

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

УДК 551.345.2 (551.89)

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-3-5

Строение плейстоценовых криогенных отложений Лено-Амгинской равнины (Центральная Якутия)

В.В. Спектор¹, Huijun Jin², Н.В. Торговкин¹, Г.Т. Максимов¹,
В.Б. Спектор¹, И.И. Сыромятников¹

¹Институт мерзлотоведения им. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

²State Key Laboratory of Frozen Soils Engineering (SKLFSE),

Northwest Institute of Eco-Environment and Resources (NIEER), Chinese Academy of Sciences (CAS)

vvspector@mpi.ysn.ru

Аннотация. Толща дисперсных многолетнемерзлых четвертичных отложений мощностью около 100 м вскрыта скважиной в центральной части Лено-Амгинской равнины. По литогенетическим и криолитологическим особенностям в разрезе выделены шесть пачек: I – сезонного промерзания-протаивания (инт. 0–1,1 м); II – покровных суглинков (1,1–2,65 м); III – ледового комплекса (2,65–26,15 м); IV – озерных (26,15–63,45 м); V – озерно-аллювиальных (63,45–78,9 м); VI – аллювиальных (78,9–94,5 м) отложений. Две верхние пачки (I и II) относятся к криогенному элювию. Пачка III характеризуется низкой плотностью, высокими показателями весовой влажности, содержания органического вещества и минерализации, наличием повторно-жильных льдов и разнообразием криотекстур. Эти особенности отложений указывают на отсутствие диагенетических преобразований осадков. Состав стабильных изотопов повторно-жильных льдов свидетельствует об их происхождении, в основном, за счет снеговой влаги. Пачки IV–VI характеризуются ненарушенной слоистостью, отсутствием ледяных шлиров, повсеместным присутствием массивной криогенной текстуры, более высокой плотностью, низкими показателями минерализации и содержания органического вещества. Перечисленные особенности пачек IV–VI свидетельствуют о более глубоких преобразованиях осадков, соответствующих окончанию начальной стадии диагенеза. По степени диагенетических преобразований осадков, предшествующих промерзанию, пачка III отнесена к синкриогенным, а пачки IV–VI – к эпикриогенным отложениям. Изменения режима накопления и промерзания осадков на Лено-Амгинской равнине связаны с климатическими колебаниями и оледенениями. Промерзание основного объема эпикриогенной толщи происходило в каргинско-сартанское время позднего неоплейстоцена.

Ключевые слова: криолитозона, синкриогенные и эпикриогенные отложения, Центральная Якутия, повторно-жильные льды, криотекстуры, стабильные изотопы кислорода и водорода.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-55-53054 и ГФЕН Китая № 41811530093. Коллектив благодарит д-ра Х. Майера за оказание методической помощи при выполнении анализа стабильных изотопов.

Введение

Лено-Амгинская равнина [1] является одним из крупнейших регионов перигляциальной области Средней Сибири. Перигляциальные образования плейстоцена этого региона представляют собой специфические типы осадков и формы рельефа, развитые в областях, сопредельных с ледниковыми [2–5]. В 2018 г. представительный разрез четвертичных отложений был вскрыт 100-метровой скважиной в 10 км к востоку от

аласа Мюрю (62,659659° с.ш., 131,386478° в.д.; абс. отм. устья 215 м н.у.м.) (рис. 1).

Представленный разрез сложен дисперсными четвертичными многолетнемерзлыми отложениями, в котором выделены синкриогенный и эпикриогенный типы.

Результаты исследования

Криолитологическая характеристика. На основании криолитологической характеристики,

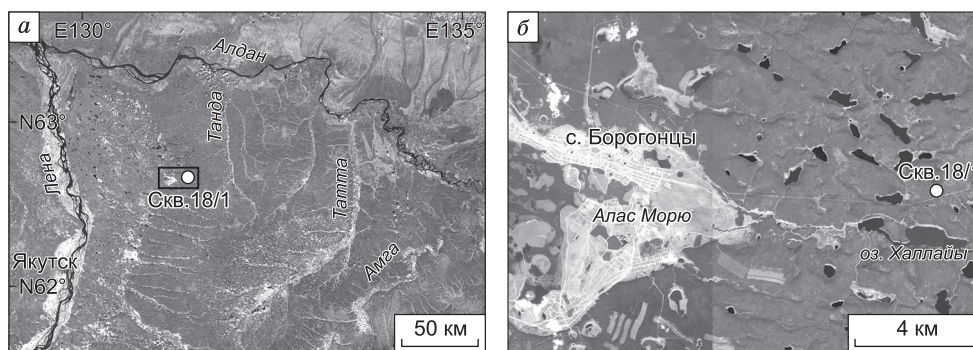


Рис. 1. Местоположение скв. 18/1:

а – на высокой Лено-Амгинской равнине; *б* – относительно аласа Мюрю.

Fig. 1. Location of the Borehole 18/1:

a – on the high Lena and Amga Rivers plain; *b* – in relation to the alas Myuryu.

криогенных особенностей и генезиса осадков вскрытый до глубины 94,5 м разрез четвертичных отложений был разделен на несколько пачек, последовательно сменяющих друг друга (рис. 2). Возраст отложений [6] был предварительно определен на основании палинологического анализа, который в данной работе не приводится. Сверху вниз выделяются: I. Пачка сезонного промерзания – протаивания (инт. 0–1,1 м), голоцен; II. Пачка покровных суглинков (1,1–2,65 м), верхняя часть сартанского горизонта; III. Пачка ледового комплекса (2,65–26,15 м), сартанский–каргинский горизонты. IV. Пачка озерных отложений (26,15–63,45 м), нижняя часть каргинского горизонта–зырянский, тазовский, ширтинский и верхняя часть самаровского горизонта. V. Пачка озерно-аллювиальных отложений (63,45–78,9 м), самаровский горизонт, верхняя часть тобольского горизонта. VI. Пачка аллювиальных отложений (инт. 78,9–94,5 м), тобольский горизонт–ранний неоплейстоцен.

Первая пачка сезонного промерзания-протаивания (инт. 0–1,1 м) представлена двумя слоями: в верхней части (до 10 см) – прерывистым почвенно-растительным слоем, в нижней – светло-коричневой супесью с тонкой сланцеватой текстурой. Весь слой пронизан корешками современных растений. Криотекстура слоя массивная.

Вторая пачка покровных суглинков (инт. 1,1–2,65 м) сложена светло-коричневыми и коричневыми массивными суглинками, с несогласием залегающими на подстилающих отложениях. В верхней части отмечаются линзовидные включения темно-коричневой криотурбированной почвы. Криотекстура тонко- и микрошлировая горизонтально-слоистая; на глубине 2 м переходит в

тонкошлировую, а затем в массивную; у подошвы слоя – в линзовидную наклонную.

Третья пачка ледового комплекса (инт. 2,65–26,15 м) характеризуется высоким содержанием ледового компонента, разнообразием и насыщенностью криогенных текстур. Минеральная часть отложений однообразна и представлена суглинком светло-коричневым массивным неясно-горизонтально- и наклоннослоистым. В отдельных интервалах разреза отмечается ожелезнение, нередко встречается растительный детрит. По особенностям строения пачку можно разделить на верхнюю и нижнюю части.

Верхняя часть пачки (2,65–17,63 м), соответствующая сартанскому горизонту, включает три горизонта повторно-жильных льдов: ПЖЛ 1 (инт. 2,65–4,6 м), ПЖЛ 2 (5,85–6,72 м) и ПЖЛ 3 (11,88–13,95 м). Отдельные фрагменты ПЖЛ встречены на глубинах: 10,77, 15,5 и 17,55 м.

Повторно-жильный лед в большей части прозрачный, вертикально-полосчатый. Полосчатость подчеркнута чередованием более темных полос минерального вещества во льду. Пузырьки газовых включений имеют округлую форму, диаметр 1–2 мм, ориентированы в вертикальные цепочки.

Контактная зона ПЖЛ и вмещающих суглинков характеризуется высокой льдонасыщенностью, разнообразием и распространением сложных слоистых криотекстур. Наряду с микро- и тонкими шлирами льда отмечаются косые шлиры толщиной до 4 мм. Вмещающие породы имеют преимущественно тонкослоистую или массивную криотекстуру. Реже наблюдается порфировидная, микрошлировая, горизонтальная и вертикальная, хаотичная, слоисто-сетчатая с гнездовидными включениями и поясковая. Отмечаются суб-

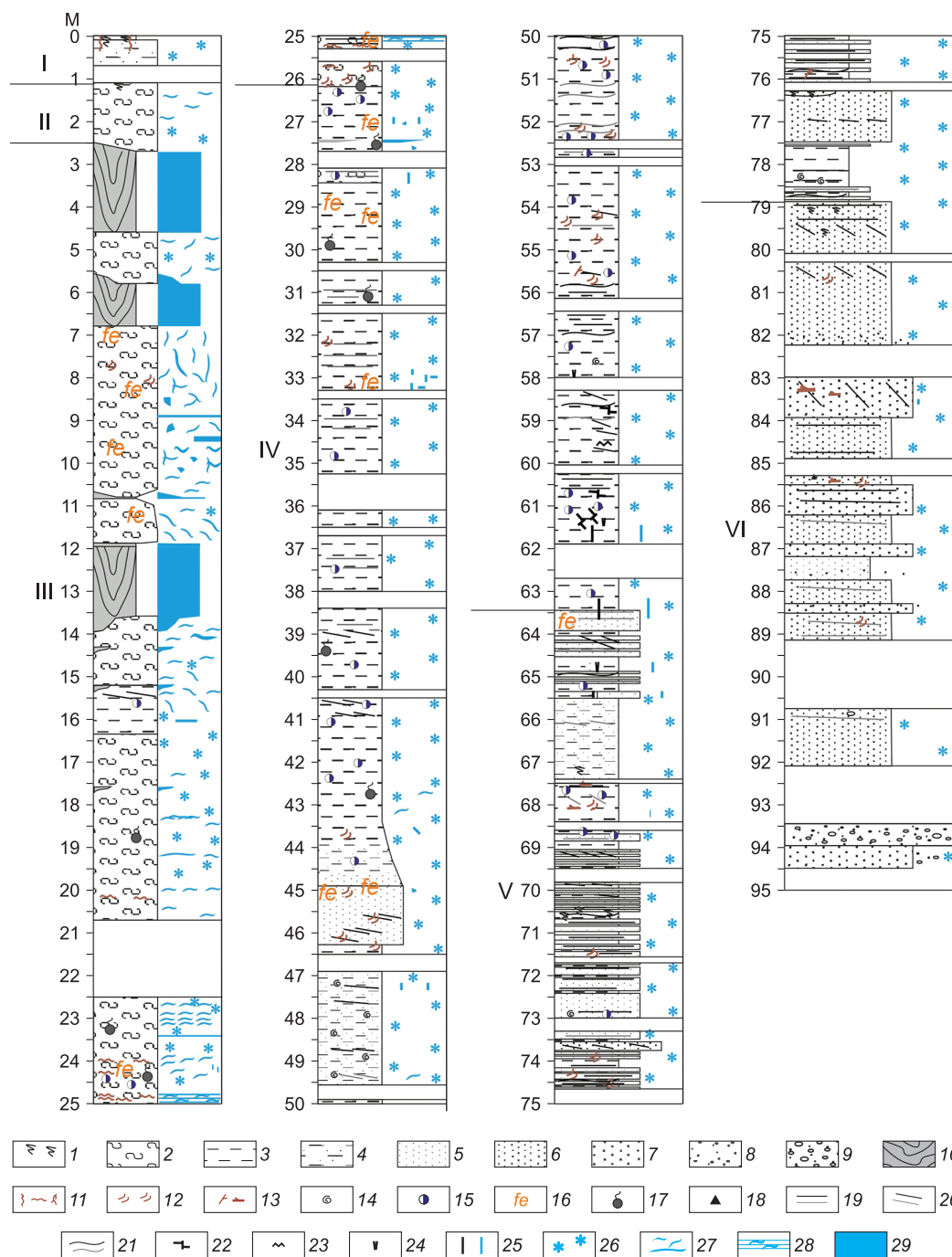


Рис. 2. Схема разреза скважины 18/1.

1 – почва; 2 – суглинок; 3 – алеврит; 4 – супесь; 5 – песок мелкозернистый; 6 – песок среднезернистый; 7 – песок крупнозернистый; 8 – гравий; 9 – галечник; 10 – повторно-жильные льды; 11 – корешки; 12 – растительный детрит; 13 – ветки и обломки древесины; 14 – раковины; 15 – включения вивианита; 16 – ожелезнение; 17 – резкий запах; 18 – угольная крошка; 19–21 – слоистость: соответственно горизонтальная, косая, волнистая, серыми линиями отмечена неясная слоистость; 22 – микросбросы; 23 – турбация; 24 – клиновидное включение; 25 – узкие трещины, заполненные льдом; 26 – массивная криотекстура; 27 – тонко- и толстошпировая криотекстура; 28 – сложнопоясковая криотекстура; 29 – лед.

Fig. 2. Schematic view of the Borehole 18/1 section.

1 – soil; 2 – loam; 3 – silt; 4 – sandy loam; 5 – fine sand; 6 – middle sand; 7 – coarse sand; 8 – gravel; 9 – pebbles; 10 – wedge ice; 11 – small roots; 12 – plant detritus; 13 – branches and wood fragments; 14 – shells; 15 – vivianite inclusions; 16 – ferrugination; 17 – strong smell; 18 – charcoal small chips; 19–21 – bedding: horizontal, oblique, wavy, grey lines depict unclear layering; 22 – micro-faults; 23 – turbation; 24 – wedge-like inclusions; 25 – narrow cracks filled with ice; 26 – ice-cement; 27 – thin- and thick layered cryostructure; 28 – complex belt-like cryostructure; 29 – ice.

горизонтальные прослои льда толщиной 2–3 см, одиночные ломаные и ветвящиеся вертикальные прожилки льда толщиной до первых сантиметров. Нередки смещения жил по горизонтальным плоскостям.

Нижняя часть пачки (17,63–26,15 м) не содержит ПЖЛ. Минеральная составляющая представлена светло-серыми и светло-коричневыми суглинками массивными и неясно-горизонтально-слоистыми с включением растительных остатков и пятнами вивианита. Текстурирующие льды формируют тонко-, микрослоистые и поясковые текстуры. Отмечаются ветвящиеся вертикальные прожилки льда. К нижней части разреза льдонасыщенность заметно уменьшается.

Четвертая пачка озерных отложений (инт. 26,15–63,45 м) представлена алевроитом с включениями корешков и мелких растительных остатков, пятнами оглеения, пятнами и полосами ожелезнения вдоль наклонных трещин. Весьма редко встречаются примеси песка. Отмечаются включения мелких (около 1 мм) белых раковин моллюсков (инт. 46,25–46,5 м).

Слоистость в верхней части пачки до глубины 40 м обусловлена чередованием через 1–4 см более темных, обогащенных органикой, и более светлых пылеватых осадков. Глубже 40,5 м, наряду с неясной горизонтальной слоистостью, отмечается косая и волнистая слоистость, реже массивное сложение. Слоистость обусловлена чередованием коричневых и серых прослоев толщиной 1–5 мм. Отмечаются многочисленные пятна оглеения диаметром 2–5 мм, подчиненные слоистости.

Криотекстура пачки массивная. Только на глубине 42,65–43,18 м наблюдаются тонкие (1 мм) субгоризонтальные и наклонные линзочки льда на фоне массивной криотекстуры. Нередко наблюдаются смещения первичного залегания слоев.

Пятая пачка озерно-аллювиальных отложений (инт. 63,45–78,9 м) сложена мелкозернистыми и среднезернистыми песками, переслаиваемыми с алевроитами. Среди осадков пачки заметную роль играет органогенный материал (растительные остатки, редкие мелкие раковины моллюсков). Пески и алевроиты образуют частое переслаивание и, реже, слои с однородной литологией. В пачке наблюдаются различные виды слоистости: неясно пологонаклонная, горизонтальная, волнистая линзовидная. В инт. 73,91–73,96 м наблюдаются косые слои песка. Нижняя

граница с подстилающим слоем резкая, наклонная (около 10°). Криотекстура массивная (ледцемент); отмечается выполнение льдом редких и узких субвертикальных трещин. Деформации слоев редки и отмечены только в верхней части пачки.

Шестая пачка аллювиальных отложений (инт. 78,9–94,5 м) сложена песками, преимущественно среднезернистыми и крупнозернистыми, гравийниками и галечными конгломератами. Слоистость отложений субгоризонтальная и косая, обусловленная чередованием прослоев песка светло-серого толщиной 1–2 см и темно-серого толщиной 2–3 мм. Отмечаются включения растительного детрита и редко крошек каменного угля. В инт. 83,24–83,3 м включение древесного ствола размером 8×5 см. С глубины 89,15 м до забоя скважины вскрывается галечник, представленный среднеокатанной галькой (кварца, кварцита, кремня, эффузивов и др.) размером 2–3 см. Заполнитель – песок крупнозернистый, грубозернистый, с гравийными зернами. В пачке наблюдалась исключительно массивная криотекстура. Крайне редко заполненные льдом узкие трещины.

Весовая влажность, объемный вес, содержание органики. Определения весовой влажности были выполнены для 67 образцов пород путем высушивания образцов массой около 100 г в сушильном шкафу при температуре 105 °С до постоянной массы [7]. В тех же образцах была определена плотность мерзлого грунта методом обратного взвешивания в нейтральной жидкости и содержание органического вещества методом потери массы после прокалывания при температуре 450 °С в течение 4 ч. Результаты представлены на рис. 3.

Для пачки I характерны относительно низкие значения весовой влажности в верхней части разреза (13,5 %), связанные с миграцией влаги и иссушением осадков верхнего слоя. Ближе к подошве СТС весовая влажность увеличивается.

Отложения пачки II характеризуются увеличением содержания влаги (32,5–42 %) сверху вниз по разрезу.

В породах пачки III значения влажности существенно увеличиваются, составляя в среднем 58,7 %. Максимальное значение (111,1 %) наблюдается в интервале 9,15–9,19 м вблизи краевой части ледяной жилы. Минимальное значение (36,2 %) принадлежит инт. 23,05–23,11 м, где вскрываются суглинки с массивной криотекстурой.

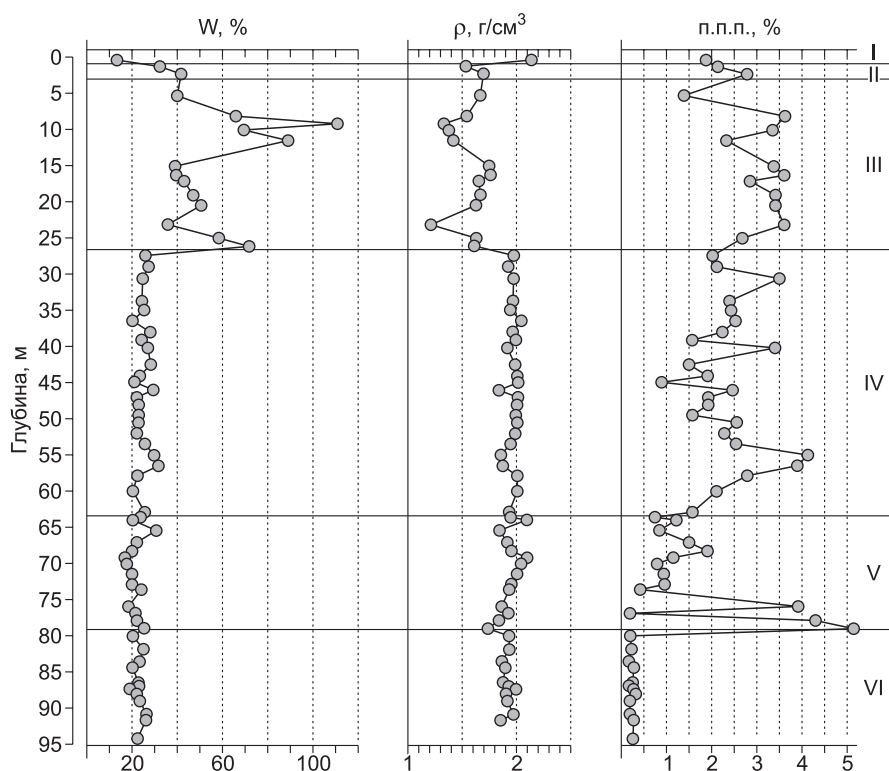


Рис. 3. Показатели весовой влажности (W), объемного веса (ρ) и потери органического вещества при прокаливании (п.п.п.) в мерзлых отложениях скв. 18/1. Римские цифры – нумерация пачек.

Fig. 3. Values of the weight water content (W), bulk volume (ρ), and lost of organic matter on ignition (LOI) in the frozen sediments of the Borehole 18/1. Roman numerals depict numeration of sedimentary units.

В пачке IV с массивной криотекстурой среднее значение влажности снижается до 25,1 %. Максимум (31,7 %) наблюдается в инт. 56,5–65,54 м, а минимум (20,5 %) – в инт. 36,39–36,5 м.

Для пачки V характерна массивная криотекстура. Значения весовой влажности здесь еще больше снижаются: среднее (23,1 %), максимум (30,8 %) в интервале 65,42–65,48 м, минимум (17,1 %) в интервале 69,23–69,31 м.

Для песков пачки VI с массивной криогенной текстурой характерны следующие значения весовой влажности: среднее (23,2 %), максимум (26,5 %), минимум (19,2 %).

Имеет место высокая отрицательная корреляция ($-0,81$), при которой увеличение весовой влажности связано с уменьшением объемного веса. Так, средние значения объемного веса составляют 2,27 г/см³ (пачка I), 1,62 (пачка II), 1,56 г/см³ (пачка III), 1,97 г/см³ (пачка IV), 1,96 г/см³ (пачка V) и 1,91 г/см³ (пачка VI). Наименьшие значения объемного веса характерны для пород ледового комплекса, указывая на самую высокую степень льдонасыщения.

Содержание органического вещества имеет слабую отрицательную корреляцию ($-0,42$) с объемным весом. Это указывает, с одной стороны, на то что при росте показателя плотности количество органического вещества снижается, а с другой, на то что количество последнего в породе в целом незначительно. Так, средние значения органики в породе составляют 2,27 % (пачка I), 3,05 (пачка III), 2,34 (пачка IV), 1,45 % (пачка V) и 0,61 % (пачка VI). Максимальный показатель (5,14 %) приходится на интервал 79,04–79,11 м, что объясняется частичным опробованием линзы аллохтонного растительного детрита в песках.

Гранулометрический состав. Гранулометрический и микроагрегатный состав грунтов был определен для 67 образцов с помощью ситового метода без промывки водой для фракций более 0,1 мм и ареометрического метода для фракций менее 0,1 мм [8]. Полученные результаты были подвергнуты статистической обработке в программе GRADISTAT [9] на основании логарифмического метода, с помощью которой были по-

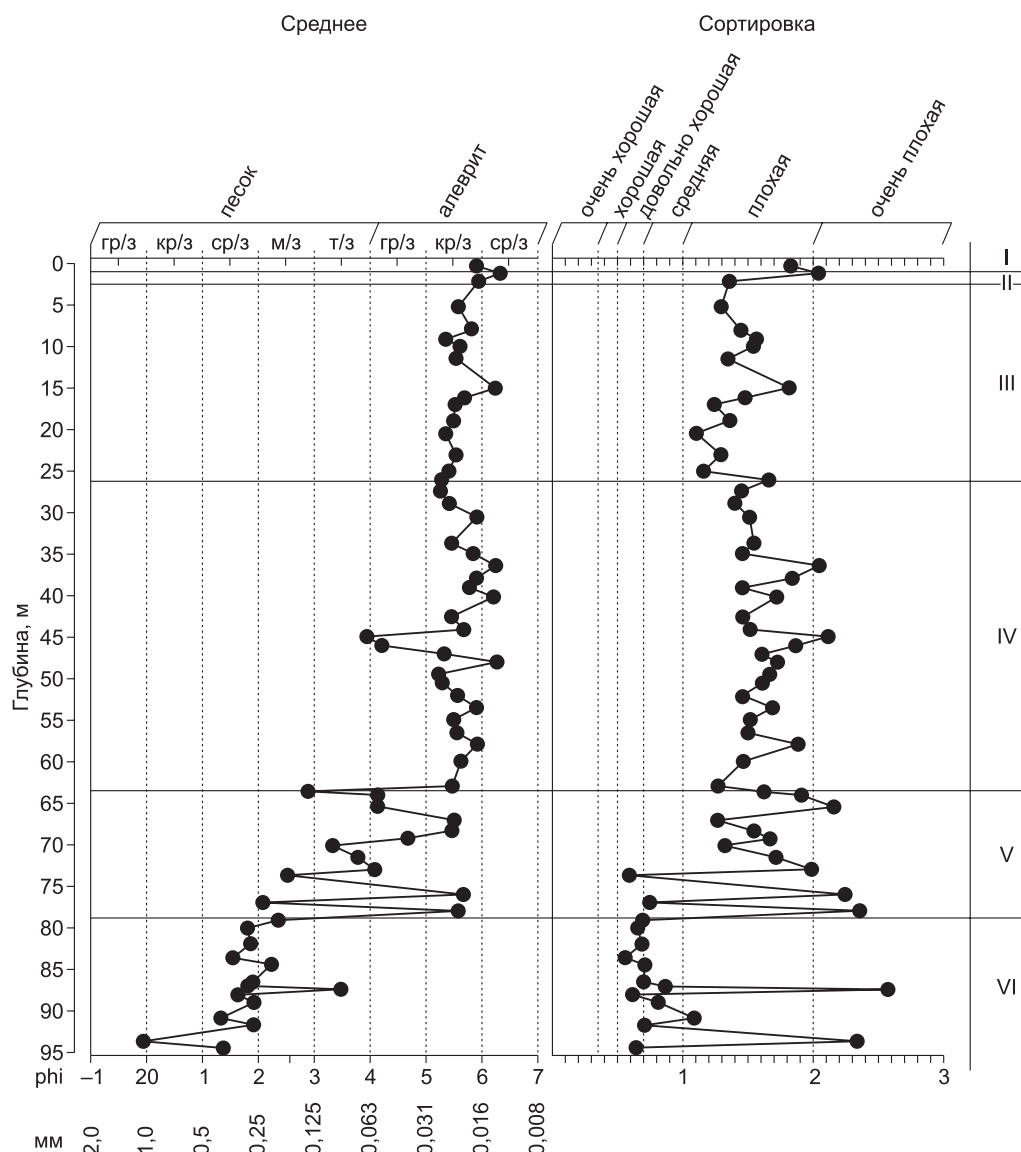


Рис. 4. Средний размер зерен и коэффициент сортировки в отложениях скв. 18/1. Римские цифры – нумерация пачек.

Fig. 4. Average grain size and coefficient of sorting in the sediments of the Borehole 18/1. Roman numerals depict numeration of sedimentary units.

лучены значения среднего размера зерен в единицах ϕ и рассеивания (сортировки) (рис. 4). Для всей выборки характерно унимодальное распределение, за исключением образцов из инт. 64,0–64,11 м и 93,45–93,35 м, где наблюдается бимодальное распределение.

Пачка I представлена крупно- и среднезернистым алевритом (среднее 5,92 ϕ), имеющим плохую сортировку (1,83).

Пачка II характеризуется чуть более тонким составом (6,35–5,97 ϕ) и небольшим ухудше-

нием сортировки (2–1,3), что, вероятно, связано с процессом криогенного выветривания.

Пачка III сложена крупнозернистым алевритом, нередко с примесью тонкозернистого песка (среднее 5,67 ϕ), имеющим плохую и, редко, очень плохую сортировку (1,45). Показатель сортировки, по сравнению с пачками I и II, немного выше.

Пачка IV представлена крупнозернистым алевритом, часто с примесью тонкозернистого песка (среднее 5,56 ϕ), с плохой и в двух случаях с

очень плохой сортировкой (1,62). В среднем степень сортировки материала немного хуже, чем в вышележащих отложениях.

Пачка V представляет собой переслаивание мелкозернистого песка и крупнозернистого алеврита. В нижней части пачки появляются прослой среднезернистого песка. Для всей пачки среднее значение составляет 4,16 ϕ , а коэффициент сортировки 1,63. Эти показатели не рассматриваются нами как репрезентативные из-за разнородности материала, но в целом можно отметить укрупнение размерности.

Пачка VI представлена переслаиванием песка средне- и мелкозернистого, в нижней части с примесью гравийных зерен (среднее 1,81 ϕ). В интервале 93,45–93,95 м отмечается галечник, состоящий из галек мелкого и среднего размера с гравием в песчаном заполнителе. Последний интервал, до глубины 94,5 м на забое скважины, представлен среднезернистым песком. Сортировка материала средняя и довольно хорошая (0,98), в двух случаях плохая и очень плохая. В целом отмечается укрупнение состава и улучшение сортировки по сравнению с вышележащими слоями.

Химический состав водных вытяжек. Анализ производился из водных вытяжек 35 образцов осадков [10], включая определения содержания катионов и анионов, pH и общей минерализации (рис. 5) и 3 образцов ПЖЛ. Относительное содержание ионов, выраженное в мг-эквивалентах от общей суммы ионов, вычислено согласно формуле О.А. Алекина; классификация выполнена по преобладающим ионам.

Пачка I представлена образцом, отобранным с подошвы почвенного горизонта. Он обладает низкой минерализацией (66,6 мг/л) с гидрокарбонатным магний-кальциевым составом со слабощелочным pH (7,33).

Пачка II. Образец, отобранный на границе слоя сезонного протаивания (2,2 м), обладает сульфатным кальций-магниевым составом с высокой минерализацией (430,3 мг/л), слабощелочным pH (7,35). Здесь многолетнемерзлые породы выступают в роли геохимического барьера, выраженным пиком минерализации.

Пачка III характеризуется гидрокарбонатным составом, смешанным по катионам, постепенно повышается влияние хлоридов; средняя минерализация составляет 128 мг/л, среда слабощелочная (среднее pH 7,3). На глубине 15 м, которая,

согласно температурным измерениям в скважине, соответствует подошве слоя нулевых годовых колебаний, состав солей меняется и становится сульфатным кальций-магниевым, а минерализация достигает пикового значения (329 мг/л).

Показатели общей минерализации (мг/л) и pH в горизонтах ПЖЛ составили соответственно: 51, 7,21 (ПЖЛ 1, инт. 3,3–3,6 м), 127, 7,56 (ПЖЛ 2, инт. 6,25–6,36 м) и 49,3, 7,34 (ПЖЛ 3, инт. 12,87–12,95 м). Отмечаются снижение степени минерализации льда по сравнению с водными вытяжками вмещающих отложений и сохранение окислительно-восстановительного потенциала на том же уровне.

Пачка IV характеризуется гидрокарбонатным составом, смешанным по катионам, среди которых, относительно других комплексов, высоко содержание иона аммония (до 21 %). Аммоний образуется за счет распада азотсодержащих органических соединений и характерен для отложений озер [11]. Отмечается снижение уровня минерализации, среднее значение которой составляет 95 мг/л, среда слабощелочная (среднее pH 7,4)

Пачка V имеет хлоридно-гидрокарбонатный состав, смешанный по катионам. Средняя минерализация составляет 82 мг/л. Среди катионов доминирующую роль приобретает натрий. Кроме того, в нижней части пачки происходит изменение pH со слабощелочного к слабокислому (среднее pH 7,1).

Пачка VI. В верхней части пачки состав – хлоридно-гидрокарбонатный, смешанный по катионам, в нижней части – среди катионов отчетливо доминирует натрий. Степень минерализации падает до, в среднем, 36 мг/л. Среда слабокислая (среднее pH 6,5).

Температуры многолетнемерзлых пород. Согласно полученным данным температурных измерений в скважине, выполненных логгером НОВО U12-008-04, за годовой период с 31.03.2018 по 02.09.2019 г. средняя температура на глубине 14,5 м, принятая за температуру на подошве слоя годовых теплооборотов, составила –3,25 °С, с амплитудой 0,38°. Результаты единичных замеров, выполненных термокосой ИМЗ СО РАН в выстоявшейся скважине, показали, что ниже подошвы слоя годовых теплооборотов наблюдается безградиентная зона, в которой температура колеблется в диапазоне от –3,03 до –3,3 °С. Температура пород вблизи забоя скважины, на глубине 81,5 м, составляет –3,25 °С.

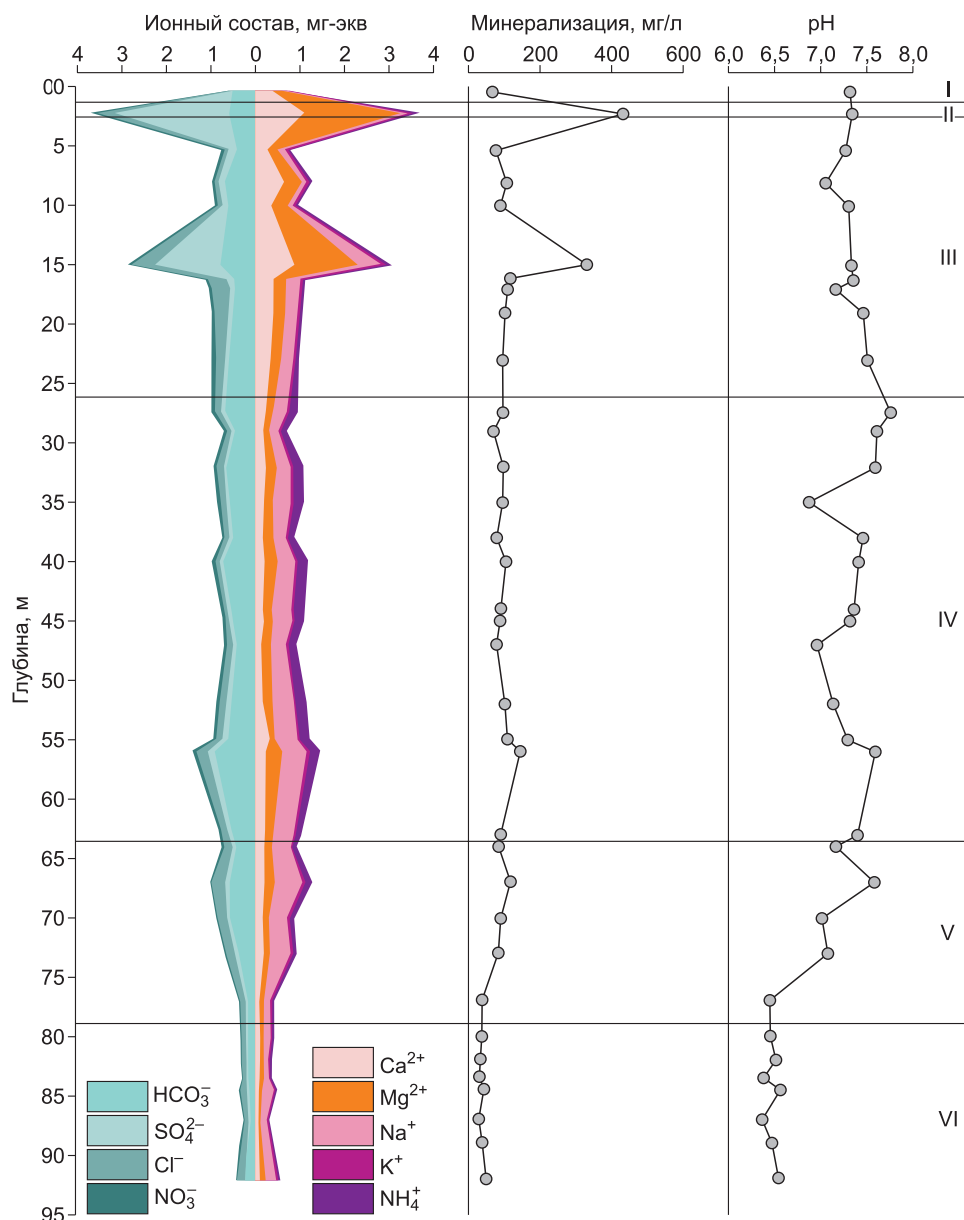


Рис. 5. Содержание растворимых компонентов в водных вытяжках, минерализация и водородный показатель в отложениях скв. 18/1. Римские цифры – нумерация пачек.

Fig. 5. Content of chemical components in water extracts, mineralization, and pH in sediments of the Borehole 18/1. Roman numerals depict numeration of sedimentary units.

Содержание стабильных изотопов кислорода и водорода. Анализ стабильных изотопов кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) и водорода (δD) и определение дейтериевого эксцесса (d_{ex}) были выполнены по 16 образцам, представленным повторно-жильным льдом из сплошного ледяного керна, льдом приконтактной зоны и текстуробразующим льдом (см. таблицу, рис. 6). Анализы выполнены

на масс-спектрометре Finnigan Mat Delta S в лаборатории стабильных изотопов Института морских и полярных исследований им. А. Вегенера, Германия.

Для всех опробованных подземных льдов уравнение регрессии $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ выражено зависимостью $\delta\text{D} = 9,2\delta^{18}\text{O} + 42,6$, при коэффициенте корреляции $R^2 = 0,94$.

**Содержание изотопов $\delta^{18}\text{O}$, δD и d_{ex} в подземных льдах скв. 18/1.
Расчетные январские, среднезимние и годовые температуры воздуха**

**Isotopic content of the $\delta^{18}\text{O}$, δD and d_{ex} in the ground ice of the Borehole 18/1.
Calculated January, mean winter and annual air temperatures**

Горизонт	Глубина, м	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	δD , ‰	d_{ex}	$t_{\text{я}}$, °C	$t_{\text{сз}}$, °C	$t_{\text{г}}$, °C
ПЖЛ 1	2,85	–28,49	–220,6	7,2	–42,7	–28,5	–21,5
	3,11	–28,49	–219,9	8,1	–42,7	–28,5	–21,4
	3,45	–28,35	–218,1	8,8	–42,5	–28,4	–21,1
	3,91	–28,54	–218,9	9,3	–42,8	–28,5	–21,2
	4,58	–28,24	–217,5	8,4	–42,4	–28,2	–21,0
ПЖЛ 2	5,84*	–24,87	–187,9	11	–37,3	–24,9	–15,7
	6,36	–25,06	–188	12,5	–37,6	–25,1	–15,7
	6,56	–24,93	–186,2	13,2	–37,4	–24,9	–15,4
ТЛ	10,77	–25,6	–196,8	8	–38,4	–25,6	–17,3
ПЖЛ 3	11,97	–29,5	–233,6	2,4	–44,3	–29,5	–23,9
	12,62	–29,85	–236,7	2	–44,8	–29,9	–24,4
	12,97	–30,77	–243,2	3	–46,2	–30,8	–25,6
	13,62	–26,65	–199,4	13,8	–40,0	–26,7	–17,8
ПЖЛ-К	14,33	–25,86	–189,3	17,6	–38,8	–25,9	–15,9
ПЖЛ-К	15,23	–26,64	–196,2	16,9	–40,0	–26,6	–17,2
ПЖЛ-К	17,6	–30,47	–224,1	19,6	–45,7	–30,5	–22,2

Примечание. ПЖЛ – повторно-жильные льды, опробованные из сплошного ледяного керна; ПЖЛ-К, * – повторно-жильные льды, опробованные на контакте со вмещающей породой; ТЛ – текстурообразующие льды во вмещающей породе.

Note. ПЖЛ – wedge ice collected from massive ice core; ПЖЛ-К, * – wedge ice collected in the contact with enclosing ground; ТЛ – cryostructure ice in the enclosing ground.

Для ПЖЛ скв. 18/1 отмечается различное распределение изотопного состава по каждому из трех горизонтов (ПЖЛ 1, 2, 3, см. таблицу, рис. 6).

Верхний горизонт (ПЖЛ 1) характеризуется слабо дифференцированным изотопным составом с относительно низкими значениями $\delta^{18}\text{O}$ (–28,54 ÷ –28,24 ‰) и δD (–217,5 ÷ –220,6 ‰). Выявленные особенности изотопной характеристики горизонта указывают на происхождение льдов за счет снеговой влаги [12].

Средний горизонт (ПЖЛ 2) отличается более высоким содержанием и дифференцированным распределением значений: $\delta^{18}\text{O}$ –24,87 ÷ –25,06 ‰ и δD –188 ÷ –186,2 ‰. Вероятно, что ПЖЛ этого горизонта формировались в условиях более теплого климата и при участии дождевой влаги [12].

Нижний горизонт (ПЖЛ 3) характеризуется наиболее легким и дифференцированным по разрезу составом: $\delta^{18}\text{O}$ –29,5 ÷ –30,77 и δD –243,2 ÷ –199,4 ‰. Льды этого горизонта формировались в условиях резко-континентально-

го климата, преимущественно за счет снеговой влаги и, вероятно, при некоторой доле дождевых вод.

Льды приконтактной зоны ПЖЛ (см. рис. 6) отличаются от льдов срединных частей более высоким и дифференцированным содержанием: $\delta^{18}\text{O}$ –30,47 ÷ –24,87 и δD –224,1 ÷ –187,9 ‰. Это явление может быть связано с фракционированием поровой влаги пород, примыкающих к жиле, в ходе ее миграции к фронту промерзания бокового контакта ледяной жилы.

Для срединных частей ПЖЛ водородный эксцесс, характеризующий отклонения изотопного состава от стандарта SMOW, имеет величины d_{ex} = 5–10 ‰, что близко к составу метеорных вод. Для контактных зон характерно увеличение d_{ex} = 10–20 ‰.

Данные изотопного состава позволяют оценить средние январские ($t_{\text{я}}$), среднезимние ($t_{\text{сз}}$) и среднегодовые ($t_{\text{г}}$) температуры воздуха во время формирования ПЖЛ (см. таблицу). Темпера-

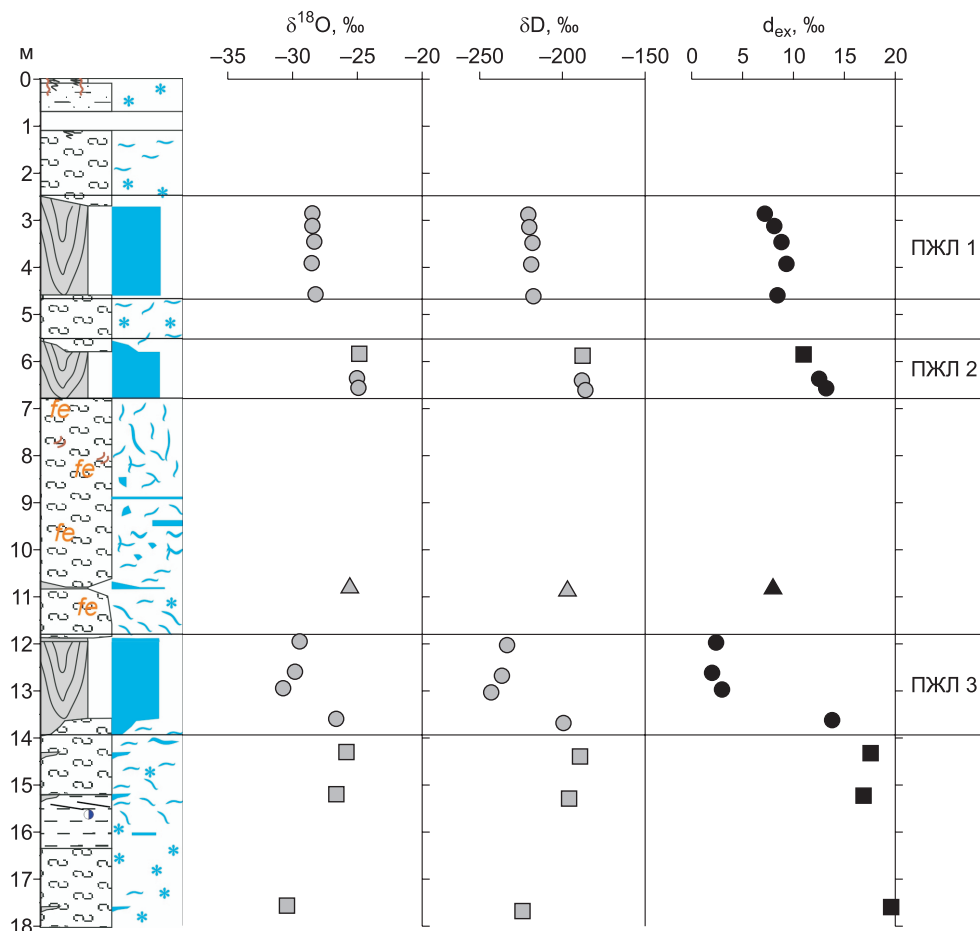


Рис. 6. Распределение $\delta^{18}\text{O}$ – δD , d_{ex} в повторно-жильных льдах скв. 18/1.

Кружки – ПЖЛ, опробованные из сплошного ледяного керна; квадраты – ПЖЛ, опробованные на контакте со вмещающей породой; треугольник – текстуровещающие льды во вмещающей породе.

Fig. 6. Distribution of $\delta^{18}\text{O}$ – δD , d_{ex} in the wedge ice of the Borehole 18/1.

circles – wedge ice collected from massive ice core; squares – wedge ice collected in the contact with enclosing ground; triangle – cryostructure ice in the enclosing ground.

тура воздуха определялась по формуле для январских и среднезимних температур [13]

$$t_{\text{я}} = 1,5\delta^{18}\text{O} (\pm 3), \quad t_{\text{сз}} = \delta^{18}\text{O} (\pm 2,0).$$

Среднегодовые температуры воздуха определялись по формуле В. Дансгора [13]

$$t_{\text{сг}} = (\delta^2\text{H} + 100)/5,6.$$

Все полученные величины значительно (на 8–15 °C) ниже современных значений для Центральной Якутии. Исходя из сравнения полученных данных со среднеянварской (–37,2 °C) и среднегодовой (–7,8 °C) температурами воздуха за период с 2000 по 2019 г. по данным метеостанции г. Якутск [14], можно высказать предположение, что низкие среднегодовые значения температур в сартанское время были обеспече-

ны за счет более низких значений летних температур – в 2–3 раза ниже современных.

Обсуждение результатов

В изученном разрезе выделяются две существенно различные части: верхняя, представленная отложениями пачек I–III, и нижняя, сложенная пачками IV–VI. Эти две части разреза различаются по своему криогенному строению, литологии, химическому составу водных вытяжек, характеризующих как фациальные условия осадконакопления, так и условия промерзания. Верхняя часть разреза по своим геокриологическим особенностям может быть охарактеризована как *синкриогенная*, а нижняя часть – как *эпикриогенная*. По Н.Н. Романовскому, «синкриогенные отложе-

ния образуются в процессе одновременного накопления осадков и перехода в многолетнемерзлое состояние. Эпикриогенными называются породы, промерзающие после их накопления» [15, с. 140].

Две верхние пачки (I и II) относятся к криогенному элювию. В случае возобновления осадконакопления они могут перейти в многолетнемерзлое состояние.

К *синкриогенным* породам относится пачка ледового комплекса (III). Гранулометрический состав пачки близок к составу подстилающих озерных отложений, что указывает на его формирование за счет размыва и переотложения последних. Наличие повторно-жильных льдов и разнообразие криогенных текстур свидетельствуют об условиях высокой обводненности во время формирования пачки. Содержание органического вещества в осадках является максимальным (3,05 %) для разреза, что указывает на очень слабую диагенетическую переработку. Об этом же свидетельствует резко дифференцированная минерализация осадков (от 77 до 329 мг/л).

Данные особенности указывают на сингенетичное промерзание осадков в пределах прерывистого, мелководного, перемерзающего бассейна. Разнообразие криогенных текстур, их частая сменяемость указывают на высокую скорость промерзания осадков в условиях крайне сурового климата.

Эпикриогенные породы. Три нижние пачки (IV–VI) рассматриваемого разреза формировались в иных фациальных и геокриологических условиях.

Предполагается, что накопление озерных и озерно-аллювиальных осадков (IV–V) происходило в условиях не промерзающего до дна пресноводного бассейна.

На стадии раннего диагенеза [16] произошли уплотнение осадка и потеря большого объема поровой влаги. Эпигенетический механизм промерзания осадков подтверждается наличием ненарушенной первичной горизонтальной и волнистой слоистости озерных осадков, отсутствием ледяных шпиров и повсеместным присутствием массивной криогенной текстуры в тонкодисперсных отложениях. Этот вывод подтверждается уменьшением влажности (25,1 %), увеличением плотности (1,97 г/см³), снижением количества органического вещества (2,34 %) по сравнению с ледовым комплексом. Увеличивается значение иона аммония (до 21 %) и оглеения осадков, появляется резкий запах, что свидетельствует о зна-

чительной переработке органического вещества в условиях восстановительной среды (pH 7,4). Отмечается снижение уровня минерализации, среднее значение которой составляет 95 мг/л.

Пачка аллювиальных отложений (VI) формировалась в эпоху межледниковья на денудационно-аккумулятивной равнине в условиях динамичного гидрологического режима. Средняя влажность отложений сходна с вышележащей пачкой (23,2 %), тогда как значение объемного веса снижается до 1,91 г/см³. Содержание органического вещества падает до минимума (0,61 %). Уменьшается и минерализация осадков (36 мг/л); среда слабокислая (pH 6,5).

Снижение значений pH в пределах пачек V и VI представляет собой нарушение закономерности увеличения щелочности осадков в ходе ранних диагенетических преобразований. По нашему мнению, это может объясняться увеличением содержания угольной кислоты в осадках, связанной с растворением карбонатов, привнесенных из близко расположенных областей сноса.

Заключение

Изучен наиболее полный разрез мощностью около 100 м многолетнемерзлых четвертичных отложений центральной части Лено-Амгинской перигляциальной равнины. Вскрытый разрез по фациальным, физическим и химическим особенностям отложений, криогенным текстурам может быть подразделен на синкриогенные и эпикриогенные толщи дисперсных отложений. Эпикриогенные дисперсные отложения в данном районе выделены впервые.

По нашему мнению, изменения режима накопления и промерзания осадков на Лено-Амгинской равнине связаны с климатическими колебаниями и оледенениями. Промерзание основного объема эпикриогенной толщи происходило в каргинско-сартанское время позднего неоплейстоцена.

Литература

1. Спектор В.Б., Спектор В.В. О происхождении высокой Лено-Амгинской перигляциальной равнины // Криосфера Земли. 2002. Т. VI, № 4. С. 3–12.
2. Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья / Соловьев П.А. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 144 с.
3. Катасонов Е.М. Мерзлотно-фациальный анализ плейстоценовых отложений и палеогеография Центральной Якутии // Палеогеография и перигляциальные явления плейстоцена. М.: Наука, 1975. С. 16–22.

4. *Криогенное строение четвертичных отложений Лено-Алданской впадины* / Иванов М.С. Новосибирск: Наука, 1984. 126 с.
5. Спектор В.В., Спектор В.Б., Бакулина Н.Т., Парфенов М.И. Роль ледников в преобразовании рельефа Лено-Амгинской равнины в плейстоцене и голоцене // Наука и образование. 2015. № 1(77). С. 42–49.
6. Спектор В.В. Происхождение криолитогенных комплексов высокой равнины Лено-Амгинского междуречья: Автореф. дисс. канд. геогр. наук. Якутск, 2003. 23 с.
7. Межгосударственный стандарт. ГОСТ 5180-84. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: Стандартинформ, 2005. 19 с.
8. Межгосударственный стандарт ГОСТ 12536-79. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2008. 18 с.
9. Blott S.J., Pye K. Gradstat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments // Earth Surface Processes and Landforms. 2001. Vol. 26. P. 1237–1248. Doi:10.1002/esp.261.
10. Методы химического анализа природных вод: методические указания / Г.П. Левченко, В.Н. Макаров. Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 2003. 86 с.
11. Гидрогеохимические исследования криолитозоны Центральной Якутии / Н.П. Анисимова, Н.А. Павлова. Новосибирск: Академ. изд-во «Гео», 2014. 189 с.
12. Деревягин А.Ю., Чижов, А.Б., Майер Х., Опель Т. Сравнительный анализ изотопного состава повторно-жильных и текстурных льдов побережья моря Лаптевых // Криосфера Земли. 2016. Т. XX, № 2. С. 15–24.
13. Основы изотопной геоэкологии и гляциологии: Учебник / Ю.К. Васильчук, В.М. Котляков. М.: Изд-во МГУ, 2000. 616 с.
14. Справочно-информационный портал «Погода и климат». <http://www.pogodaiklimat.ru/history/24959.htm>
15. Основы криогенеза литосферы / Н.Н. Романовский. М.: Изд-во МГУ, 1993. 336 с.
16. Основы теории литогенеза. Том II. Закономерности состава и размещения гумидных отложений / Н.М. Страхов. М.: Изд-во АН СССР, 1962. Изд. 2. 574 с.

Поступила в редакцию 26.05.2020

Принята к публикации 27.07.2020

Об авторах

СПЕКТОР Валентин Владимирович, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-7791-0972>, vvspector@mpi.ysn.ru;

JIN Huijun, PhD, research professor, State Key Laboratory of Frozen Soils Engineering (SKLFSE), Northwest Institute of Eco-Environment and Resources (NIEER), Chinese Academy of Sciences (CAS), 730000, 320 Donggang West Road, Lanzhou, Gansu, China, hjjin@lzb.ac.cn;

ТОРГОВКИН Николай Владимирович, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-2799-1468>, nick1805torg@gmail.com;

МАКСИМОВ Георгий Тимофеевич, младший научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-6747-8621>, mgt.qwerty@gmail.com;

СПЕКТОР Владимир Борисович, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-4734-2396>, vspektor@mail.ru;

СЫРОМЯТНИКОВ Игорь Иннокентьевич, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-4953-9704>, igor@mpi.ysn.ru.

Информация для цитирования

Спектор В.В., Jin Huijun, Торговкин Н.В., Максимов Г.Т., Спектор В.Б., Сыромятников И.И. Строение плейстоценовых криогенных отложений Лено-Амгинской равнины (Центральная Якутия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020, Т. 25, № 3. С. 49–62. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-5>

Structural features of Pleistocene cryogenic deposits in the Lena and Amga Rivers Plain (Central Yakutia)

V.V. Spektor¹, Huijun Jin², N.V. Torgovkin¹, G.T. Maksimov¹,
V.B. Spektor¹, I.I. Syromyatnikov¹

¹Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

²State Key Laboratory of Frozen Soils Engineering (SKLFSE),

Northwest Institute of Eco-Environment and Resources (NIEER), Chinese Academy of Sciences (CAS)

vvspektor@mpi.ysn.ru

Abstract. Dispersive perennially frozen Quaternary deposits, ca. 100 m thick, were intersected by a borehole drilled in the central part of the Lena – Amga River plain. By the lithogenetic and cryolithological properties of deposits, the section is divided into 6 units: I – seasonal freeze-thaw (int. 0–1.1 m); II – blanketing loams (int. 1.1–2.65 m); III – ice complex (int. 2.65–26.15 m); IV – lacustrine (int. 26.15–63.45 m); V – lacustrine-alluvial (int. 63.45–78.9 m); VI – alluvial (int. 78.9–94.5 m) deposits. Two upper units (I, II) are at the stage of incorporation into permafrost. Unit III is characterized by a low bulk volume, high levels of moisture, organic matter, and mineralization, the presence of wedge ice and a variety of cryostructures. These features indicate that diagenetic transformations of sediments are absent. Stable isotope content in ice wedges provides evidence that they had formed mostly from snow melt. Units IV–VI are characterized by undisturbed bedding, absence of ice layers, exclusive distribution of massive cryostructure, higher density, low levels of mineralization and organic content. The stated peculiarities of units IV–VI witness deeper transformation of sediments, corresponding to the termination of the initial stage of diagenesis. By a degree of sediment diagenetic transformations prior to freezing, unit III is related to syncryogenic, while units IV–VI refer to epicryogenic deposits. Changes in sedimentation and freezing of sediments on the Lena–Amga River plain are associated with climatic fluctuations and glaciations. Freezing of the major volume of epicryogenic stratum had taken place in the Karga-Sartan time of the Late Pleistocene.

Key words: cryolithozone, syncryogenic and epicryogenic deposits, Central Yakutia, wedge ice, cryostructures, stable isotopes of oxygen and hydrogen.

Acknowledgements. The reported study was funded by RFBR according to the research project №18-55-53054 and NSFC China №41811530093. Authors thank Dr. H. Meyer for methodological support in performing stable isotopes analysis.

References

1. Spektor V.B., Spektor V.V. O proiskhozhdenii vysokoi Leno-Amginskoi periglyatsialnoy ravniny // Kriosfera Zemli. 2002. Vol. VI, No. 4. P. 3–12.
2. Kriolitizona severnoi chasti Leno-Amginskogo mezhdurechya / Solov'ev P.A. Moskva: Izdatelstvo AN SSSR, 1959. 144 p.
3. Katasonov E.M. Merzlotno-fatsialnyi analiz pleistotsenovykh otlozhenii i paleogeografiya Tsentralnoy Yakutii // Paleogeografiya i periglyatsialnye yavleniya pleistotsena. Moskva: Nauka, 1975. P. 16–22.
4. Kriogennoe stroenie tchetvertichnykh otlozhenii Leno-Aldanskoi vpadiny / Ivanov M.S. Novosibirsk: Nauka, 1984. 126 p.
5. Spektor V.V., Spektor V.B., Bakulina N.T., Parfenov M.I. Rol lednikov v preobrazovanii rel'efa Leno-Amginskoi ravniny v pleistotsene i golotsene // Nauka i Obrazovanie. 2015. №1(77). P. 32–49.
6. Spektor V.V. Proiskhozhdenie kriolitogennykh kompleksov vysokoi ravniny Leno-Amginskogo mezhdurech'ya. Avtoref. dissertatsii na soiskanie uch. step. kandidata geograficheskikh nauk po spets. 25.00.08. Yakutsk: Institut merzlotovedeniya SO RAN, 2003. 23 p.
7. Mezhdgosudarstvennyi standart. GOST 5180-84. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya fizicheskikh kharakteristik. Moskva: Standartinform, 2005. 19 p.
8. Mezhdgosudarstvennyi standart. GOST 12536-79. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya granulometricheskogo (zernovogo) i mikroagregatnogo sostava. Moskva: IPK Izdatelstvo Standartov, 2008. 18 p.
9. Blott S.J., Pye K. Gradistat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments // Earth Surface Processes and Landforms. 2001. Vol. 26. P. 1237–1248. Doi:10.1002/esp.261.
10. Metody khimicheskogo analiza prirodnikh vod: metodicheskiye ukazaniya / G.P. Levchenko, V.N. Ma-

karov. Yakutsk: Izdatelstvo Instituta merzlotovedeniya SO RAN, 2003. 86 p.

11. *Gidrogeokhimicheskie* issledovaniya kriolitozony Tsentralnoy Yakutii / N.P. Anisimova, N.A. Pavlova. Novosibirsk: Akademicheskoe izdatelstvo "GEO", 2014. 189 p.

12. *Dereviagin A. Yu., Chizhov A. B., Meyer H., Opel T.* Sravnitelny analiz izotopnogo sostava povtorno-zhilnykh i tekturnykh ldov poberezh'ya morya Laptevykh // *Kriosfera Zemli*. 2016. Vol. XX, No. 2. P. 15–24.

13. *Osnovy izotopnoi geokriologii i glyatsiologii: Uchebnik* / Yu.K. Vasil'chuk, V.M. Kotlyakov. Moskva: Izdatelstvo MGU, 2000. 616 p.

14. *Spravochno-informatsionny* portal «Pogoda i klimat». <http://www.pogodaiklimat.ru/history/24959.htm>

15. *Osnovy kriogeneza litosfery* / N.N. Romanovskii. Moskva: Izdatelstvo MGU, 1993. 336 p.

16. *Osnovy teorii litogeneza*. Tom II. Zakonomernosti sostava i razmeshcheniya gumidnykh otlozhenii / N.M. Strakhov. Moskva: Izdatelstvo AN SSSR, 1962. 2nd ed. 574 p.

About the authors

SPEKTOR Valentin Vladimirovich, candidate of geographical sciences, leading research scientist, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36 Merzlotnaya st., Yakutsk 677010, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-7791-0972>, vvspektor@mpi.ysn.ru;

JIN Huijun, PhD, research professor, State Key Laboratory of Frozen Soils Engineering (SKLFSE), Northwest Institute of Eco-Environment and Resources (NIEER), Chinese Academy of Sciences (CAS), 730000, 320 Donggang West Road, Lanzhou, Gansu, China, hjjin@lzb.ac.cn;

TORGOVKIN Nikolai Vladimirovich, candidate of geological and mineralogical sciences, research scientist, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36 Merzlotnaya st., Yakutsk 677010, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-2799-1468>, nick1805torg@gmail.com;

MAKSIMOV Georgii Timofeevich, junior research scientist, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36 Merzlotnaya st., Yakutsk 677010, Russia, <https://orcid.org/0000-0001-6747-8621>, mgt.qwerty@gmail.com;

SPEKTOR Vladimir Borisovich, doctor of geological and mineralogical sciences, principal research scientist, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36 Merzlotnaya st., Yakutsk 677010, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-4734-2396>, vspektor@mail.ru;

SYROMYATNIKOV Igor Innokentievich, candidate of geological and mineralogical sciences, research scientist, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36 Merzlotnaya st., Yakutsk 677010, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-4953-9704>, igor@mpi.ysn.ru.

Citation

Spektor V.V., Huijun Jin, Torgovkin N.V., Maksimov G.T., Spektor V.B., Syromyatnikov I.I. Structural features of Pleistocene cryogenic deposits in the Lena and Amga Rivers Plain (Central Yakutia) // *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2020, Vol. 25, No. 3. P. 49–62. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-5>