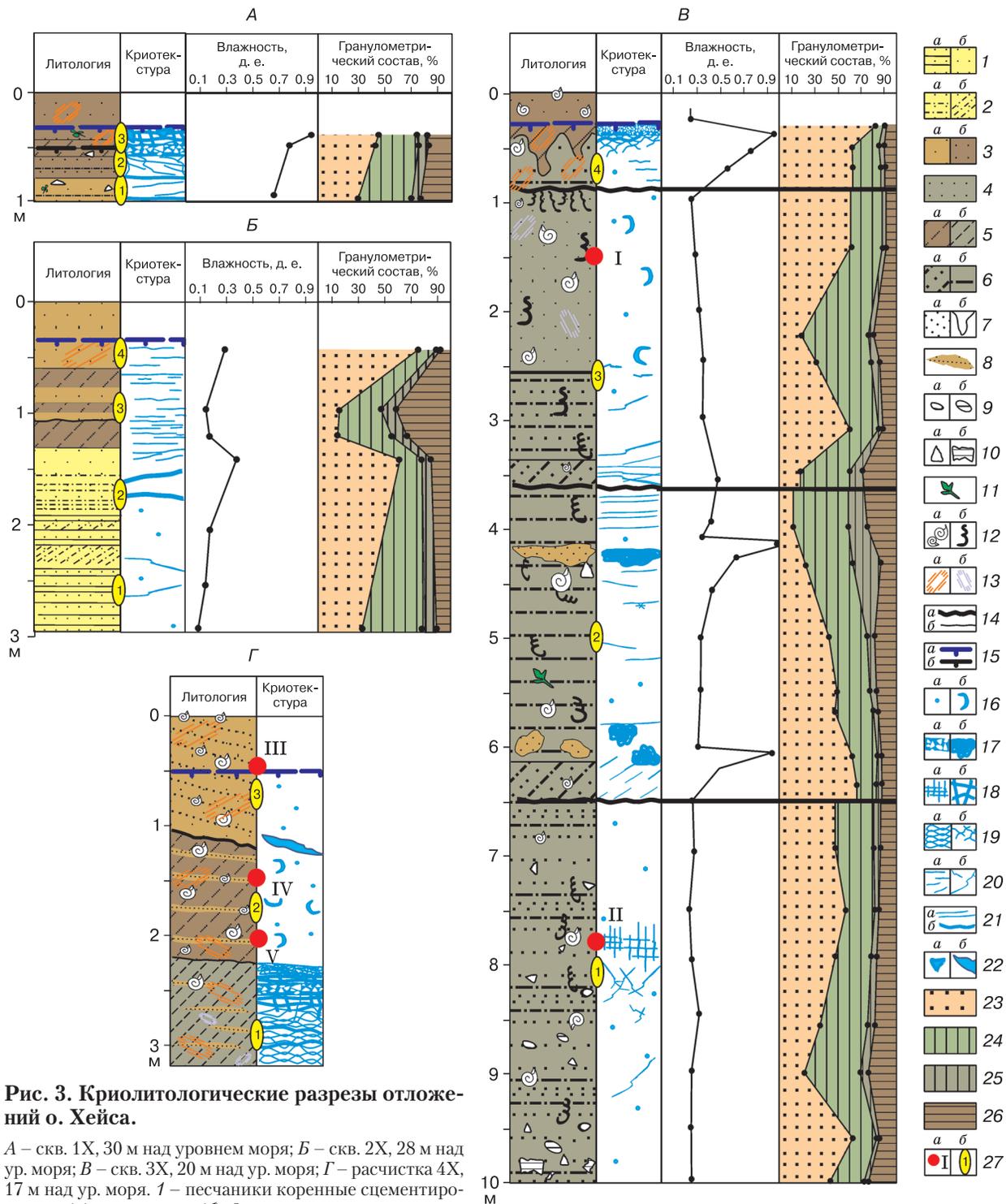


Рис. 3. Криолитологические разрезы отложений о. Хейса.

А – скв. 1Х, 30 м над уровнем моря; Б – скв. 2Х, 28 м над ур. моря; В – скв. 3Х, 20 м над ур. моря; Г – расчистка 4Х, 17 м над ур. моря.

1 – песчаники коренные цементированные (а), выветрелые (б); 2 – алевролиты горизонтально-слоистые (а), косослоистые (б); 3 – пески незасоленные серые (а), коричневатые глинисто-алевритовые (б); 4 – пески засоленные глинисто-алевритовые; 5 – супеси незасоленные (а), засоленные (б); 6 – косая, наклонная слоистость засоленных песков, алевритов (а), горизонтальная слоистость супесей, суглинков (б); 7 – косая крупная слоистость песков (а), грунтовые внедрения, жилки (б); 8 – линзы, прослои незасоленных песков; 9 – галька крепких пород (а), окатыши алевролитов, аргиллитов (б); 10 – неокатанные обломки песчаников (а), аргиллитов (б); 11 – растительные остатки, веточки; 12 – раковины моллюсков (а), следы разложившихся полихет (б); 13 – пятна, потеки охристые (а), сизые (б); 14 – границы размыва (а), литологические (б); 15 – нижняя граница СТС современная (а), реликтовая (б); 16–22 – криотекстуры: 16 – массивная (а), корковая (б); 17 – атакситовая (а), базальная (б); 18 – решетчатая тонкая (а), толстошпировая (б); 19 – сетчатая (а), неполносетчатая (б); 20 – линзовидная (а), косая ломаная (б); 21 – слоистая тонкая (а), толстошпировая (б); 22 – гнездовая (а), линзы льда (б); 23–26 – гранулометрические фракции (мм): 23 – 1.0–0.05; 24 – 0.05–0.01; 25 – 0.01–0.005; 26 – менее 0.005; 27 – образцы раковин на определение возраста (а), номер слоя (б). Точки I–V – определения ¹⁴С-возраста (календарных лет): I – (7140 ± 50) тыс. лет назад, скв. 3Х, гл. 1.5 м, морские двустворчатые моллюски; II – (9770 ± 50) тыс. лет назад, скв. 3Х, гл. 7.8 м, морские двустворчатые моллюски; III – (7510 ± 50) тыс. лет назад, расч. 4Х, гл. 0.45 м, морские двустворчатые моллюски; IV – (8040 ± 50) тыс. лет назад, расч. 4Х, гл. 1.6 м, обломки морских двустворчатых моллюсков; V – (8170 ± 50) тыс. лет назад, расч. 4Х, гл. 2.0 м, обломки морских двустворчатых моллюсков.

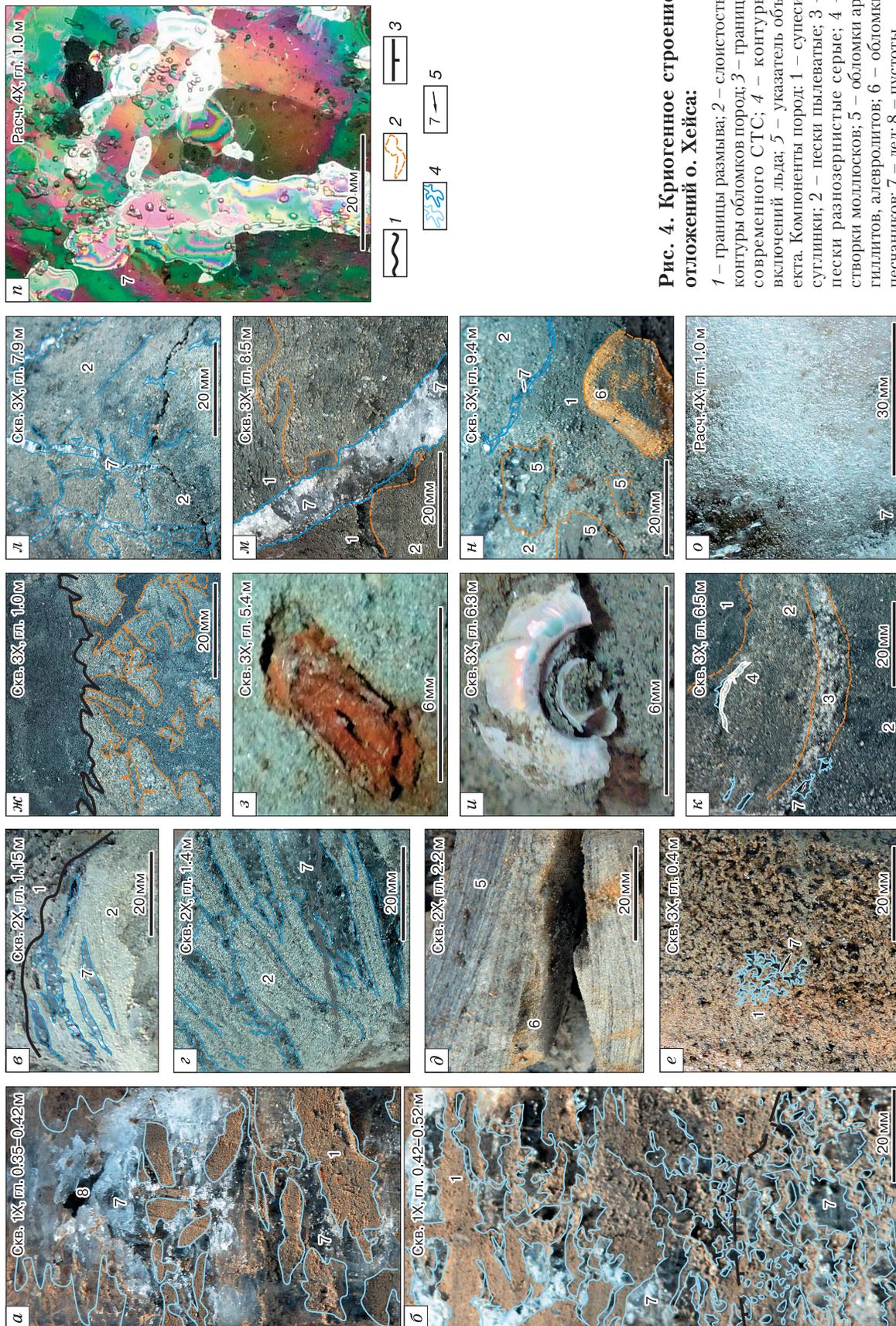


Рис. 4. Криогенное строение оглозений о. Хейса:

1 – границы размыта; 2 – слонность, контуры обломков пород; 3 – граница современного СТС; 4 – контуры включений льда; 5 – указатель объёма. Компоненты пород: 1 – супеси, суглинки; 2 – пески пылеватые; 3 – пески разномерные серые; 4 – створки моллюсков; 5 – обломки арктических моллюсков; 6 – обломки гиллитов, алевролитов; 7 – лёд; 8 – пустоты.

Таблица 2. Химический состав отложений о. Хейса

Скважина	Глубина, м	Содержание ионов, %-экв.							Сумма ионов, мг/100 г	С _{общ.} , %
		HCO ₃	Cl	SO ₄	Ca	Mg	K	Na		
2X	0.6	12.1	60.4	27.5	2.3	8.1	2.1	87.5	4.04	0.279
	1.0	–	–	–	–	–	–	–	–	1.262
	1.2	5.9	65.0	29.1	0.7	4.4	1.7	93.2	12.38	1.363
	1.4	–	–	–	–	–	–	–	–	0.482
	2.5–2.55	6.9	51.8	41.3	1.3	6.7	2.4	89.6	6.66	–
3X	0.32	–	–	–	–	–	–	–	–	0.350
	0.71	–	–	–	–	–	–	–	–	0.610
	1.0	–	–	–	–	–	–	–	–	0.558
	1.4–1.5	4.2	74.9	20.9	3.9	7.3	3.9	84.9	29.66	0.585
	2.2–2.27	0.7	86.4	12.9	2.9	6.7	2.7	87.7	48.62	0.950
	2.5	–	–	–	–	–	–	–	–	0.885
	2.52	–	–	–	–	–	–	–	–	0.480
	3.0–3.2	0.7	88.3	11.0	2.5	4.9	2.1	90.5	63.18	0.665
	3.5	–	–	–	–	–	–	–	–	1.162
	4.3	–	–	–	–	–	–	–	–	0.562
	5.0	0.7	87.4	11.9	2.2	6.7	2.5	88.6	57.62	–
	5.5	–	–	–	–	–	–	–	–	0.882
	6.35–6.4	0.8	88.3	10.9	2.5	6.1	2.6	88.8	32.41	–
	6.95	–	–	–	–	–	–	–	–	0.767
	7.5	–	–	–	–	–	–	–	–	0.663
	7.92	–	–	–	–	–	–	–	–	0.768
	8.5–8.6	0.6	87.6	11.8	3.2	5.1	2.2	89.5	60.26	0.873
9.0	–	–	–	–	–	–	–	–	1.153	
9.6	–	–	–	–	–	–	–	–	0.597	
10.0	–	–	–	–	–	–	–	–	0.897	

Примечание. Прочерк – содержание не определялось.

Слой 1 (мощность 3.5 м) отличается многочисленными угловато-окатанными обломками и окатышами пород, в том числе выветрелых базальтов, долеритов, песчаников, аргиллитов, кварца; определены раковины двусторчатых моллюсков *Mya truncata* Linnaeus, 1758 и *Astarte crebricostata* (MacAndrew & Forbes, 1847). Для отложений характерны низкая льдистость, массивная, тонкая решетчатая и ломаная наклонная криотекстуры (толщина шпиров льда 0.2–15.0 мм (см. рис. 4, к–н).

Слой 2 (2.9 м) внизу включает косослоистые пески, подчеркивающие размыв подстилающего слоя, в середине – алевриты и линзы, прослой желтоватой супеси и песков с дресвой выветрелых долеритов. В алевритах, кроме толстостенных раковин, найден фрагмент тонкостенной перламутровой раковины брюхоногого моллюска *Margarites cf. groenlandicus* (Gmelin, 1791) и веточка кустарничка с корой (вероятно, ивы) (см. рис. 3; 4, з–к). В слое отмечена повышенная льдистость, выражены наклонная, горизонтальная линзовидная и атакситовая криотекстуры (см. табл. 1).

Слой 3 (2.7 м) отличается преобладанием песков с толстостенными раковинами моллюсков *Mya truncata* Linnaeus, 1758 и черно-сизыми ходами полихет, скопления которых подчеркивают верхнюю размытую границу слоя (см. рис. 4, ж). Льдистость понижается вверх по разрезу. Криотекстуры: внизу – линзовидная, выше – массивная, корковая (вокруг раковин) и линзовидная, вверху в шпирях льда отмечены полости и пустоты.

Слой 4 (0.43 м) резко выделяется пестрой окраской песков за счет охристых и черных пятен, перемятой слоистостью, присутствием грунтовой жилки, повышенной льдистостью и корковой, гнездовой криотекстурой.

Слой 5 (0.52 м) – пески, супеси желтоватые льдистые с базальной и атакситовой криотекстурой (см. рис. 4, е). До глубины 0.4 м пески талые сухие.

По расчистке 4X, расположенной в 100 м от скв. 3X, изучено строение низкой террасы (14–15 м над ур. моря), узкой полосой протягивающейся вдоль бортов долины руч. Романтиков. Тер-

Таблица 3. Изотопный состав линзы льда из расчистки 4X-2010 о. Хейса

Лаборат. номер	Позиция	Разрез	$\delta^{18}\text{O}$, ‰ (vs. SMOW)	δD , ‰ (vs. SMOW)	d_{exc}
31806	7/5	4X-2010-1A	-14.82	-110.8	7.7
31807	8/5	4X-2010-1B	-14.84	-110.5	8.2

Примечание. d_{exc} – дейтериевый эксцесс.

Таблица 4. Химический и микрокомпонентный состав расплава линзы льда о. Хейса

pH	γ , См/м	Содержание ионов, %-экв.							Сумма ионов, мг/л	Взвеш. вещ-во, г/л	PO ₄	NO ₃	Орг. ХПК
		HCO ₃	Cl	SO ₄	Na	K	Ca	Mg					
6.08	$4.65 \cdot 10^{-3}$	24	49	27	50	5	25	20	20.69	1.29	0.04	8.08	0.72

Содержание элементов (ppm) по результатам ICP-MS анализа*

Li	Be	B	Al	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Sr	Mo	Cd	Ba
–	13.37	64.42	2.50	0.36	0.51	77.52	98.92	0.16	1.53	0.44	3.73	0.03	–	10.26	1.66	–	5.72	–

Примечание. Расплав льда получен непосредственно перед выполнением анализов.

γ – удельная электрическая проводимость при температуре жидкости 25 °С.

ХПК – химическое потребление кислорода характеризует суммарное содержание в воде органических веществ по количеству израсходованного на окисление химически связанного кислорода.

* Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) выполнена с помощью масс-спектрометра Agilent 7500ce.

Прочерк – содержание ниже предела обнаружения.

раса разделена промоинами на останцы шириной до 30–50 м, высотой 4–5 м над руслом ручья и отделена от 20-метровой террасы снежниками под уступом. На ее поверхности отмечены песчаные раздувы, трещиноватые глыбы, высыпки раковин, найдены позвонки китов, а в русле ручья – окатанный трещиноватый ствол дерева.

В разрезе 4X (см. табл. 1) выделены СТС и многолетнемерзлые отложения: слой 1 – высокольдистые горизонтально-слоистые супеси, суглинки; слои 2, 3 – малольдистые пески и супеси с наклоном слоистости в долину ручья, с поврежденными раковинами *Mya truncata* Linnaeus, 1758, *Astarte placenta* (Morch, 1869) и наклонной линзой льда с хаотичными пузырьками воздуха, включениями вмещающего грунта по краям (см. рис. 3). Во льду определены изотопы кислорода и водорода, низкая минерализация (20.7 мг/л), хлоридно-сульфатно-натриевый состав (табл. 3). Среди микрокомпонентов отмечено повышенное содержание бериллия, бора, хрома, марганца, селена, кадмия (табл. 4). Во льду выявлены культивируемые психрофильные микроорганизмы (725 КОЕ/мл), среди них доминировали пигментированные оранжевые, желтые и розовые колонии.

В разрезах скважин 1X, 2X по изменению криогенных текстур и льдистости выделены современный сезонноталый слой и многолетнемерзлые породы: переходный слой (реликтовый СТС) [Шур, 1988], покровный слой, выветрелые и цементированные коренные породы. В разрезе 20-метровой террасы выделены: слой 5 – сезонноталый с талой и мерзлой частями; слой 4 – переходный; слои 3, 2, 1 – многолетнемерзлые засолен-

ные отложения. В разрезе 4X выделены СТС и мерзлые отложения, отличающиеся от 20-метровой террасы (см. рис. 2).

ОБСУЖДЕНИЕ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные материалы позволили определить обстановку накопления, типы криогенного строения и условия промерзания отложений, их возраст.

Генезис и типы криогенного строения отложений в зоне отступления ледника. В строении наклонных ступеней (скв. 1X, 2X), по изменению криотекстур и льдистости выделены современный сезонноталый слой (0.48 м) и многолетнемерзлые отложения: переходный слой (реликтовый СТС, 0.16 м); слой 3 – покровные супеси, пески с параллельной, наклонной поверхности слоистостью, с обломками коренных пород и растительным детритом; слои 1, 2 – выветрелые и литифицированные коренные породы.

Микростроение пород использовано для определения типа криолитогеоза толщ.

В микростроении литифицированных алевролитов, песчаников (слой 1) выражена четкая седиментационная наклонная и горизонтальная слоистость, образованная распределением глин, гидроокислов железа, ориентировкой обломочных частиц, удлиненных лигнитизированных остатков. Здесь присутствуют угловато-окатанные и оскольчатые полевые шпаты, кварц, выветрелые кристаллические породы. Слои секут и смещают криогенные трещины – сомкнутые, заполненные мелкими частицами линейные пустоты, соответ-

ствующие неполной решетчатой криотекстуре. Характерна трещиноватость обломков, выраженная при разных увеличениях, в том числе на образцах, не испытавших механической обработки.

В микростроении выветрелых песчаников, алевролитов (слой 2) также сохранена параллельная седиментационная линзовидная слоистость, но преобладают трещиноватые остроугольные и оскольчатые обломки полевых шпатов. Криогенные пустоты (до 2.5 мм) изометричные и удлиненные, имеют рыхлые неровные стенки, приурочены к тонкодисперсным слоям. Тонкодисперсные слои имеют многопорядковые сложные агрегатные микротекстуры: изометричные агрегаты (0.3–0.5 мм) обрамлены кольцами из обломочных зерен с черепитчатой укладкой (рис. 5, а–в).

Характер изменения криогенного строения, трещиноватости обломков и распределения агрегатно-кольцевых микротекстур свидетельствуют о затухающей вниз по разрезу переработке коренных пород циклическим промерзанием–протаиванием. Поэтому выветрелые и литифицированные коренные породы мезозоя отнесены к криогенному элювию. Засоленность коренных аллювиальных пород [Geology..., 1998] морскими солями, вероятно, возникла при их затоплении морем, до образования ледников в архипелаге.

В микростроении покровных песков (слой 3, скважины 1X, 2X) преобладают остроугольные и оскольчатые трещиноватые обломки, сложные агрегатно-кольцевые микротекстуры, наклонная слоистость, образованная ориентировкой свежих и замещенных глинами растительных остатков. Криогенные округлые пустоты имеют рыхлые неровные стенки.

Указанные особенности и параллельная уклону поверхности седиментационная слоистость, свежие растительные остатки, высокая льдистость и криотекстура свидетельствуют о субаэральном делювиальном генезисе и сингенетическом промерзании осадков.

Таким образом, высокие террасы и ступени в рельефе о. Хейса – это субаэральные структурные денудационные и аккумулятивно-денудационные поверхности, а слабая засоленность делювия солями морского типа обусловлена ассимиляцией солей из коренных пород.

Генезис и типы криогенного строения отложений в зоне низких аккумулятивных террас. В строении 20-метровой террасы по криогенному строению выделены слои: слой 5 – сезоннотальный с талой и мерзлой частями; слой 4 – переходный; слои 3, 2, 1 – многолетнемерзлые отложения. Анализ микростроения отложений подтвердил различия слоев, выделенных по макропризнакам в разрезе 20-метровой террасы.

В микростроении отложений слоя 1 выделены главные особенности: хаотичное, гнездовое рас-

пределение обломков, характерное для ледового разноса; отсутствие трещиноватых обломков и преобладание простых глинистых агрегатов (менее 0.05 мм); пластичные смятия слоистости; следы интенсивного химического выветривания угловато-окатанных обломков минералов и пород, характерные для морской среды; криогенные пустоты с ровными краями, которые секут, смещают и изгибают слои, окатыши аргиллитов в разных направлениях соответствуют линзовидной и решетчатой криотекстуре (см. рис. 5, ж–и).

Отсюда следует, что в микростроении отложений отсутствуют признаки циклического промерзания–протаивания и криогенного выветривания. Это свидетельствует об эпигенетическом типе промерзания диагенетически измененных засоленных отложений слоя 1.

В микростроении отложений слоя 2 преобладают: оскольчатые трещиноватые обломки шпатов, кварца; многочисленные кольцевые микротекстуры из обломков и многопорядковые сложные агрегаты (от 0.25–0.80 до 2 мм), полностью маскирующие слоистость; совместно встречающиеся целые карбонатные раковины фораминифер, разложенные ткани полихет, свежий и замещенный коллоидами, сульфидами железа растительный детрит, переотложенные обломки сидеритовых конкреций, раковин.

Микростроение этих отложений имеет признаки циклического промерзания–протаивания, синхронного их накоплению. Это наряду с криогенным строением свидетельствует о сингенетическом типе промерзания засоленных осадков слоя 2.

В микростроении отложений слоя 3 выявлено: преобладание оскольчатых и трещиноватых обломков минералов; многопорядковые агрегаты основной массы в тонкодисперсных прослоях; присутствие фораминифер, свежих слабообразовавшихся тканей полихет, новообразования сульфидов железа и карбонатов; многочисленные неправильные и извилистые линзовидные пустоты с рыхлыми неровными краями, приуроченные к межагрегатным пространствам и соответствующие линзовидно-сетчатой криотекстуре (см. рис. 5, з–е).

Эти признаки микростроения указывают на циклическое промерзание–протаивание и сингенетический тип промерзания осадков слоя 3, а уменьшение льдистости вверх по разрезу и пустоты в шлирах льда, по-видимому, связаны с охлаждением и испарением льда из мерзлых толщ в субаэральном условиях вблизи поверхности.

Обстановки накопления и промерзания отложений низких аккумулятивных террас о. Хейса. Для мерзлых отложений 20-метровой террасы характерны высокая степень засоленности, остатки полихет и многочисленные раковины моллюс-

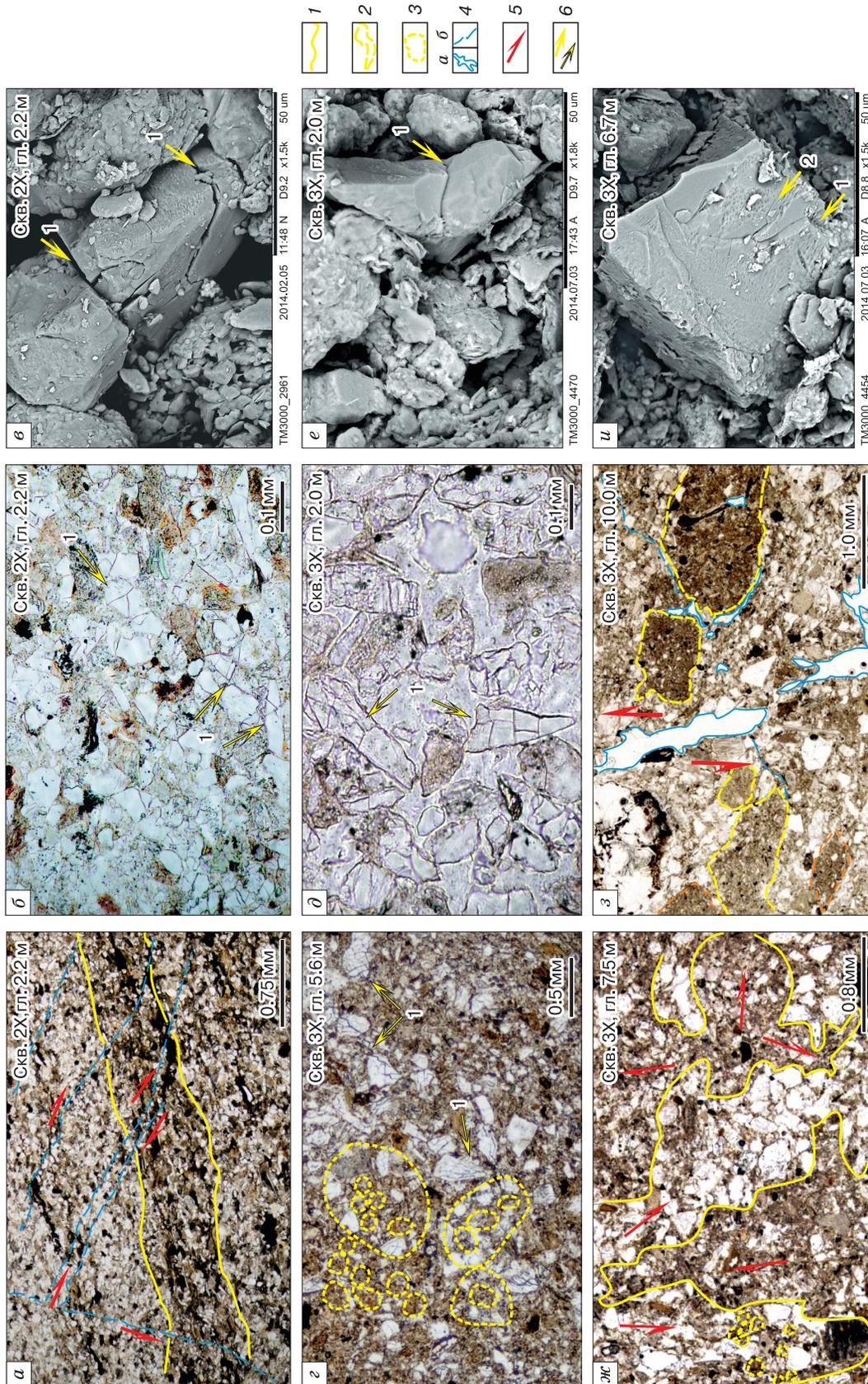


Рис. 5. Микростроение отложений о. Хейса.

a-в – криогенный элювий, скв. 2X, слой 1; *г-е* – сингенетически промерзавшие осадки, скв. 3X, слой 3; *ж-и* – эпигенетически промерзавшие отложения, скв. 3X, слой 1. *1* – границы слоев; *2* – контуры обломков пород и окатышей; *3* – микроагрегаты, кольца из обломков; *4* – контуры криогенных пустот (*a*), посткриогенные сомкнутые трещины (*б*); *5* – направления смещения основной массы породы; *6* – указатель смещения основной массы породы; *1* – трещины, трещиноватые обломки; *2* – следы химического выветривания обломков.

ков, присутствие хаотично рассеянных обломков, что в целом указывает на морской генезис. Отложения слоев 1 и 3 содержат раковины моллюсков *Astarte crebricostata* (MacAndrew & Forbes, 1847), *Mya truncata* Linnaeus, 1758, обитающих в настоящее время на глубинах шельфа 3–200 м в умеренно холодных и арктических водах [Мерклин и др., 1979; Крылов и др., 2009]. Слой 2 содержит раковину *Margarites cf. groenlandicus* (Gmelin, 1791), обитающего на глубинах шельфа 0–100 м в умеренно холодных арктических водах [Троцкий, 1979], и наземные растительные остатки (веточку кустарника с корой). Среда обитания моллюсков и присутствие хаотично рассеянных обломков, по нашему мнению, показывают, что осадки слоев 1 и 3 накапливались при участии айсбергового, ледового разноса в морских заливах большей глубины, чем слой 2, который формировался в мелководных прибрежно-морских условиях литорали. С учетом криогенного макро- и микростроения, типов промерзания отложений реконструированы изменения морских обстановок этих слоев:

- слой 1 накопился и диагенетически преобразован в морском заливе, после осушения был частично размыт и эпигенетически промерз;

- слой 2 накопился в обстановке литорали и супралиторали шельфа, для которой характерна смена субаэральных и субаквальных условий, многократное промерзание–протаивание осадков; он промерзал сингенетически, т. е. при наличии мерзлого субстрата (слоя 1);

- слой 3 накопился в относительно глубоком морском заливе, но промерзал сингенетически, что указывает на сохранение в мерзлом состоянии слоя 2 на дне шельфа, т. е. на высокую скорость осадконакопления в более холодных условиях, чем при накоплении слоя 2.

Из этого следует, что 20-метровая терраса формировалась на фоне колебания глубины и осушения морского залива шельфа.

Низкая 15-метровая терраса вложена в 20-метровую террасу. Супеси слоя 1 расчистки 4X отличаются четкой горизонтальной слоистостью, высокой льдистостью, слоистыми и сетчатыми криогенными текстурами от расположенных на той же глубине слоев 1, 2, скв. 3X (см. рис. 3). Слои 2, 3 расчистки 4X залегают пологонаклонно к долине ручья, выделяются четкой наклонной, косой слоистостью, охристым цветом песков, меньшей засоленностью и низкой льдистостью, включают линзу льда. Эти слои содержат многочисленные обломки и целые раковины моллюсков *Astarte crebricostata* (MacAndrew & Forbes, 1847), *Mya truncata* Linnaeus, 1758, обитающих на глубинах шельфа 3–200 м и в неглубоких заливах шельфа арктических морей. Отложения низкой террасы, судя по многочисленным обломкам переотло-

женных раковин и криогенному строению пород, накопились в мелком заливе за счет размыва 20-метровой террасы и сингенетически промерзали в мелководных и субаэральных условиях.

Состав и структура линзы льда в основании слоистых песков свидетельствуют об участии в формировании 15-метровой террасы золотых и нивальных процессов. Наклон линзы и ее неправильная форма, хаотичная ориентировка пузырьков и включения вмещающего песка по краям льда, а также крупнокристаллическая структура (см. рис. 4, о, п) характерны для промерзшей в замкнутом пространстве свободной воды – пещерно-термокарстового льда, по Б.И. Втюрину [1975]. Такой лед встречается под современными золовыми песками на о. Хейса и под промерзшими осыпями на разрушающихся льдистых берегах Арктики [Стрелецкая и др., 2012]. Несмотря на то что изотопный состав не может служить единственным показателем генезиса льда [Конищев и др., 2014], в изученной линзе льда он отличается от изотопного состава пластовых и жильных льдов севера Западной Сибири [Васильчук, 2006] и попадает в область инфильтрационно-метеорных вод [Крицук, 2010]. Соотношение главных ионов $Cl > SO_4 > HCO_3$, присутствие бора, марганца во льду характерны для морских вод [Фотиев, 1999]. Высокое содержание хрома, бериллия, кадмия в линзе льда о. Хейса по сравнению с льдом Шпицбергена [Корзун, 1985] и подземными льдами Енисейского Севера [Опокина и др., 2014] свидетельствует об участии поверхностных вод, обогащенных продуктами выветривания долеритов и базальтов, в формировании этой линзы. Присутствие во льду цветных колоний микроорганизмов характерно для снежников Арктики.

Все перечисленное выше указывает на то, что линза льда образована за счет талых снеговых и поверхностных вод, дренировавших долериты и засоленную морскую 20-метровую террасу при промерзании в замкнутом состоянии. Небольшая ширина низкой 15-метровой морской террасы, наклон субаэральных образований и слоев в разрезе указывают на затопление долины ручья в ходе ингрессии моря и его постепенное осушение.

Возраст отложений морских террас о. Хейса. Возраст отложений слоев 1–3 в разрезе 3X, разделенных размывами, определен по целым раковинам моллюсков (захороненных на месте обитания) и составляет от 9.8 до 7.1 тыс. лет (см. рис. 3). Таким образом, 20-метровая морская терраса формировалась в бореальный и атлантический периоды голоцена в обстановке колебаний глубины и осушения морского залива шельфа. Отложения низкой террасы содержат раковины моллюсков, возраст которых составляет от 8.1 до 7.5 тыс. лет (атлантический период голоцена). Но

учитывая присутствие переотложенных толсто-стенных раковин и костей китов, 15-метровая ингрессионная терраса могла формироваться позже – во второй половине голоцена [*Geology...*, 1998].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате криолитологических исследований мерзлых отложений, вскрытых скважинами на о. Хейса архипелага Земля Франца-Иосифа, установлено их криогенное строение и генезис.

Высокие структурные наклонные террасы в зоне отступления пассивного ледника сложены криогенным элювием коренных пород мезозоя и маломощными сингенетически промерзавшими делювиальными отложениями.

Низкие террасы сложены морскими засоленными отложениями, а в верхних частях разрезов субаэральными отложениями. В мерзлых отложениях 20-метровой морской террасы выделены:

- нижний слой осадков морского залива с продуктами ледового разноса, эпигенетически промерзший;

- средний слой осадков литорали и супралиторали, сингенетически промерзший в субаквальных и субаэральных условиях мелеющего морского залива;

- верхний слой осадков относительно глубокого холодного морского залива, промерзший сингенетически на мерзлом субстрате в субаквальных условиях.

В мерзлых отложениях 15-метровой ингрессионной террасы участвуют промерзшие сингенетически осадки мелкого морского залива, затопившего долины ручьев, и субаэральные делювиальные и эоловые пески.

Установлено, что 20-метровая морская терраса формировалась на фоне колебания глубины и осушения морского залива шельфа в период от 9.8 до 7.1 тыс. лет назад, в бореальный и атлантический периоды голоцена.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 14-17-000131).

Литература

Баду Ю.Б. Криолитология: учеб. пособие / Ю.Б. Баду. М., КДУ, 2010, 528 с.

Васильчук Ю.К. Повторно-жильные льды: гетероцикличность, гетерохронность, гетерогенность / Ю.К. Васильчук. М., Изд-во Моск. ун-та, 2006, 404 с.

Втюрин Б.И. Поземные льды СССР / Б.И. Втюрин. М., Наука, 1975, 215 с.

Геокриология СССР. М., Недра, 1988, 358 с.

Дибнер В.Д. Новые данные по палеогеографии антропогена Земли Франца-Иосифа в свете первых результатов радиоуглеродных исследований // Докл. АН СССР, 1961, т. 138, № 4, с. 893–894.

Дибнер В.Д. История формирования позднплейстоценовых и голоценовых отложений Земли Франца-Иосифа // Тр. НИИГА. М., 1965, т. XXIV, с. 300–319.

Дроздов Д.С., Слагода Е.А., Абрамов А.А. и др. Предварительные результаты геокриологических исследований на острове Хейса (Земля Франца-Иосифа) // Материалы Четвертой конф. геокриологов России (Москва, 7–9 июня 2011 г.). М., Унив. книга, 2011, с. 52–59.

Зайончек В.Г., Усов В.А. К вопросу о диагенетическом промерзании прибрежно-морских отложений // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 7. Геология, география, 2003, вып. 3, № 23, с. 83–86.

Зигерт Х.Г. Минералообразование в условиях вечной мерзлоты // Строение и тепловой режим мерзлых пород. Новосибирск, Наука, 1981, с. 14–21.

Зигерт Х.Г., Слагода Е.А. Итоги криолитологических исследований ледовых комплексов Якутии // Четвертичная стратиграфия и события Евразии и Тихоокеанского региона. Якутск, ЯНЦ СО РАН, 1990, с. 82–84.

Каплина Т.Н. Древние аласные комплексы Северной Якутии (Сообщение 1) // Криосфера Земли, 2011а, т. XV, № 2, с. 3–13.

Каплина Т.Н. Древние аласные комплексы Северной Якутии (Сообщение 2) // Криосфера Земли, 2011б, т. XV, № 3, с. 20–30.

Карякин Ю.В., Ляпунов С.М., Симонов В.А. и др. Мезозойские магматические комплексы архипелага Земля Франца-Иосифа // Геология полярных областей Земли: Материалы XLII Тектонич. совещ., М., ГЕОС, 2009, т. 1, с. 257–263.

Катасонов Е.М. Типы мерзлых толщ и проблемы криолитологии // Геокриологические и гидрогеологические исследования Сибири. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1972, с. 5–16.

Коницев В.Н. Формирование состава дисперсных пород криолитосферы / В.Н. Коницев. Новосибирск, Наука, 1981, 196 с.

Коницев В.Н. Методы криолитологических исследований / В.Н. Коницев, В.В. Рогов. М., Изд-во Моск. ун-та, 1985, 185 с.

Коницев В.Н., Голубев В.Н., Рогов В.В., Сократов С.А., Токарев И.В. Экспериментальное исследование изотопного фракционирования воды в процессе сегрегационного льдообразования // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 3, с. 3–10.

Кондратьева К.А. Мерзлотные условия Земли Франца-Иосифа // Мерзлотные исслед., 1980, вып. XIX, с. 76–101.

Корзун А.В. Палеоклиматические особенности развития ледникового покрова Арктических островов // Развитие криолитозоны Евразии в верхнем кайнозое / Под ред. А.И. Попова. М., Наука, 1985, с. 150–155.

Крицук Л.Н. Подземные льды Западной Сибири / Л.Н. Крицук. М., Науч. мир, 2010, 352 с.

Крылов А.В., Зархидзе Д.В., Марке Р. Кайнозойские моллюски Российской Арктики и их стратиграфическое значение // Фундаментальные проблемы квартера: итоги изучения и основные направления дальнейших исследований: Материалы VI Всерос. совещ. по изучению четвертичного периода. Новосибирск, 2009, с. 302–304.

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.

- Мерклин Р.Л., Зархидзе В.С., Ильина Л.Б.** Определитель морских плиоцен-плейстоценовых моллюсков северо-востока европейской части СССР // Тр. ПИН РАН. М., Наука, 1979, т. 173, 96 с.
- Микростроение** мерзлых пород / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1988, 182 с.
- Опокина О.Л., Слагода Е.А., Томберг И.В., Сулова М.Ю., Фирсова А.Д., Ходжер Т.В., Жученко Н.А.** Колебание уровня моря и их отражение в составе и строении полигонально-жильных льдов в низовьях Енисея // Лед и снег, 2014, № 2 (54), с. 82–90.
- Рогов В.В.** Основы криогенеза / В.В. Рогов. Новосибирск, Акад. изд-во "Гео", 2009, 208 с.
- Романовский Н.Н.** Основы криолитогенеза криосферы / Н.Н. Романовский. М., Изд-во Моск. ун-та, 1993, 335 с.
- Слагода Е.А.** Особенности микростроения отложений ледовых комплексов Северной Якутии (на примере Быковского полуострова) // Криология почв. Пушкино, ИФХБПП РАН, 1991, с. 38–47.
- Слагода Е.А.** Реконструкция криолитозоны с применением микроморфологических признаков криогенеза в отложениях позднего кайнозоя: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Тюмень, 2005, 48 с.
- Слагода Е.А., Курчатова А.Н., Попов К.А. и др.** Криолитологическое строение первой террасы острова Белый в Карском море: микростроение и признаки криолитогенеза (Часть 2) // Криосфера Земли, 2014а, т. XVIII, № 1, с. 12–22.
- Слагода Е.А., Курчатова А.Н., Опокина О.Л. и др.** Криолитологическое строение первой террасы острова Белый в Карском море: геокриологическая история и изменения природных условий (Часть 3) // Криосфера Земли, 2014б, т. XVIII, № 3, с. 33–45.
- Слагода Е.А., Лейбман М.О., Хомутов А.В., Орехов П.Т.** Криолитологическое строение первой террасы острова Белый в Карском море (Часть 1) // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 4, с. 11–21.
- Стрелецкая И.Д., Васильев А.А., Слагода Е.А., Опокина О.Л., Облогов Г.Е.** Полигонально-жильные льды на острове Сибирякова (Карское море) // Вестн. МГУ. Сер. 5. География, 2012, № 3, с. 57–63.
- Строение** и абсолютная геохронология аласных отложений Центральной Якутии / Под ред. Е.М. Катасонова. Новосибирск, Наука, 1979, 96 с.
- Троицкий С.Л.** Морской плейстоцен сибирских равнин // Тр. ИГиГ СО АН СССР. Новосибирск, 1979, вып. 430, 293 с.
- Фотиев С.М.** Закономерности формирования ионно-солевого состава природных вод Ямала // Криосфера Земли, 1999, т. III, № 2, с. 40–65.
- Шур Ю.Л.** Верхний горизонт мерзлых пород и термокарст / Ю.Л. Шур. Новосибирск, Наука, 1988, 213 с.
- Geology of Franz Josef Land** / Ed. by V.D. Dibner. Oslo, Meddelelse, 1998, No. 146, 191 p.
- Slagoda E.A., Kurchatova A.N.** Micromorphological analyses of main genetic permafrost types in West Siberia // 9th Intern. Conf. on Permafrost (NICOP). Ferbenks, Alaska, USA, 2008, p. 1659–1663.

*Поступила в редакцию
9 февраля 2015 г.*