

КРИОЛИТОГЕНЕЗ

УДК 551.345; 552.5

DOI: 10.15372/KZ20220103

СЛЕДЫ КРИОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОЗДНЕОПЛЕЙСТОЦЕНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ПУР-ТАЗОВСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Е.А. Слагода^{1–3}, А.А. Новосёлов², Е.С. Королева¹, А.О. Кузнецова¹, В.И. Бутаков³,
Я.В. Тихонравова⁴, Э.П. Зазовская⁵¹ Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, 625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия; eslagoda@ikz.ru, koroleva_katy@inbox.ru, mouse132008@gmail.com² Тюменский государственный университет, 625003, Тюмень, ул. Володарского, 6, Россия; an.a.novoselov@utmn.ru³ Тюменский индустриальный университет, 625000, Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия; vladbutakov@yahoo.com⁴ Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; tikh-jana@ya.ru⁵ Институт географии РАН, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29, Россия; geochronology2019@gmail.com

Одна из проблем криолитологии – реконструкция палеогеографических условий, генезиса отложений и истории развития мерзлых толщ, выявление криогенных и палеокриогенных образований по образцам из керна. На севере Пур-Тазовского междуречья Западной Сибири изучен разрез мерзлых отложений, определены гранулометрический и химический состав пород и их влажность, флористический состав растительных остатков и их возраст, описаны криогенные текстуры. Выполнен микроморфологический анализ шлифов и препаратов пород с помощью оптической и электронной микроскопии. В результате по керну скважины установлен аллювиальный, озерный и делювиальный генезис отложений, реконструирована обстановка осадконакопления, каргинский возраст верхней части отложений равнины, соответствующей уровню третьей озерно-аллювиальной террасы в низовьях р. Таз. По криогенным и посткриогенным образованиям, текстурам, микростроению и аутигенным минералам были установлены условия раннедиагенетического преобразования отложений, эпикриогенный и синкриогенный типы строения мерзлых толщ. Реконструирована последовательность этапов промерзания и протаивания верхней части толщи криолитозоны Пур-Тазовского междуречья в позднем неоплейстоцене.

Ключевые слова: криогенное строение, посткриогенные образования, генезис отложений, возраст отложений, состав отложений, микростроение отложений, аутигенные минералы.

TRACES OF CRYOGENIC PROCESSES IN THE LATE PLEISTOCENE SEDIMENTS OF THE PUR-TAZ INTERFLUVE (WEST SIBERIA)

Е.А. Slagoda^{1–3}, А.А. Novoselov², Е.С. Koroleva¹, А.О. Kuznetsova¹, V.I. Butakov³,
Ya.V. Tikhonravova⁴, E.P. Zazovskaya⁵¹ Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre SB RAS, Malygina str. 86, Tyumen, 625026, Russia; eslagoda@ikz.ru² Tyumen State University, Volodarskogo str. 6, Tyumen, 625003, Russia³ Tyumen Industrial University, Volodarskogo str. 38, Tyumen, 625000, Russia⁴ Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Merzlotnaya str. 36, Yakutsk, 677010, Russia⁵ Institute of Geography, RAS, Staromonetny per. 29, Moscow, 119017, Russia

Reconstruction of paleoenvironmental conditions, origin of sediments and permafrost evolution as well as identification of cryogenic and paleocryogenic formations based on sediment cores (small fragments of geological record) are among key scientific problems of cryolithology. We have analyzed grain-size distribution, geochemistry, and water content of sediments from the permafrost section in the North of Pur-Taz interfluvium (West Siberia). Moreover, we have described the floristic composition of plant remnants, their age and the cryostructures found within these sediments. Optical and electron microscopy revealed the micromorphological features of thin sections and specimens of rocks. Based on the sediment core data from the borehole, we have established the alluvial, lacustrine and proluvial origin of sediments. Furthermore, we have reconstructed the conditions of sedimentation in this area and have established the Karginsky age of these sediments. This age corresponds to formation of 3rd lacustrine-alluvial plain in the lower course of Taz river. The conditions of early diagenetic transformations of sediments as well as epigenetic and syngenetic permafrost were reconstructed based on cryogenic and post-cryogenic formations, cryostructures, microstructure and authigenic minerals. We were also able to reconstruct the Late Pleistocene sequences of freeze-thaw cycles in the upper part of the permafrost section of the Pur-Taz interfluvium.

Key words: cryogenic structure, post-cryogenic formations, origin of sediments, sediment age, sediment composition, microstructure of sediments, authigenic minerals.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из важных проблем криолитологии – определение первоначального типа промерзания (сингенетического или эпигенетического) в талых и вторично-мерзлых отложениях, а также следов последующих этапов промерзания и протаивания в верхних частях мерзлых толщ. Следы седиментационных, раннедиагенетических и криогенных процессов часто совмещены в одном и том же фрагменте геологической летописи. Поэтому при интерпретации литологических особенностей и элементов криогенного и посткриогенного строения отложений требуется использование разных признаков для определения динамики процессов седиментации осадков и условий среды их аккумуляции, типа промерзания и следов протаивания. С их помощью можно реконструировать последовательности синхронных или наложенных преобразований. При отсутствии обнажений со сходными образованиями в разрезе их интерпретация по керну скважин имеет вероятностный характер, поскольку нельзя получить полной морфологической характеристики и деталей строения криогенных и посткриогенных образований.

На Пур-Тазовском междуречье Западной Сибири выполнены криолитологические исследования отложений, направленные на изучение последствий стадийного изменения мерзлого и талого состояний верхней части криолитозоны. Авторский фактический материал позволил определить по керну скважины генезис, обстановку накопления и возраст отложений, с большей уверенностью выделить этапы и типы промерзания и протаивания толщи, выявить их связь с изменением природных условий в неоплейстоцене.

Район исследований входит в Харасавэй-Новоуренгойскую подзону континентальной геокриологической провинции Западно-Сибирской плиты со сплошным распространением мерзлых синкриогенных и эпикриогенных пород [Геокриология СССР, 1989]. Он расположен на северо-востоке Пур-Тазовского междуречья в 20 км от пос. Тазовский. Район относится к подзоне южной тундры в пределах равнины с абсолютными высотами поверхности от 10–16 до 35–60 м, со слабо-расчлененным рельефом и полигональным микро-рельефом на увалах (рис. 1). Равнина осложнена долинами рек, озерами и хасырями с полигональными торфяниками [Трофимов и др., 1987]. В рай-

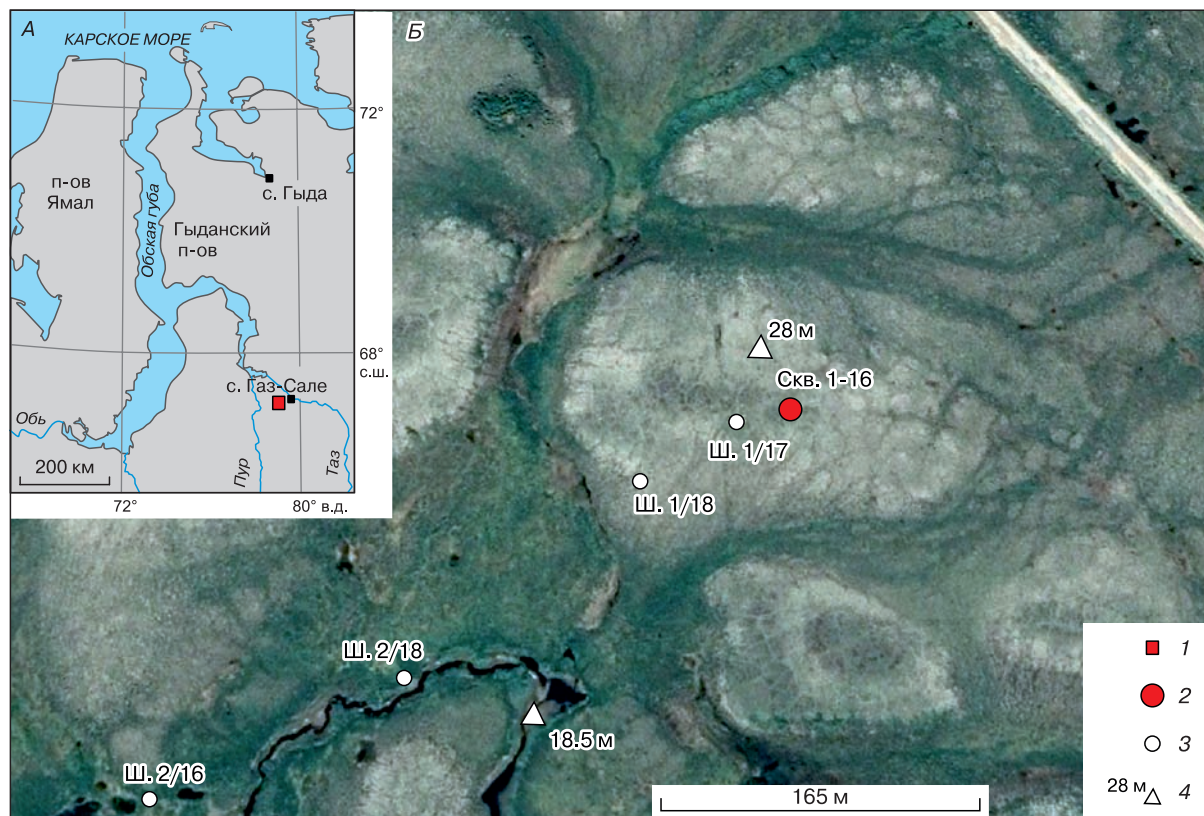


Рис. 1. Район исследований на северо-востоке Пур-Тазовского междуречья.

А – географическое положение; Б – схема расположения выработок на спутниковом снимке Google Earth, Landsat [2020]; 1 – участок исследований; 2 – скважина; 3 – шурфы; 4 – абсолютные отметки поверхности.

оне широко распространены полигонально-жильные льды в торфяниках, термокарстовые и термоэрозионные низины, многолетние бугры пучения, полигональный микрорельеф, пятна-медальоны [Васильчук, Васильчук, 2016; Тихонравова и др., 2020]. Свидетельствами эволюции криолитозоны в регионе являются изначально грунтовые жилы, одиночные и многоярусные псевдоморфозы по вытаявшим полигонально-жильным льдам вместе с полигональным рельефом. Псевдоморфозы залегают в талых и мерзлых эпикриогенных отложениях неоплейстоцена севера Западной Сибири [Шмелев, 1966; Зыкина и др., 2017]. Посткриогенные образования и микроморфология отложений, связанные с процессами криогенеза в толще Пур-Тазовского междуречья, малоизвестны.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследований послужили отложения, вскрытые скважиной 1-16, расположенной на высокой полигональной поверхности (абс. отметка 28 м) в бассейне левых притоков нижнего течения р. Таз. Скважина до глубины 8.8 м вскрыла неоплейстоценовые мерзлые пески и супеси температурой -3°C [Холматов и др., 2019], сезонноталые отложения в интервале 0–1.4 м. Шурфы 1/17, 1/18 на склоне с полигонами и многочисленными минеральными пятнами-медальонами (см. рис. 1, Б) вскрыли талые (до глубины 2.4 м) отложения [Slogoda et al., 2019]. Описание сводного разреза приведено в таблице и на рис. 2.

По керну скважины диаметром 94–59 мм изучено криогенное строение, определены весовая влажность, гранулометрический состав, содержание водорастворимых солей в отложениях и видовой состав растительных остатков. В ненарушенном мерзлом и оттаявшем керне зафиксированы седиментационные, криогенные и посткриогенные элементы строения отложений.

Гранулометрический состав 21 образца определен при помощи лазерного дифракционного анализатора размера частиц Mastersizer 3000 с обработкой ультразвуком [Курчатова, Рогов, 2014]. Минералогический состав, седиментационные и наложенные посткриогенные микротекстуры и деформации отложений, форма терригенных частиц и аутигенные минералы определены при помощи петрографического поляризационного микроскопа Olympus-BX53MTRF (7 шлифов), сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) TM3000 (Hitachi), совмещенного с рентгеноспектральным анализатором SwiftED3000 (Oxford) [Курчатова, Рогов, 2020].

Растительные остатки из отложений определены в препаратах под микроскопом по коллекции и атласам [Кац и др., 1977]. Возраст установлен в ЦКП “Лаборатория радиоуглеродного датирова-

ния и электронной микроскопии ИГ РАН” и центре изотопных исследований Университета Джорджии (США) [Reimer et al., 2013].

Эти методы анализа позволили выявить следы седиментационных, раннедиагенетических, почвенных, син- и эпикриогенных процессов промерзания, протаивания и выветривания в неоплейстоцене, поскольку для палеореконструкций использованы отдельные наборы литогенетических, фациальных [Романовский, 1977] и криолитологических признаков.

Известно, что стадийные изменения мерзлого и талого состояния отложений проявляются в виде разномасштабных синхронных или наложенных криогенных и посткриогенных образований [Романовский, 1993], которые сочетаются с литогенетическими и фациальными особенностями осадочной толщи. В данной работе для идентификации посткриогенных образований использованы признаки криогенеза в мерзлом и талом керне, в гранулометрическом, минералогическом составе и микростроении отложений.

Установлено [Зигерт, 1981; Конищев, Рогов, 1985; Зигерт, Слагода, 1990; Слагода, 2005; Рогов, 2009], что многократное промерзание–протаивание синкриогенных отложений приводит к деформациям седиментационной слоистости и частичному разрушению терригенных частиц, новообразованию минералов, агрегатных и кольцевых микротекstur, которые сохраняются после протаивания в виде посткриогенных образований разного размера. В эпикриогенных мерзлых отложениях присутствуют слоистые, решетчатые и наклонные ломаные криогенные текстуры, могут сохраняться первичные посткриогенные текстуры и раннедиагенетические элементы строения [Слагода и др., 2015]. Протаивание эпикриогенных отложений также приводит к смыканию пустот ото льда, образованию рисунка посткриогенных текстур за счет разрывов и смещений слоев, уплотнению блоков породы, ожелезнению и новообразованию минералов [Слагода и др., 2014; Slogoda, Kurchatova, 2008].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Строение верхней части мерзлых отложений равнины, соответствующей уровню III озерно-аллювиальной террасы на северо-востоке Пур-Тазовского междуречья, вместе с результатами аналитических исследований приведены на рис. 2, 3. Для определения динамических условий среды седиментации были использованы различные данные [Рейнек, Сингх, 1981]: результаты определения и обработки гранулометрического состава отложений, обобщенные на диаграмме Р. Пассеги (рис. 4, А), окатанность зерен, характеристики слоистости и присутствие размывов в разрезе. Со-

Таблица. Сводный разрез отложений Пур-Тазовского междуречья (скважина 1-16 и шурфы 1/17, 1/18)

Номер слоя	Глубина, м	Описание отложений
7	0.4–0.0	Частое переслаивание супеси и песка пылеватого с перемятой слоистостью, с линзовидно-сетчатой посткриогенной текстурой, с криотурбациями и современными корнями. Супеси и пески слагают внедрения и излияния на поверхность в минеральных пятнах-медальонах. В слое вскрыты два яруса смещенных вниз по склону пятен-медальонов и наклонные гумусовые жилки (в шурфах 1/17, 1/18). Между пятнами-медальонами на поверхности вскрыта почва – коричневая гумусированная супесь (до глубины 0.2 м) с корнями современных кустарничков, мхов, лишайников и гумусовыми жилками длиной до 0.5 м по вертикали. Отложения талые, влажность $W = 16–18\%$
6	2.0–0.4	Супеси серые с прослоями желтовато- и светло-серых пылеватых песков, с многочисленными точечными коричневыми пятнами по разложенным корням растений <i>in situ</i> . Слоистость волнистая, внизу – наклонная, параллельная наклонной неровной кровле подстилающего слоя, сверху нечеткая субгоризонтальная. Охристые и желтые соединения железа окрашивают мерзлые и оттаявшие отложения полосами, вертикальными потеками и крупными пятнами. Слойки толщиной 1–10 см имеют многочисленные перегибы, смещения, взаимовнедрения, разрывы и мелковолнистые границы. Кровля слоя неровная, осложнена внедрениями супеси вверх, окончаниями гумусовых жилок сверху. Отложения в скважине на глубине 0.4 м талые, ниже – мерзлые, криогенные текстуры массивные, сверху тонкие линзовидные, параллельные поверхности, $W = 36–40\%$. Отложения слоя на склоне талые до глубины 2.4 м (шурф 1/17)
5	4.25–2.0	Пески светло-серые, коричневатые и желтоватые, тонкие и мелкие пылеватые, внизу с примесью среднезернистых, сверху с прослоями супеси, с многочисленными разложенными корешками трав <i>in situ</i> , с горизонтальной, пологонаклонной тонкой, вертикальной и наклонной волнистой слоистостью, в мерзлом и оттаявшем состояниях с охристыми потеками и пятнами. Слоистость нарушена крупным затеком (более 1.1 м по вертикали, шириной ≥ 5 см), который проникает в нижележащий слой. Затек выполнен песком, супесью, охристыми соединениями железа, содержит многочисленные черные органожелезистые включения на боковых стенках (см. рис. 3). Тонкие слои мелковолнистые, плавным изогнуты вверх вдоль затека, пересечены сомкнутыми трещинами, осложнены взаимовнедрениями, перегибами и смещениями фрагментов вниз. Кровля резкая неровная, в керне осложнена мелкими (1.5–2.0 см) затеками из перекрывающих отложений. В кровле слоя в шурфе 1/17 на глубине 2 м вскрыт фрагмент крупной просадки шириной более 0.6 м, глубиной 0.4 м, сложенной крутонаклонными прослоями супеси и песка, с которой связаны понижения полигонального рельефа (см. рис. 1, Б). Криогенная текстура массивная, в нижней части с редкими волнистыми горизонтальными линзами льда толщиной 0.1–0.2 см, которые секут слоистость и деформации, $W = 18–22\%$; в верхней части – микролинзовидная, параллельная поверхности, $W = 31\%$
4	5.05–4.25	Супеси табачно-серые (см. рис. 2), содержат присыпки, гнезда, затеки светлых пылеватых тонких песков, сверху коричневатые суглинки содержат включения разложенного растительного детрита, неравномерно окрашены охристыми пятнами. Супесь внизу разбита затеками песка на прямоугольные и плитчатые блоки размером до 4 см; выше – на мелкие блоки размером 1.0–1.5 см, а затеки и смещения слоёв образуют ячеистую текстуру. Кровля размытая, резкая, наклонная, осложнена крупными затеками высотой 7–10 см. Криогенная текстура массивная и линзовидно-ломаная наклонная, секущая. Супесь со льдом-цементом имеет влажность $W = 24–27\%$, со шлирами льда – 54%
3	6.65–5.05	Переслаивание песка светлого пылеватого тонкого, супеси зеленоватой оторфованной и суглинка голубовато-серого. Отложения в мерзлом и оттаявшем состояниях с многочисленными сизыми пятнами по корешкам трав <i>in situ</i> , с охристыми потеками и полосами на контактах слоёв разного состава. Слоистость тонкая, частая, горизонтальная и наклонная параллельная и срезающая, осложнена вертикальными и наклонно-волнистыми затеками сверху высотой более 10 см. В слое, по отдельным фрагментам керна, выделен крупный затек в интервале глубин 5.5–6.2 м. Слойки отличаются мелковолнистыми, фестончатыми контактами, многочисленными разрывами и смещениями блоков размером 0.5×1.5 см внизу слоя и 2×4 см сверху (см. рис. 3). Отложения содержат вкрапления голубого вивианита размером 0.1 см, намытый коричневый детрит с остатками кустарничков, листьями и веточками мха <i>Drepanocladus</i> sp. с радиоуглеродной датировкой $45\,205 \pm 400$ лет назад ($5827\text{ IGRAN}_{\text{AMS}}$). Криогенная текстура массивная и линзовидно-ломаная наклонная, секущая и унаследованная; линзы внизу слоя тонкие, толщиной < 0.1 см, выше – от 0.2–0.4 до 1.0–1.5 см, $W = 21–23\%$. Кровля слоя в мерзлом состоянии замаскирована шлирами льда, проведена по смене цвета оттаявших пород и более тонкодисперсному составу перекрывающих отложений
2	7.0–6.65	Супеси, пески тонкие и суглинки серые и темно-серые с частой тонкой и средней наклонной седиментационной слоистостью; слои разбиты редкими затеками и наклонными разрывами на уплощенные блоки размером 1.0×2.5 и 3×4 см. Они включают многочисленные черные пятна оглеения по нитевидным корешкам <i>in situ</i> , голубые точечные включения вивианита и линзы намытого разложенного растительного детрита. Криогенная текстура массивная, $W = 29\%$. Кровля размытая, резкая, неровная с затеками охристого песка
1	8.8–7.0	Пески серые и сизые, мелкие с разнонаправленной параллельной и срезающей наклонной седиментационной слоистостью, остроугольными кусочками глин (1 см), с тонкой (≤ 1 мм) косой слоистостью мелкой ряби из намытого коричневого растительного детрита (см. рис. 2). Содержит остатки пушицы, кустарничков и целых зеленых мхов родов <i>Drepanocladus</i> sp., <i>Calliergon</i> sp. и <i>Brachythecium</i> sp. с радиоуглеродной датировкой $49\,110 \pm 610$ лет назад ($5828\text{ IGRAN}_{\text{AMS}}$). Криогенная текстура массивная, $W = 21–28\%$. Кровля слоя ровная, пологонаклонная

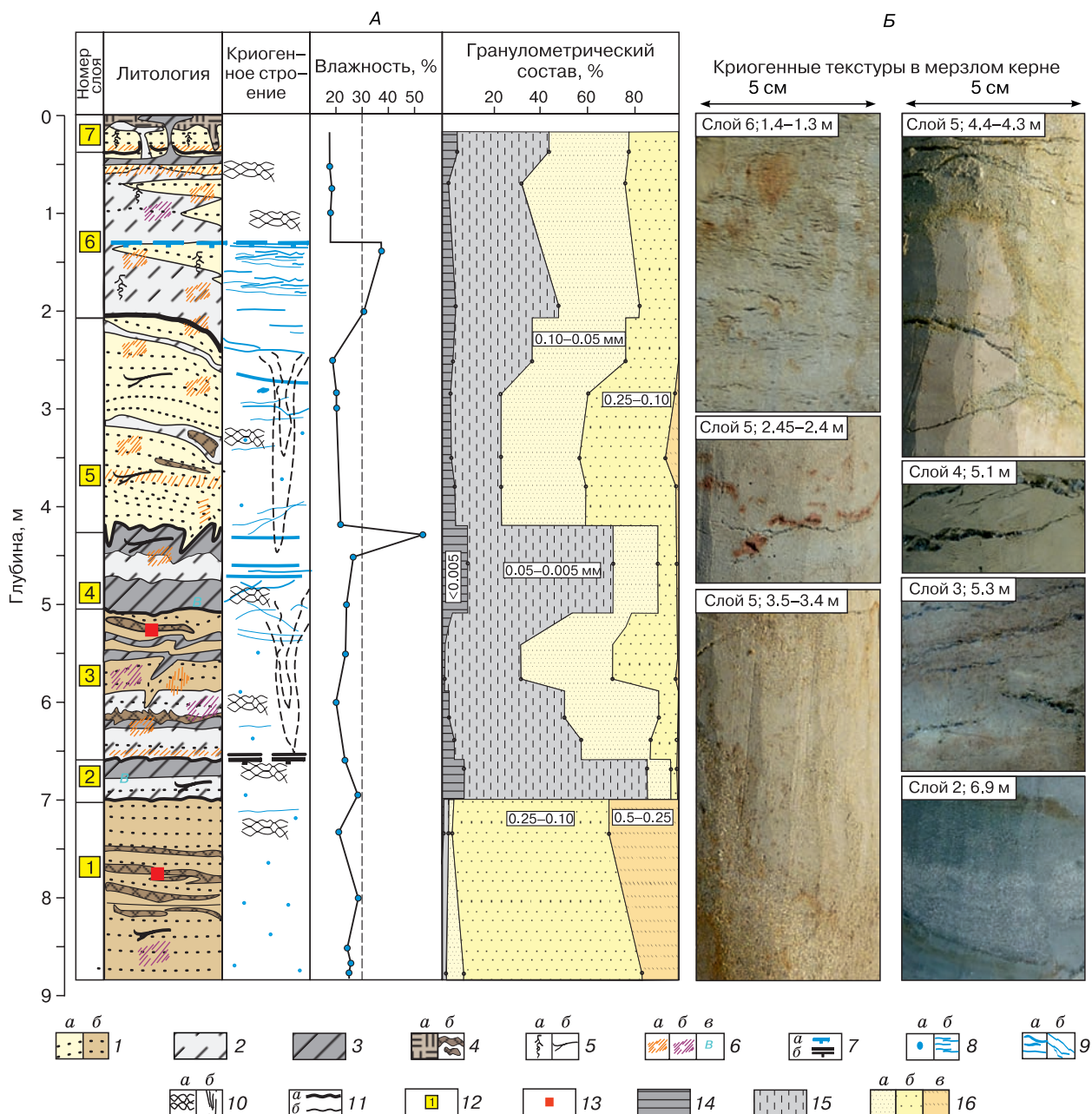


Рис. 2. Криолитологическое строение III озерно-аллювиальной равнины Пур-Тазовского междуречья в скважине 1-16 (А), дополненное данными по шурфам 1/17 и 1/18; криогенные текстуры в мерзлом керне (Б).

Черный цвет на фотографиях – лед. 1 – пески желтоватые (а), серые (б); 2 – супесь; 3 – суглинок; 4 – торф автохтонный (а), намытый синхронно произраставший (б); 5 – корни трав *in situ* (а), детрит намытый (б); 6 – пятна, полосы охристые (а), сизые (б), вивианит (в); 7 – кровля многолетнемерзлых отложений (а), подошва реликтового талика (б); криогенные текстуры: 8 – массивная (а), микро- и тонколинзовидная (б); 9 – слоистая линзовидная (а), наклонная линзовидно-ломаная (б); 10 – посткриогенные текстуры (а), псевдоморфозы (б); 11 – границы размыва (а), слоев (б); 12 – номер слоя; 13 – места отбора проб на радиоуглеродный возраст. Гранулометрические фракции (мм): 14 – глинистая, 15 – алевритовые, 16 – песчаные: пески тонкие (а), мелкие (б), средние (в).

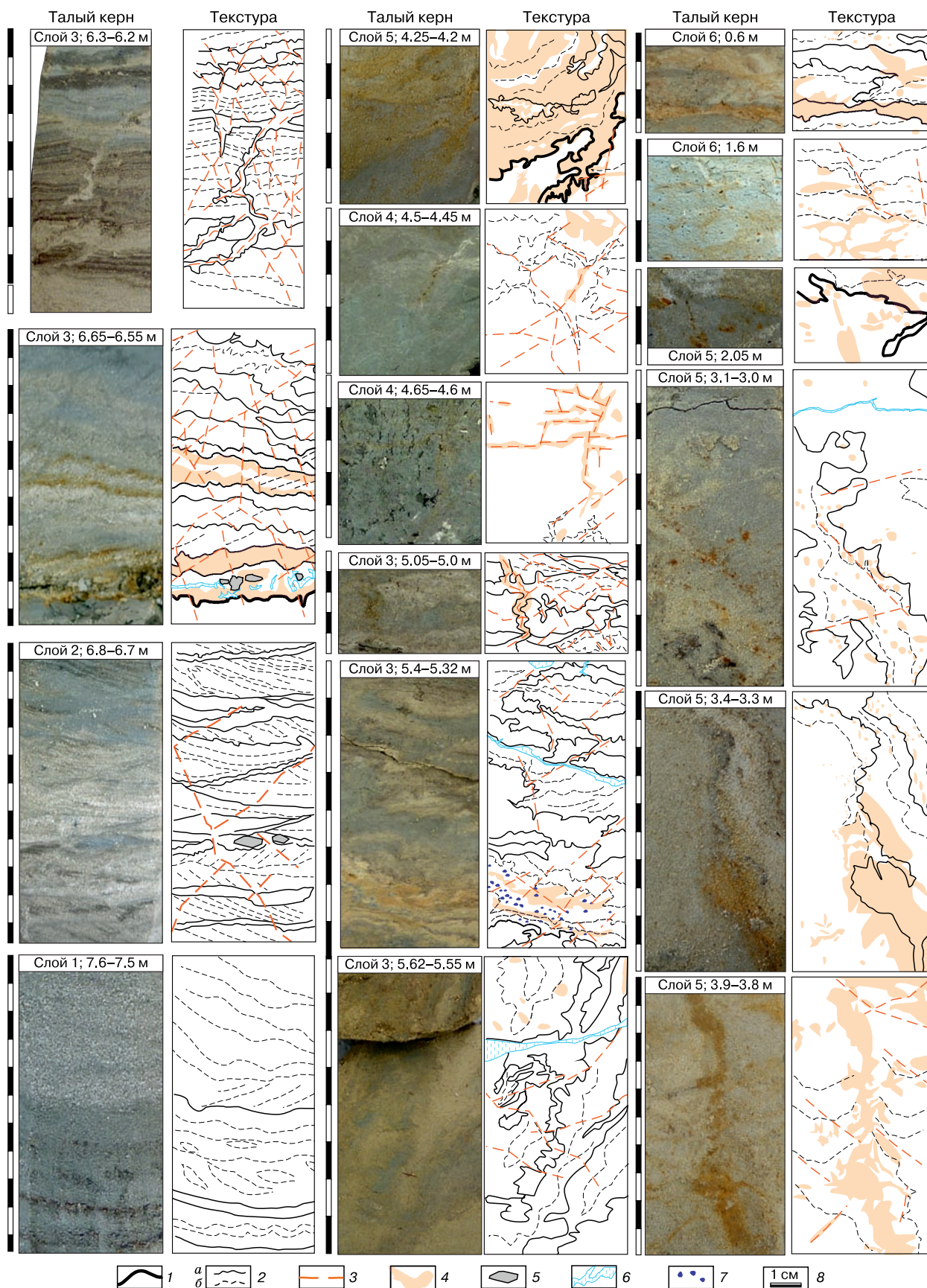


Рис. 3. Макротекстуры и деформации в оттаявшем керне отложений скважины 1-16.

1 – границы размыва между слоями; 2 – границы литологические резкие (а), постепенные (б); 3 – зоны сдвигов, смещений фрагментов и разрывов слоев по сомкнутым и заполненным пустотам; 4 – охристые пятна; 5 – угловатые окатыши глин; 6 – пустоты от вытаявших шпиров льда; 7 – вивианит; 8 – масштаб: 1 деление = 1 см.

став водорастворимых солей и растительных остатков был использован для обоснования фациальных обстановок аккумуляции отложений.

Отложения слоев 1–3, с учетом седиментационной слоистости, мелкой волновой ряби и намытого детрита, повышенного содержания среднезернистых частиц внизу и тонкодисперсных сверху, уменьшения медианного размера частиц M_d от 0.215 до 0.04–0.02 мм, увеличения коэффициента сортировки So от 1.2–1.3 до 1.6–1.7 снизу вверх по разрезу, по положению проб на динамической диаграмме (см. рис. 4, А) отнесены к области осадков постоянного водотока со средней и низкой интенсивностью, вероятно, постепенно мелевшего. Отложения не засолены – сумма легкорастворимых солей равна 88–258 мг/кг (или 0.01–0.03 %). Состав водорастворимых солей хлоридно-гидрокарбонатно-сульфатный и сульфатно-хлоридно-гидрокарбонатный магниевый-кальциевый. Судя по составу водорастворимых солей и набору растительных остатков, в том числе мхов (см. таблицу), произраставших в болотах, торфяниках и на старых деревьях, эти слои формировались в континентальной обстановке, вероятно, в лесотундре или северной тайге. Слой 3 отличается от подстилающих слоев деформациями слоистости, круп-

ным затеком, преобладанием остроугольных, со свежими сколами, обломочных частиц (см. рис. 4, Б) и охристой окраской в мерзлом состоянии за счет гидроокислов железа. Отложения слоев 1–3, накопившихся 49–45 тыс. лет назад, отнесены к первой половине каргинского периода.

Отложения слоя 4 обладают невыдержанной по простираению нарушенной седиментационной слоистостью, тонкодисперсным составом ($M_d = 0.031$ мм) и большим коэффициентом сортировки ($So = 2.1$). На динамической диаграмме его проба расположена в зоне однородных суспензий, что позволяет отнести его к осадкам водоема (предположительно озера) со слабопроточным режимом.

Слои 5 и 6 сложены пылеватými песками ($M_d = 0.064$ – 0.099 мм, соответственно So от 1.7–1.9 до 1.9–2.2), с нарушенной седиментационной слоистостью. На динамической диаграмме (см. рис. 4, А) пробы пород расположены в зонах однородных и градиционных суспензий, что соответствует областям временных плоскостных и постоянных потоков низкой интенсивности на склонах.

Слой 7 сложен песками и супесями ($M_d = 0.074$ – 0.08 мм, $So = 1.9$ – 2.3), переработанными многочисленными криотурбациями и корнями растений, относится к сезонноталому слою (СТС).

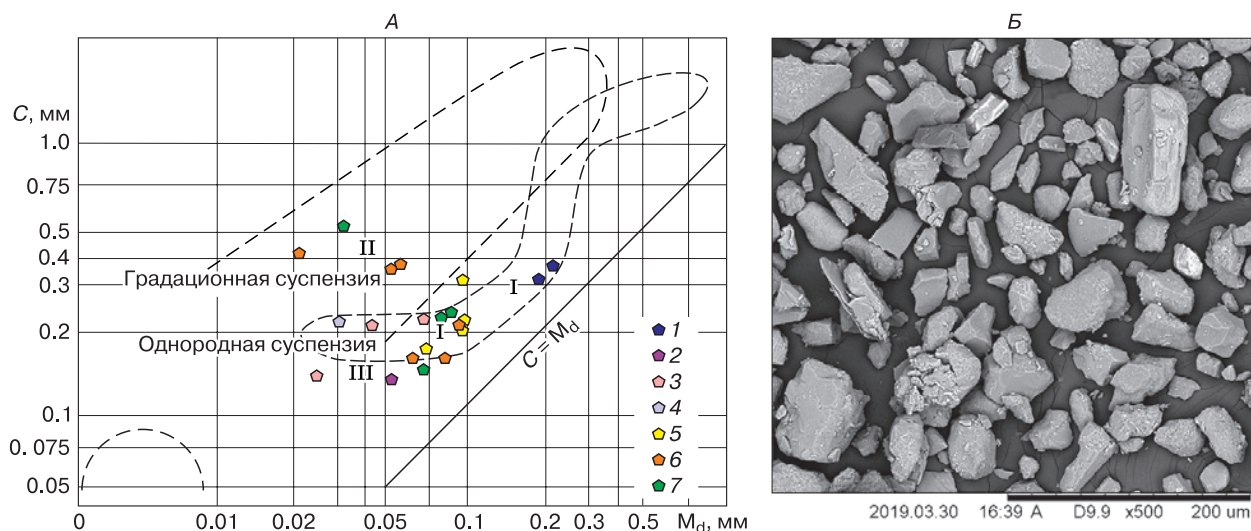


Рис. 4. Динамическая диаграмма Р. Пассега [Рейнек, Сингх, 1981], литогенетические типы отложений равнины, соответствующей уровню III озерно-аллювиальной террасы Пур-Тазовского междуречья (А) и окатанность обломочных частиц слоя 3 (глубина 6.4 м) (Б).

M_d – медиана (50%-го содержания); C – максимальный диаметр (99%-го содержания); I – осадки постоянных водотоков, аллювиальные русловые и пойменные осадки (слои 1–3); II – осадки субаэральных дельт, пролувий, делювий временных распластанных водотоков (слои 5–7); III – осадки проточных водоемов (слой 4). Фигуративные точки отложений скв. 1-16 и шурфа: 1 – слой 1; 2 – слой 2; 3 – слой 3; 4 – слой 4; 5 – слой 5; 6 – слой 6; 7 – слой 7.

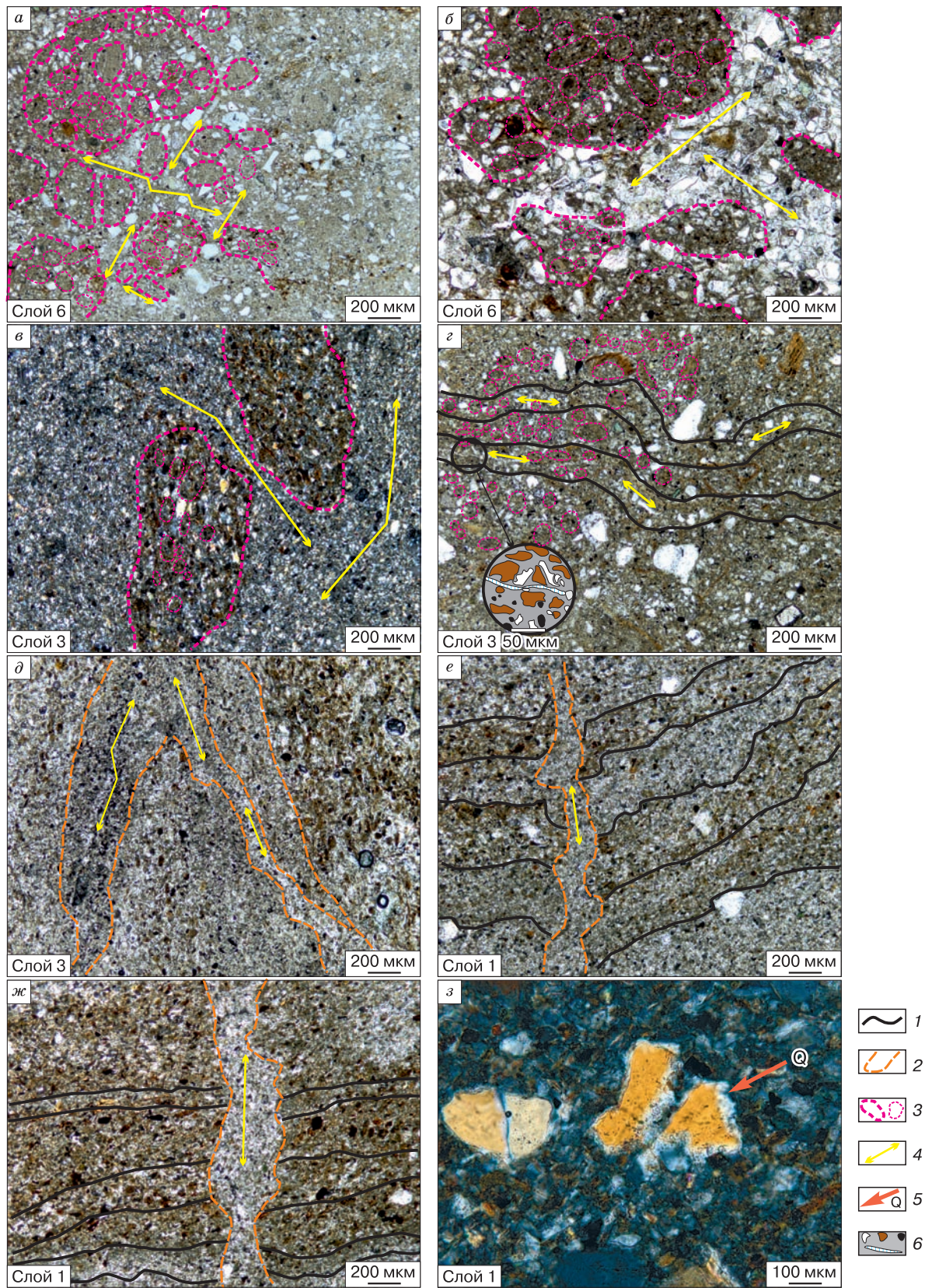


Рис. 5. Микростроение отложений скважины 1-16 на фотографиях шлифов в проходящем свете (а, б, г, д–ж) и поляризованном свете (в, з).

1 – границы слоев; 2 – границы микротекстур, затеков; 3 – контуры сложных агрегатов; 4 – предполагаемые направления движения талых вод и смещения компонентов пород; 5 – кварц (Q), растрескавшийся на месте; 6 – соотношение обломков, агрегатов, органических соединений и пустоты на врезке (з).

В разрезе отложений, на основании указанных особенностей, выделены следующие литогенетические типы: слои 1 и 2 отнесены к русловому аллювию, слой 3 с деформированной седиментационной слоистостью – к пойменному аллювию, слой 4 – к осадкам проточного водоема или водотока с застойным режимом, слои 5, 6, 7 – к делювиальным (плоскостной смыв) и пролювиальным осадкам временных распластывающихся потоков низкой интенсивности, субаэральных дельт.

Отложения всего разреза по минералогическому составу отнесены к полевошпатов кварцевым. В отложениях присутствуют биотит, мусковит, эпидот-цоизит, турмалин, лейкоксен, переотложенный зеленый глауконит, углистые частицы, обломки диатомовых водорослей и спикул губок. Терригенные компоненты могли поступать при размыве юрских, меловых и палеогеновых пород, в том числе морских четвертичных отложений этого региона.

Обломки кварца в слоях 1 и 2 в основном угловато-окатанные, редко растрескавшиеся на месте залегания. В слоях 3–7 преобладают остроугольные и угловато-окатанные обломки, трещиноватые и со следами растворения и регенерации. Тонкодисперсная масса отложений представлена смесью глинистых минералов: иллита, хлорита, смешанно-слоистых агрегатов с примесью кремнистых и органических остатков (рис. 5, а–ж; рис. 6, а). Обломочные компоненты и микроагрегаты покрыты тонкими прерывистыми пленками глинистых минералов (см. рис. 6, б, г). Эти особенности состава отложений связаны с постседиментационными преобразованиями толщи.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты о литогенетических и фациальных особенностях изученной осадочной толщи позволили выявить разномасштабные криогенные и посткриогенные образования и определить их синхронный или наложенный характер. Увеличение содержания пылевой фракции и преобладание остроугольных обломочных частиц в пойменных, озерных и делювиально-пролювиальных отложениях в основном обусловлено интенсивным криогенным дроблением в условиях сингенетического промерзания. В разрезе отложений выявлены протаивавшие на месте и впоследствии промерзшие отложения, для которых характерны криогенные наложенные, первичные

посткриогенные текстуры и другие особенности. Среди них выделены:

1) посткриогенные макротекстуры (соответствующие первому этапу промерзания–протаивания: блоковые, сетчатые, комковатые отдельности, подчеркнутые оксидами железа), а также выявленные в шлифах сложные многопорядковые агрегатные и кольцевые микротекстуры, трещиноватость и оскольчатая форма обломочных зерен;

2) плавные и резкие (вероятно, по трещинам) смещения фрагментов слоев относительно друг друга (связанные в основном с протаиванием и раннедиагенетическим преобразованием отложений в талом состоянии), разрывы, затеки и заполнение пустот осадками из вышележащих отложений, деформации седиментационной слоистости (возникшие при просадках отложений), а также волнистые, фестончатые границы слоев (за счет уплотнения многопорядковых агрегатов);

3) криогенные текстуры, соответствующие последнему этапу промерзания: включения льда и пустоты от их вытаивания в керне.

Русловые отложения водотока (слои 1 и 2) отличаются сизо-серой окраской песков, связанной с восстановительными условиями и повышенной влажностью. Снизу вверх в разрезе этих слоев, особенно в прослоях алевритовых песков с растительным детритом, увеличивается частота мелких нарушений слоистой макротекстуры в виде трещин, сдвигов и смятия мелкой ряби (см. рис. 3). В микростроении отложений выражены вертикальные разрывы тонких прослоев без смещения, обогащение зон разрывов обломочными частицами из вышележащих слоев и обеднение глинистыми частицами, вероятно, при оттаивании включений льда. Накопление осадков сопровождалось растрескиванием кварцевых зерен на месте их залегания, что связано с процессами циклического промерзания–протаивания (см. рис. 5, ж).

Аутигенные минералы в этих слоях представлены карбонатами, в основном высокомагнезиальным кальцитом и сидеритом. Высокомагнезиальный кальцит образует плотные микрокристаллические сферические агрегаты, нередко с примесью алюмосиликатных минералов, с реликтами высокоуглеродистых биопленок (см. рис. 6, в, ж). Подобные агрегаты могли формироваться в результате минерализации внеклеточного полисахаридного вещества (EPS – extracellular polysaccharide sub-

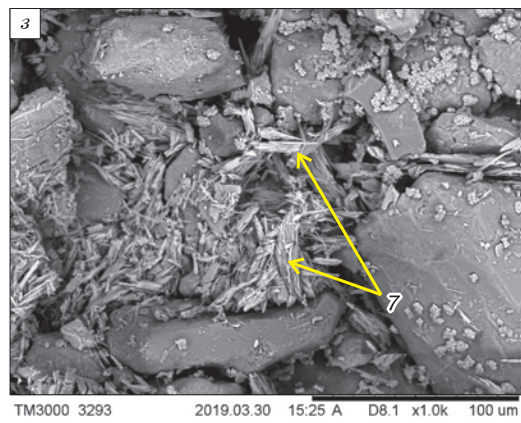
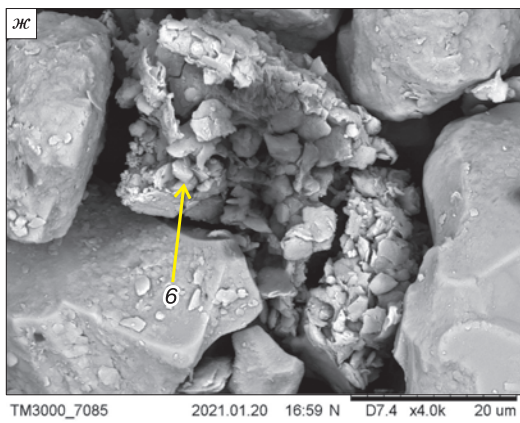
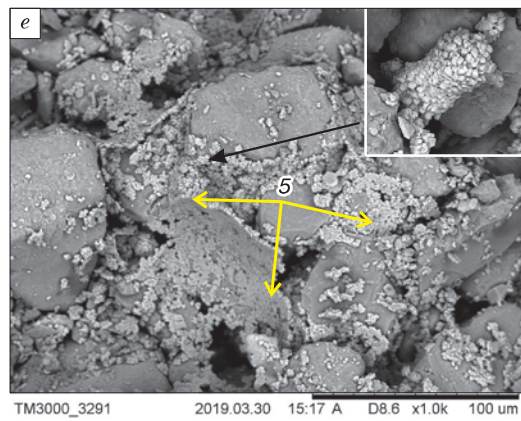
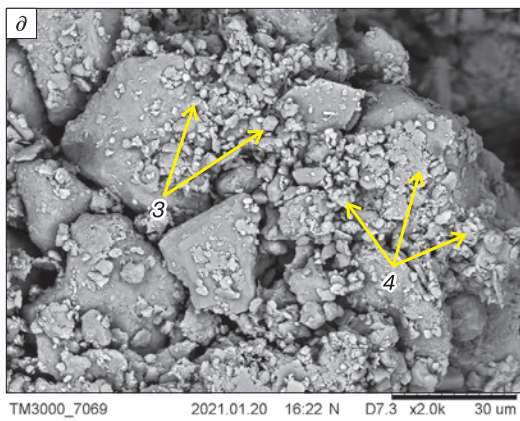
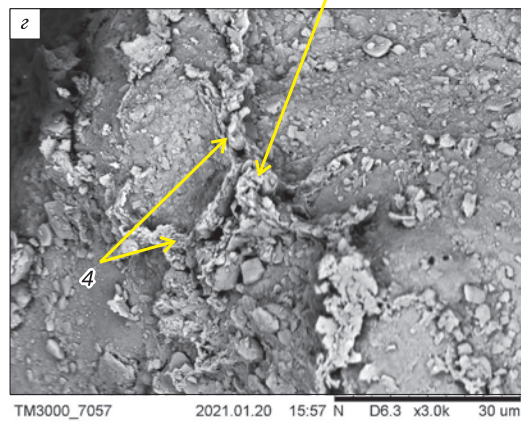
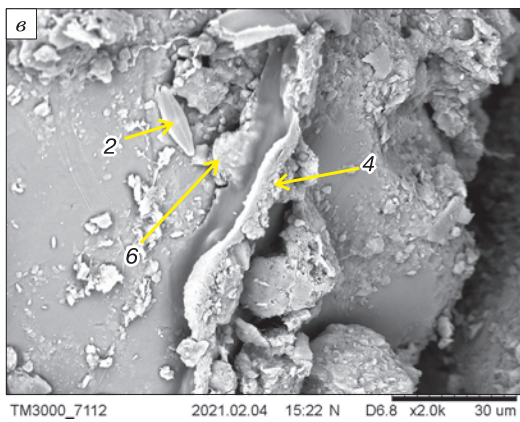
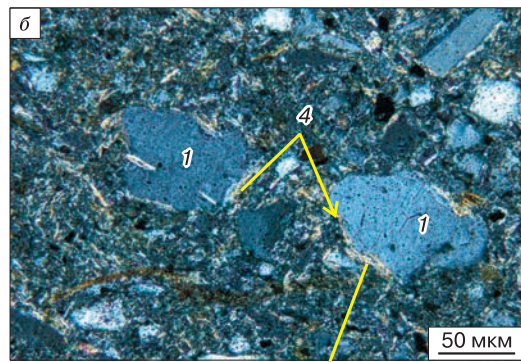
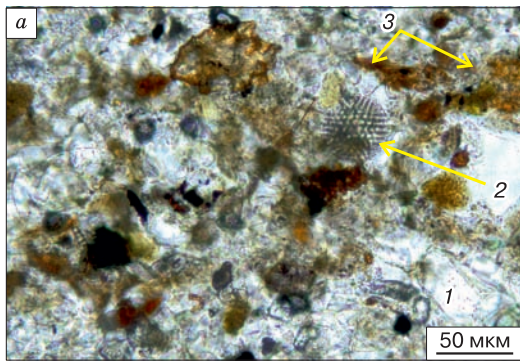


Рис. 6. Аутигенные минералы в отложениях скважины 1-16 в шлифах в проходящем (а) и поляризованном (б) свете; в сканирующем электронном микроскопе (в-з):

стяжения пелитоморфного сидерита по растительным остаткам, обломки скелетов диатомовых водорослей (а, слой 1); прерывистые пленки аутигенных глинистых минералов на кварцевых зернах (б, слой 3; з, слой 1); микростяжения доломита и алюмосиликатов на высокоуглеродистых органических пленках (в, слой 3); ассоциация ромбических микрокристаллов сидерита и глинистых минералов (д, слой 6); стяжения расщепленных сноповидных микрокристаллов железистого родохрита (е, слой 3); фрагмент сферического агрегата доломита (ж, слой 6); игольчатые шестоватые микрокристаллы вивианита (з, слой 3). 1 – кварц; 2 – раковины диатомовых водорослей; 3 – сидерит; 4 – глинистые минералы; 5 – родохрозит; 6 – доломит; 7 – вивианит.

stance), являющегося одним из продуктов метаболизма бактериальных колоний и водорослей [Trichet et al., 2001; Obst et al., 2009]. Сидерит присутствует в виде пелитоморфных микростяжений, в основном в смеси с аутигенными глинистыми минералами, развивавшимися по разлагающимся органическим остаткам или сильногидратированному слюдистому материалу (см. рис. 6, д) [Ruban et al., 2020; Raudina et al., 2021].

Нарушения макро- и микротекстуры аллювиальных отложений в слое 2 образуют прерывистый сетчатый рисунок по вытянувшим шлям ледя, поэтому они отнесены к посткриогенным. Сохранность свежих растительных остатков мхов обычно связана с быстрым переходом в мерзлое состояние, а вышеуказанные аутигенные минералы, элементарные округлые глинистые агрегаты, сульфатный состав водорастворимых солей и сильная окраска, характерная для восстановительных условий в талике, вероятно, обусловлены вторичным эпигенетическим промерзанием руслового аллювия.

Пойменный аллювий (слой 3) включает крупный затек вертикальной протяженностью около 0.7 м, имеет сетчатый рисунок трещин, секущих и смещающих слои, т. е. обладает как блочной макротекстурой (см. рис. 3), так и соответствующими многопорядковыми сложными агрегатными и кольцевыми микротекстурами из минеральных частиц и глинистой массы, а также перекрестной ориентацией тонких пленок слюд. В затеке отмечены вертикально вытянутые линзовидные агрегаты (см. рис. 5, в, д). В тонких прослоях и полостях, заполненных обломочными частицами при вытаивании ледяных шлиров, отмечены микропустоты с корочками из глинистых микроагрегатов на стенках (см. рис. 5, з, д).

Аутигенные минералы представлены в основном вивианитом и родохрозитом в прослоях, обогащенных растительными остатками. Вивианит с примесью марганца слагает тонкоигольчатые продолговатые микроагрегаты и цементирует прилегающие обломки (см. рис. 6, з). Железистый родохрозит образует массивные, сноповидные агрегаты и корки из микрокристаллов, покрывающие обломки (см. рис. 6, е). Судя по формам и расположению агрегатов родохрита, он был образован

при кристаллизации бактериальных полисахаридных пленок, выполнявших роль субстрата и катализатора выпадения минеральных веществ в осадок [Леонова и др., 2017].

Вышеописанные посткриогенные макро- и микротекстуры являются реликтами криогенной текстуры и повторно-жильного льдообразования, возникшими в процессе сингенетического промерзания пойменных аллювиальных отложений. Они образовались после протаивания мерзлых отложений, в результате чего по повторно-жильным льдам возникли псевдоморфозы, фрагменты которых выражены в керне как крупные затеки. Протаивание и проседание толщи на месте сопровождалось деформациями слоистости, макро- и микротекстур. С преобразованием оттаявших отложений и биогенной активностью связаны комплекс аутигенных минералов и охристая окраска. Криогенные текстуры и низкая влажность слоя связаны с последующим эпигенетическим промерзанием.

Отложения водоема (слой 4), тонкодисперсные без выраженной седиментационной слоистости и с многочисленными остатками диатомовых, перекрывают пойменный аллювий. Вероятно, во время накопления осадков водоема существовал талик и протаяли частично размывшие пойменные отложения слоя 3. После осушения водоема в его промерзших отложениях образовалась решетчатая (блоковая) криогенная текстура. Размеры сохранившихся блоков посткриогенной текстуры увеличиваются сверху вниз, что свидетельствует об эпигенетическом типе промерзания отложений. Макротекстуры, подчеркнутые песчаными затеками и окисными соединениями железа между блоками тонкодисперсных отложений (см. рис. 3), посткриогенные, так как были образованы на этапе протаивания, а в талых отложениях при разложении органики сформировались агрегаты вивианита. Линзовидно-ломаные криотекстуры слоя 4 связаны с последующим эпигенетическим промерзанием.

Делювиально-пролювиальные отложения (слой 5) отличаются крупным (более 1.1 м) затеком, стенки которого цементируются соединениями железа. На контакте с нижней частью затека седиментационная слоистость слабо изогнута

вверх (см. рис. 2). Такие соотношения характерны для вмещающих пород с сингенетическими ледяными жилами и псевдоморфозами [Шмелев, 1966]. В песках присутствуют многочисленные плотные стяжения размером 0,5–1,0 см окислов железа и железоорганических соединений (см. рис. 2, 3), отмечена линзовидно-сетчатая макротекстура, подчеркнутая потеками окислов железа от вытаявших шлиров льда. Фестончатые волнистые границы слоев, вероятно, были образованы при уплотнении отложений со сложными многопорядковыми микротекстурами.

Вышеперечисленные нарушения слоистости, строение затека и его соотношения с вмещающими отложениями могут быть связаны с этапом накопления, сингенетического промерзания и роста ледяной жилы в делювиально-пролювиальных отложениях. На этапе протаивания этого слоя были сформированы псевдоморфозы и посткриогенные текстуры вмещающих пород, а также образован комплекс аутигенных соединений железа, характерный для аэрируемых условий. Криогенные текстуры и низкая влажность слоя связаны с последующим эпигенетическим промерзанием дренированной толщи.

Делювиальные отложения (слой 6) имеют высокое содержание алевритовых частиц, в мерзлом и оттаявшем состоянии окрашены в желтый и оранжевый цвета. Они обладают блочной и ячеистой макротекстурой, подчеркнутой пересекающимися полосами окислов железа, фестончатыми границами и смещениями слоев по трещинам от вытаявания шлиров льда (см. рис. 2, глубина 1,3 м; рис. 3, глубина 1,6 м). Этим особенностям соответствует неоднородная микротекстура: крупные разрозненные сложные многопорядковые агрегаты, обогащенные алевритоглинистым материалом и разделенные мелкими затеками песчаных и алевритовых частиц; многочисленные мелкие сложные агрегаты, окруженные алевритовыми частицами, а также элементарные глинистые микроагрегаты (см. рис. 5, а, б). Аутигенные минералы в делювиальных отложениях представлены в основном оксидами железа, реже – пелитоморфным сидеритом по разложенным растительным остаткам (см. рис. 6, а). Оксиды железа в смеси с алюмосиликатами образуют тонкие прерывистые пленки на обломках и простых микроагрегатах (см. рис. 6, б, в).

Вышеописанные макро- и микротекстуры, по-видимому, были образованы на этапе сингенетического промерзания делювиальных отложений. Несмотря на то что в керне скважины крупные затеки в этом слое не выявлены, в подошве слоя 6 шурфом вскрыта часть просадки, вероятно, над вытаявшей жилой, что соответствует полигональному рельефу поверхности. Деформации слоис-

тости, посткриогенные макро- и микротекстуры, аутигенные минералы, характерные для аэрируемых условий, были сформированы на этапе протаивания слоя 6.

Сезонноталый слой 7 отличается многочисленными криотурбациями, охристой окраской и посткриогенной линзовидно-сетчатой макротекстурой в виде смещений слоев по сомкнутым трещинам (см. рис. 3, глубина 0,6 м). Прослой с перегибами, смещениями и фестончатыми границами сформировались при уплотнении супеси с многопорядковой агрегатной микротекстурой при таянии шлиров льда при циклическом промерзании–протаивании в СТС.

Известно, что стадийные изменения мерзлого и талого состояния отложений проявляются в виде сочетаний разномасштабных макро- и микротекстур, деформаций, новообразований [Ершов, 1988]. Проведенные исследования позволили на основе разных групп литологических признаков определить генезис и обстановку накопления осадков, выявить следы постседиментационных процессов. Сочетания криогенных, но преобразованных в посткриогенные в результате вытаявания шлиров льда, макро- и микротекстур, деформации седиментационной слоистости, в том числе крупные затеки с вертикально-волнистой слоистостью, которые, вероятно, можно отнести к псевдоморфозам, трещиноватость и остроугольность кварца были обусловлены синкриогенным типом промерзания отложений. Системы грунтовых жил (псевдоморфоз размером до 1,2 м по вертикали) были вскрыты в 2021 г. на III озерно-аллювиальной террасе в карьере (в каргинских пойменных отложениях) и в обнажении берега р. Таз (в делювиально-пролювиальных песках). Это подтверждает интерпретацию крупных затеков в керне скважины как псевдоморфоз.

Некоторые постседиментационные изменения (посткриогенные текстуры, затеки и деформации) являются результатом протаивания и проседания толщи. Присутствующий в ней комплекс аутигенных минералов и разложение органических остатков за счет микробиологической активности обусловлены наложенными раннедиагенетическими процессами в протаявших отложениях. Охристая окраска отложений за счет новообразования оксидов и карбонатов железа связана с окислительными условиями в аэрируемых талых увлажненных отложениях. Современные криогенные текстуры мерзлых отложений наложены на талые отложения на последнем этапе эпигенетического промерзания верхнеоплеистоценовых отложений, за исключением СТС.

Исходя из изложенного, можно предположить, что полигональный рельеф поверхности соответствует крупным псевдоморфозам в делюви-

ально-солифлюкционных отложениях слоя 5 и является спроецированным или унаследованным, т. е. реликтовым. Полигоны смещены и вытянуты по склонам, как и верхние части псевдоморфоз, оползавшие вниз при смещении массива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявленные особенности криогенного и посткриогенного макро- и микростроения изученных отложений позволили определить стадийные изменения мерзлого, талого состояния массива и установить типы промерзания нижнекаргинских русловых, пойменных, озерных отложений и, предположительно, каргинско-сартанских пролювиальных и делювиальных голоценовых отложений.

Построена следующая модель стадийного изменения мерзлого и талого состояния отложений изученного разреза, характерного для водоразделов Пур-Тазовского междуречья.

1. Нижнекаргинские русловые осадки при обмелении водотока могли испытывать воздействие сезонного промерзания–протаивания, на которое указывает растрескивание зерен кварца, а затем эпигенетически промерзли в верхней части талика и не протаивали до настоящего времени.

2. Нижнекаргинские пойменные синкриогенные отложения, вероятно, содержали ледяные жилы, и их верхняя часть была частично размыта, а нижняя часть протаивала и проседала в талике под водоемом с образованием крупных затеков, которые позже эпигенетически промерзли.

3. Отложения водоема были изначально немёрзлыми, а по рисунку посткриогенных текстур они в первый раз промерзли эпигенетически сверху, вероятно, после осушения. Позднее они протаивали вместе с перекрывающими слоями, на следующем этапе снова эпигенетически промерзли.

4. Делювиально-пролювиальные отложения накапливались в условиях сингенетического промерзания в субэвальной обстановке, предположительно, в холодные этапы каргинско-сартанского времени. Они включают посткриогенные образования и крупные псевдоморфозы – свидетельства протаивания и проседания, вероятно, в конце сартанского времени или в голоцене. Позднее они эпигенетически промерзли.

5. В целом верхняя часть разреза отложений равнины, соответствующей уровню III озерно-аллювиальной террасы Пур-Тазовского междуречья, сложена полигенетической толщей, судя по режимам накопления осадков и по типам промерзания отложений. Она протаивала не менее двух раз: сначала под водоемом, возможно, в позднекаргинское время, второй раз, вероятно, в голоценовый оптимум. Эпигенетическое промерзание произошло при похолодании в позднем голоцене.

Благодарности. Работа выполнена по госзаданию № 121041600042-7. Использовано оборудование ЦКП “Биокосные системы криосферы” Тюменского научного центра СО РАН. Новосёлов А.А. выражает благодарность Министерству науки и высшего образования Российской Федерации за поддержку госзадания № 121041600042-7, проект FEWZ-2020-0007.

Литература

- Васильчук Ю.К., Васильчук А.К.** Мощные полигональные торфяники в зоне сплошного распространения многолетне-мерзлых пород Западной Сибири // Криосфера Земли, 2016, т. XX, № 4, с. 3–15.
- Геокриология СССР.** Т. 2. Западная Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Недра, 1989, 454 с.
- Ершов Э.Д.** Микростроение мерзлых пород. М., Изд-во Моск. ун-та, 1988, 182 с.
- 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.
- Зыкина В.С., Зыкин В.С., Вольвах А.О. и др.** Строение, криогенные образования и условия формирования верхне-четвертичных отложений Надымского Приобья // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 6, с. 14–25.
- Кац Н.Я.** Атлас растительных остатков в торфах / Н.Я. Кац, С.В. Кац, Е.И. Скобеева. М., Недра, 1977, 376 с.
- Конищев В.Н.** Методы криолитологических исследований / В.Н. Конищев, В.В. Рогов. М., Изд-во Моск. ун-та, 1985, 185 с.
- Курчатова А.Н.** Методы электронной микроскопии в геокриологии: уч.-метод. пособие / А.Н. Курчатова, В.В. Рогов. М.; Тюмень, МГУ; ТИУ, 2020, 134 с.
- Курчатова А.Н., Рогов В.В.** Новые методы и подходы к изучению гранулометрического и морфологического состава криогенных грунтов // Инж. изыскания, 2014, № 5–6, с. 58–63.
- Леонова Л.В., Кузьмина Л.Ю., Рябова А.С. и др.** Экспериментальное осаждение Mg-содержащих биокarbonатов в лабораторных условиях // Минералогия техногенеза. Мисс, Ин-т минералогии УрО РАН, 2017, № 16, с. 200–207.
- Рейнек Г.Э.** Обстановки терригенного осадконакопления / Г.Э. Рейнек, И.Б. Сингх. М., Недра, 1981, 439 с.
- Рогов В.В.** Основы криогенеза. Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2009, 208 с.
- Романовский Н.Н.** Основы криогенеза криосферы. М., Изд-во Моск. ун-та, 1993, 335 с.
- Романовский С.И.** Седиментологические основы литологии. Л., Недра, 1977, 408 с.
- 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., Крылов А.В., Попов К.А. и др.** Криолитологическое строение отложений острова Хейса архипелага Земля Франца-Иосифа // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 4, с. 17–30.

Слагода Е.А., Курчатова А.Н., Попов К.А. и др. Криолитологическое строение первой террасы острова Белый в Карском море: микростроение и признаки криолитогеоза (Часть 2) // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 1, с. 12–22.

Тихонравова Я.В., Слагода Е.А., Рогов В.В. и др. Гетерогенное строение полигонально-жильных льдов в торфяниках Пур-Тазовского междуречья // Лед и снег, 2020, т. 60, № 2, с. 225–238.

Трофимов В.Т. Геокриологическое районирование Западно-Сибирской плиты / В.Т. Трофимов, Ю.Б. Бадю, Ю.К. Васильчук и др. М., Наука, 1987, 219 с.

Хомутов А.В., Бабкин Е.М., Тихонравова Я.В. и др. Комплексные исследования криолитозоны северо-восточной части Пур-Тазовского междуречья // Науч. вестн. ЯНАО. Устойчивое развитие Арктики. Салехард, 2019, вып. 1 (102), с. 53–64.

Шмелев Л.М. Следы криогенных явлений в четвертичных отложениях Западно-Сибирской низменности и их палеогеографическое значение // Четвертичный период Сибири. М., Наука, 1966, с. 429–437.

Google Earth, Landsat Data SIO.NOAA. U.S.Navy. NGA. GEBCO Image Landsat / Copernicus Image IBCAO. – <https://earth.google.com/> (дата обращения: 05.11.2020).

Obst M., Dynes J.J., Lawrence J.R. et al. Precipitation of amorphous CaCO_3 (aragonite-like) by cyanobacteria: A STXM study of the influence of EPS on the nucleation process // Geochim. Cosmochim. Acta, 2009, vol. 73, p. 4180–4198.

Raudina T., Loiko S., Kuzmina D. et al. Colloidal organic carbon and trace elements in peat porewaters across a permafrost gradient in Western Siberia // Geoderma, 2021, vol. 390 (8), p. 114971.

Reimer P.J., Brad E., Bayliss A. et al. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50 000 year calBP // Radiocarbon, 2013, vol. 55, No. 4, p. 1869–1887.

Ruban A., Rudmin M., Dudarev O. et al. The formation of authigenic carbonates at a methane seep site in the northern part of the Laptev Sea // Minerals, 2020, vol. 10, p. 948.

Slagoda E.A., Kurchatova A.N. Micromorphological analyses of main genetic permafrost types in West Siberia // Ninth Intern. Conf. on Permafrost, 2008, vol. 2, p. 1659–1663.

Slagoda E.A., Tikhonravova Ya.V., Kuznetsova A.O., Korableva E.S. Cryoturbations, pseudomorphs, postcryogenic textures and involutions in the frozen sediments of the Pur-Taz interfluvium // Solving the puzzles from Cryosphere. Pushchino, Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science RAS “Okabiolab” Ltd., 2019, p. 109–110.

Trichet J., Defarge C., Tribble J. et al. Christmas Island lagoonal lakes, models for the deposition of carbonate-evaporite organic laminated sediments // Sediment. Geol., 2001, vol. 140, p. 177–189.

References

Vasilchuk Yu.K., Vasilchuk A.K. Thick polygonal peatlands in continuous permafrost zone of West Siberia. Earth's Cryosphere, 2016, vol. XX, No. 4, p. 3–13.

Geokriologiya SSSR. T. 2. Zapadnaya Sibir [Geocryology of the USSR. Vol. 2. Western Siberia]. E.D. Ershov (Ed.). Moscow, Nedra, 1989, 454 p. (in Russian).

Ershov E.D. Mikrostroyeniye merzlykh porod [Microstructure of Permafrost]. Moscow, Moscow University Press, 1988, 182 p. (in Russian).

Sigert H.G. Mineral formation in periglacial conditions. In: Stroyeniye i teplovoy rezhim merzlykh porod [Structure and Thermal Regime of Permafrost]. Novosibirsk, Nauka, 1981, p. 14–21 (in Russian).

Sigert H.G., Slagoda E.A. Results of Ice Complex' studies in Yakutia. In: Chetvertichnaya stratigrafiya i sobytiya Evrazii i Tikhookeanskogo regiona [Quaternary Stratigraphy and Events in Eurasia and Pacific Regions]. Yakutsk, YaNTC SO RAN, 1990, p. 82–84 (in Russian).

Zykina V.S., Zykina V.S., Volvakh A.O. et al. Upper Quaternary deposits of the Nadym Ob area: stratigraphy, cryogenic form, and deposition environments. Earth's Cryosphere, 2017, vol. XXI, No. 6, p. 12–20.

Katz N.Ya., Katz S.V., Skobeeva E.I. Atlas rastitelnykh ostatkov v torfakh [Atlas of plant residues in peat]. Moscow, Nedra, 1977, 376 p. (in Russian).

Konishchev V.N., Rogov V.V. Metody kriolitologicheskikh issledovaniy [Methods of Permafrost Studies]. Moscow, Moscow University Press, 1985, 185 p. (in Russian).

Kurchatova A.N., Rogov V.V. Metodu elektronnoy mikroskopii v geokriologii [Electron microscopy methods in geocryology. Study guide]. Moscow, Tyumen, Moscow State University; TIU, 2020, 134 p. (in Russian).

Kurchatova A.N., Rogov V.V. Grain-size distribution and morphology of cryotic soils: new methods and approaches. Inzhenernyye izyskaniya [Engineering Survey], 2014, No. 5–6, p. 58–63 (in Russian).

Leonova L.V., Kuzmina L.Yu., Ryabova A.S. et al. Experimental precipitation of Mg-containing bicarbonates in laboratory conditions. In: Mineralogiya tekhnogeneza [Mineralogy of Technogenesis]. Miass, Institut mineralogii UrO RAN, 2017, No. 16, p. 200–207 (in Russian).

Reineck H.-E., Singh I.B. Depositional Sedimentary Environments. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 1975, 439 p.

Rogov V.V. Osnovu kriogeneza [Fundamentals of Cryogenesis]. Novosibirsk, Geo, 2009, 208 p. (in Russian).

Romanovsky N.N. Osnovu kriogeneza kriosferu [Fundamentals of Cryolithogenesis of the Cryosphere]. Moscow, Moscow University Press, 1993, 335 p. (in Russian).

Romanovsky S.I. Sedimentologicheskie osnovy litologii [Sedimentological Foundations of Lithology]. Leningrad, Nedra, 1977, 408 p. (in Russian).

Slagoda E.A. Reconstruction of the cryolithozone using micromorphological signs of cryogenesis in the sediments of the Late Cenozoic: Aftorefupat doctoral dissertation. Tyumen, 2005, 48 p. (in Russian).

Slagoda E.A., Krylov A.V., Popov K.A. et al. Permafrost in Hayes Island, Franz Josef Land Archipelago. Earth's Cryosphere, 2015, vol. XIX, No. 4, p. 17–28.

Slagoda E.A., Kurchatova A.N., Popov K.A. et al. Cryolithologic structure of the first terrace: microstructure and evidence of cryolithogenesis, Bely Island, Kara Sea (Part 2). Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2014, vol. XVIII, No. 1, p. 12–22 (in Russian).

Tikhonravova Ya.V., Slagoda E.A., Rogov V.V. et al. Heterogeneous structure of polygonal wedge ice in the peat bogs of the Pur-Taz interfluvium. Led i Sneg [Ice and Snow], 2020, vol. 60, No. 2, p. 225–238 (in Russian).

Trofimov V.T., Badu Yu.B., Vasilchuk Yu.K. et al. Georologicheskoe raionirovaniye Zapadno-Sibirskoi plity [Geocryological Zoning of the West Siberian Plate]. Moscow, Nauka, 1987, 219 p. (in Russian).

- Khomutov A.V., Babkin E.M., Tikhonravova Ya.V. et al. Integrated studies of the cryolithozone of the northeastern part of the Pur-Taz interfluvium. In: Nauchnyi vestnik [Scientific Bulletin of the Yamalo-Nenets Autonomous District. Sustainable development of the Arctic]. Salekhard, 2019, issue 1 (102), p. 53–64 (in Russian).
- Shmelev L.M. Traces of cryogenic phenomena in Quaternary deposits of the West Siberian lowland and their paleogeographic significance. In: Chetvertichnyi period v Sibiri [Quaternary Period of Siberia]. Moscow, Nauka, 1966, p. 429–437 (in Russian).
- Google Earth, Landsat Data SIO.NOAA. U.S.Navy. NGA. GEBCO Image Landsat / Copernicus Image IBCAO. – <https://earth.google.com/> (last visited: 05.11.2020).
- Obst M., Dynes J.J., Lawrence J.R. et al. Precipitation of amorphous CaCO_3 (aragonite-like) by cyanobacteria: A STXM study of the influence of EPS on the nucleation process. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2009, vol. 73, p. 4180–4198.
- Raudina T., Loiko S., Kuzmina D. et al. Colloidal organic carbon and trace elements in peat porewaters across a permafrost gradient in Western Siberia. *Geoderma*, 2021, vol. 390 (8), p. 11497.
- Reimer P.J., Brad E., Bayliss A. et al. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50 000 year calBP. *Radio-carbon*, 2013, vol. 55, No. 4, p. 1869–1887.
- Ruban A., Rudmin M., Dudarev O. et al. The formation of authigenic carbonates at a methane seep site in the northern part of the Laptev Sea. *Minerals*, 2020, vol. 10, p. 948.
- Slagoda E.A., Kurchatova A.N. Micromorphological analyses of main genetic permafrost types in West Siberia. In: Ninth International Conference on Permafrost, 2008, vol. 2, p. 1659–1663.
- Slagoda E.A., Tikhonravova Ya.V., Kuznetsova A.O., Koroleva E.S. Cryoturbations, pseudomorphs, postcryogenic textures and involutions in the frozen sediments of the Pur-Taz interfluvium. In: Solving the puzzles from Cryosphere. Pushchino, Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science RAS Russian Academy of Science Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science RAS “Okabiolab” Ltd., 2019, p. 109–110.
- Trichet J., Defarge C., Tribble J. et al. Christmas Island lagoonal lakes, models for the deposition of carbonate-evaporite organic laminated sediments. *Sediment. Geol.*, 2001, vol. 140, p. 177–189.

*Поступила в редакцию 22 апреля 2021 г.,
после доработки – 24 ноября 2021 г.,
принята к публикации 16 января 2022 г.*