

Палеогляциология

УДК 551.345

<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-4-367>

Строение и формирование ледогрунтовых жил второй озёрно-аллювиальной террасы на севере Гыдана в позднем неоплейстоцене–голоцене

© 2019 г. Я.В. Тихонравова^{1,7*}, А.В. Лупачев², Е.А. Слагода^{1,3,4}, В.В. Рогов^{1,5},
А.О. Кузнецова¹, В.И. Бутаков^{1,4}, Г.В. Симонова⁶, Н.А. Таратунина⁵, Д.Р. Муллануров⁴

¹Институт криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН, Тюмень, Россия; ²Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, г. Пушкино, Россия; ³Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия;

⁴Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия; ⁵Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; ⁶Институт мониторинга климата и экологических систем СО РАН, Томск, Россия;

⁷Институт мерзлотоведения им. П.И.Мельникова СО РАН

*tikh-jana@yandex.ru

Structure and formation of ice-ground veins of the second lake-alluvial terrace in the North of Gydan in the late Neopleistocene–Holocene

Ya.V. Tikhonravova^{1,7*}, A.V. Lupachev², E.A. Slagoda^{1,3,4}, V.V. Rogov^{1,5}, A.O. Kuznetsova¹,
V.I. Butakov^{1,4}, G.V. Simonova⁶, N.A. Taratunina⁵, D.R. Mullanurov⁴

¹Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russia;

²Institute of Physicochemical and Biological Problems at Soil Science, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russia; ³Tyumen State University, Tyumen, Russia; ⁴Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia; ⁵Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;

⁶Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia;

⁷Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

*tikh-jana@yandex.ru

Received February 27, 2018 / Revised March 20, 2019 / Accepted June 13, 2019

Keywords: botanical composition of peat, composite wedge, ice wedge, radiocarbon age, segregated ice, texture and structure of ice, thermokarst.

Summary

The syngenetic ice and ice-ground composite veins in khasyrey (alás) and interalás plateaus were studied on the second lake-alluvial terrace located in the North of the Gydan Peninsula near the village of Gyda. On the basis of the radiocarbon dating, the time of formation of deposits containing veins from was established – from 16 640 to 854 BP. The peat deposits are mainly represented by the following species: *Carex sp.*, *Eriophorum sp.*, *Betula nana*, *Equisetum sp.*, *Calamagrostis sp.*, *Vaccinium vitis-idaea*, *Drepanocladus sp.*, *Empetrum sp.*, *Vaccinium uliginosum*, *Rubus arcticus*, *Petasites sp.* It is established that the polygonal-veined ice of khasyrey and interalás plateaus, except for vertical-striped «clean» ice, contain areas with vertical wavy streaks of ice-ground. Ice of elementary veins and segregation ice were revealed in the composition of veins according to structural and textural features in polarized light. Elementary ice veins compose «clean» ice sections of veins and segregation ice which are their ice-ground sections. Elementary veins are indicative of the predominance of the process of frost cracking during the formation of polygonal-vein ices. The presence of inclusions of ice-ground in the structure of veins points is evidence of a manifestation of local thermokarst processes under the growth of polygonal-vein ice. Ice-ground veins were formed by repeated thawing of the initial ice veins. The formation of ice-ground veins during syngenetic freezing of sediments of the second lake-alluvial terrace is related to uneven manifestation of thermokarst in different facies situations and and climate changes at the Early Pleistocene and Holocene.

Citation: Tikhonravova Ya.V., Lupachev A.V., Slagoda E.A., Rogov V.V., Kuznetsova A.O., Butakov V.I., Simonova G.V., Taratunina N.A., Mullanurov D.R. Structure and formation of ice-ground veins of the second lake-alluvial terrace in the North of Gydan in the late Neopleistocene–Holocene. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2019. 59 (4): 557–570. [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-4-367>.

Поступила 27 февраля 2018 г. / После доработки 20 марта 2019 г. / Принята к печати 13 июня 2019 г.

Ключевые слова: ботанический состав торфа, ледогрунтовые жилы, полигонально-жильный лёд, радиоуглеродные датировки, сегрегационный лёд, структура и текстура льда.

Изучены сингенетические ледяные и ледогрунтовые жилы, а также сезонно- и мёрзлые отложения на севере Гыданского полуострова. Включение сегрегационного льда в состав полигонально-

жильного проходило в период сингенетического промерзания осадков второй террасы на севере Гыдана в динамичной озёрно-аллювиальной обстановке и связано с неравномерным проявлением термокарста во второй половине сартанского периода и в голоцене.

Введение

Полигонально-жильные льды изучают с начала XX в., но до сих пор остаётся ряд нерешённых вопросов, касающихся как участия разных типов льда в строении жил, так и их структурно-текстурных признаков. Большинство исследователей придерживаются контракционной теории А.Е. Фигуринна и А.А. Бунге, заключающейся в морозобойном растрескивании зимой, затекании и замерзании в трещинах, в основном, талых снеговых вод весной с образованием элементарных жилок льда, которые слагают полигонально-жильные льды [1]. Кристаллы элементарных жилок льда растут от стенок морозобойной трещины к центру, образуя осевой шов (линия смыкания кристаллов), часто с зажатými плёнками мути и пузырьками воздуха [1, 2]. Зажатые между кристаллов элементарных жилок органические, минеральные примеси, плёнки мути и пузырьки воздуха придают вертикально-полосчатую текстуру льда жилы. Структурные характеристики полигонально-жильных льдов подтверждают эту теорию — лёд слагают главным образом элементарные жилки льда, сохранённые и перекристаллизованные [3] (метаморфизованные [2]).

В полигонально-жильном льду, кроме элементарных жилок, отмечают другие типы льда — прозрачного или замутнённого рассеянными органическими, минеральными частицами с вертикальной полосчатостью или без неё [1–5]. В.И. Соломатин указывал на наличие каймы сегрегационного льда на боковых контактах жил с вмещающими отложениями, а также установил зависимость размеров кристаллов элементарных жилок от температуры пород при замерзании воды в морозобойных трещинах [6]. Н.Н. Романовский [7] отмечал зависимость морфологии, состава и строения полигонально-жильных льдов от фациальной обстановки, а также участие сегрегационного льда в их фронтальном росте.

Кроме ледяных жил, исследователи выделили ледогрунтовые жилы и «хвосты» полигонально-жильных льдов, состоящие из чередующихся вертикально-волнистых прожилков льда и грунта [7]. Ледогрунтовые жилы изучены менее детально по сравнению с обычными полигонально-жильными

льдами, поэтому их формирование остаётся дискуссионным. В.В. Баулин [8] считал, что их образование связано с затеканием в морозобойные трещины разжиженного грунта и последующим его замерзанием, что приводит к сегрегационному льдовыделению. Формирование ледогрунтовых жил объясняют также протаиванием грунта вокруг ледяной жилы за счёт отепляющего воздействия полых вод и последующего замерзания этой зоны с сегрегационным льдовыделением [9–10]. Е.М. Катасонов [11] связывал образование ледогрунтовых окончаний жил с формированием морозобойных трещин на расстоянии друг от друга. На приморских низменностях и островах моря Лаптевых такие ледогрунтовые образования относят к песчано-ледяным жилам [12, 13] — переходной форме между полигонально-жильными льдами и первично-песчаными жилами, возникшими за счёт чередования заполнения морозобойных трещин талой водой и эоловыми песками [7]. Песчано-ледяные жилы, формирующиеся в сухих условиях с интенсивной дефляцией и ветровым перераспределением снега, установлены в Антарктиде на Земле Виктории [14].

Структурно-текстурные характеристики разных элементов строения жил, включений в полигонально-жильный лёд и особенно ледогрунтовых жил исследованы недостаточно. Для решения дискуссионных вопросов о формировании ледогрунтовых жил и включений были изучены морфология, структурно-текстурные характеристики ледяных и ледогрунтовых жил на севере Гыдана, а также установлена связь с обстановкой их образования в позднем неоплейстоцене—голоцене.

Методы исследований

Для определения возраста и обстановки накопления отложений, вмещающих полигонально-жильные льды, выполнены ботанический анализ и радиоуглеродное датирование. Ботанический состав торфа (16 проб) определён в Институте криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН (ИКЗ ТюмНЦ СО РАН) под микроскопом [15, 16] в микропрепаратах, изготовленных по методу Фаегри—Иверсена [17], и

Таблица 1. Радиоуглеродный возраст растительных остатков в отложениях второй озёрно-аллювиальной террасы в районе устья р. Гыда

Рас- чистка	Высота от уре- за, р. Гыда, м	Лабораторный номер	Радиоуглерод- ный возраст (BP)	Калиброванный возраст OxCal v4.3.2 (cal BP)	
				Вероятность 68,2%	Вероятность 95,4%
B5	5,8–6,0	ИМКЭС-14C1256	16 640±500	20 730–19 480	21420–18930
B5	8,8–8,75	ИМКЭС-14C1262	10 040±450	12 420–11 100	12770–10400
B5a	8,7–8,82	ИМКЭС-14C1259	8350±100	9490–9250 (67,5%); 9160–9150 (0,7%)	9530–9090
B5a	8,82–9,0	ИМКЭС-14C1167	7720±100	8600–8410	8950–8300
B5a	9,0–9,1	ИМКЭС-14C1166	8040±100	9100–8700	9250–8600
B5a	9,1–9,2	ИМКЭС-14C1172	7990±80	9000–8700	9030–8600
B5a	9,2–9,26	ИМКЭС-14C1269	6560±100	7570–7410 (65,3%); 7350–7330 (2,9%)	7610–7270
B5a	9,26–9,3	ИМКЭС-14C1266	6360±110	7450–7150	7480–7000
B5a	9,3–9,38	ИМКЭС-14C1254	5450±100	6400–6100 (66,5%); 6050–6000 (1,7%)	6440–5990
B5a	9,38–9,44	ИМКЭС-14C1255	3530±100	4000–3600	4090–3570
B4	1,03–1,05	ИМКЭС-14C1257	12 230±300	14 760–13 770	15250–13480
B4	2,77–2,8	ИМКЭС-14C1268	3500±100	3900–3640	4100–3500
B4	2,8–2,88	ИМКЭС-14C1244	4030±100	4850–4750 (8,4%); 4700–4400 (59,9%)	4830–4240
B4	2,88–2,92	ИМКЭС-14C1093	4680±100	5600–5300	5650–5050
B4	2,92–2,95	ИМКЭС-14C1232	2900±120	3210–2870	3350–2780
B4	2,95–2,97	ИМКЭС-14C1243	854±96	910–860 (15,2%); 830–680 (53%)	960–650

с помощью атласов-определителей современных растений тундры и лесотундры Западной Сибири. Радиоуглеродное датирование 16 проб выполнено жидкостно-сцинтилляционным методом на спектрометре-радиометре Quantulus в Институте мониторинга климата и экологических систем СО РАН. Для калибровки радиоуглеродных дат использована программа OxCal 4.3 [18, 19]. Структура и текстура льда изучены в ИКЗ ТюмНЦ СО РАН с помощью поляроида. Фотографии льда в поляризованном свете обрабатывали в программе «Crystal» [20], были определены количественные параметры кристаллографических характеристик (12 образцов).

По методике В.В. Рогова вычислены [3]: средний поперечник кристаллов D , рассчитываемый как диаметр круга, равного средней площади кристалла в шлифе; коэффициент удлиненности C_{el} , вычисляемый как отношение максимальной диагонали кристалла в шлифе к D ; коэффициент формы C_f , рассчитываемый как отношение среднего периметра границ кристаллов к длине окружности круга, равной площади кристалла; коэффициент различия размеров кристаллов C_{diff} , рассчитываемый как отношение максимального периметра кристалла к минимальному в шлифе.

По ранее установленным данным средний размер поперечника кристаллов элементарных жилок составляет 0,2 см [20, 21]; основного массива метаморфизованных [2] кристаллов – 0,2–0,6 см; моло-

дых ростков полигонально-жильного льда – 0,16–0,2 см [21]. Данные по радиоуглеродному возрасту растительных остатков и кристаллографические характеристики льда приведены в табл. 1 и 2.

Строение отложений второй озёрно-аллювиальной террасы

Район исследований на севере Гыданского полуострова (рис. 1, А) расположен в зоне сплошного распространения мёрзлых пород, которые залегают на глубине от 1,0–1,5 м. Мощность мерзлотных образований Северо-Гыданской области колеблется от 200 до 435 м, среднегодовые температуры пород – от –8 до –10 °С [22]. В районе с. Гыда были изучены межаласья (останцы II озёрно-аллювиальной террасы) [23] и крупный хасырей размером более 1 км, затапливаемый в половодье и представляющий собой сниженную термокарстовыми процессами поверхность террасы с многочисленными озёрами. Абсолютная высота поверхности изученных останцов террасы достигает 9–11 м и снижается до 6–4 м на склонах. Останцы террасы разделены эрозионно-термокарстовыми ложбинами и хасыреями с относительными высотами берегов до 4 м от уреза р. Гыда. Поверхность всех геоморфологических элементов имеет выраженный полигональный микрорельеф (см. рис. 1, Б). Ю.К. Васильчук [24, 25] изучил от-

Таблица 2. Количественные параметры кристаллов ледяных и ледогрунтовых жил на останцах и в хасырее второй озёрно-аллювиальной террасы в районе устья р. Гыда*

Номер расчистки	Примечание	Срез**	Параметры								
			высота от уреза р. Гыда, м	S , см ²	D , см	P , см	C_f	C	C_{el}	C_{diff}	
Останец террасы											
<i>Ледяная жила 1-й генерации</i>											
В5-2016		с	3,5	0,1	0,45	1,6	1,1	0,4	1,0	4	
		а		0,1	0,42	1,4	1,1	0,4	1,0	4	
<i>Ледяная жила 2-й генерации</i>											
В5-2016		с	7,0	0,1	0,44	1,5	1,1	0,4	1,0	12	
		а		0,3	0,73	2,6	1,1	0,3	1,0	6	
<i>Ледогрунтовая жила 2-й генерации</i>											
В3-2016	Минеральный прожилок	с	1,0	0,04	0,25	0,8	1,0	0,5	0,9	8	
	Ледяной прожилок	а		0,2	0,54	2,0	1,1	0,8	1,1	3	
	Минеральный прожилок	а		0,03	0,22	0,7	1,0	0,6	1,0	6	
В5-2016		с	5,0–5,3	0,2	0,62	2,2	1,1	0,5	1,0	4	
		а		0,1	0,49	1,7	1,1	0,4	1,0	6	
Хасырей											
<i>Ледяная часть жилы</i>											
В4-2016	Основной массив льда	с	2,1	0,04	0,27	0,9	1,0	0,2	1,0	13	
В4-2016		а		0,03	0,24	0,7	1,0	0,2	0,9	25	
В4-2016		Элементарная жилка		а	0,01	0,11	0,4	1,1	0,5	1,0	6
<i>Контакт «чистого» льда и ледогрунта в жиле</i>											
В4-2016	Чистый лёд	с	2,25	0,05	0,28	0,9	1,0	0,3	0,9	5	
В4-2016	Минеральный прожилок			0,01	0,15	0,5	1,0	0,3	1,0	11	
В4-2016	Чистый лёд			0,05	0,31	0,9	1,0	0,2	0,9	43	
В4-2016	Минеральный прожилок			0,01	0,14	0,4	1,0	0,3	1,0	10	
В4-2016	Зона крупных кристаллов сегрегационного льда			а	0,1	0,43	1,4	1,0	0,5	1,0	15
В4-2016	Элементарная жилка в зоне крупных кристаллов сегрегационного льда			а	0,01	0,15	0,5	1,0	0,5	1,0	13

*Параметры кристаллов: S – средняя площадь кристаллов с поправочным коэффициентом П.А. Шумского [4]; D – средний поперечник кристаллов [2]; P – средний периметр кристаллов с поправочным коэффициентом П.А. Шумского [4]; C_f – коэффициент формы; C – коэффициент извилистости границ кристаллов; C_{el} – коэффициент удлиненности; C_{diff} – коэффициент различия размеров кристаллов. **Срезы шлифа: а – вертикальный поперечный; с – горизонтальный.

ложения с подземными льдами в разрезах высотой 6–7 м около с. Гыда и отнёс их ко второй половине сартанского периода – 14–11 ВР. В строении толщи он выделил полигонально-жильные льды и пластовые линзообразные залежи инфильтрационно-сегрегационного льда.

Изученный крупный хасырей с относительной высотой поверхности 3 м обрамлён с востока высокой поверхностью до 10 м, а на западе ступенчато снижается к более низким заболоченным днищам спущенных озёр. В хасырее отмечен бугор пучения диаметром до 60 м и высотой 3 м, поверхность которого осложнена выпуклыми полигонами шириной до 15 м и межполигональными понижениями глубиной 1,2 м. Разрезы отложений останцов террасы изучены в расчистках В3, В5, В5а и хасырея – В4 (см. рис. 1, Б) [26].

Расчисткой В3 (с.ш. 70°54'21,7", в.д. 078°30'16,1"; см. рис. 1, В), расположенной на сниженном до 4 м останце террасы с пятиугольными полигонами на поверхности, вскрыта нижняя часть разреза. Расчистка под межполигональным понижением с оползшим торфом вскрыла ледогрунтовое окончание жилы и клиновидную псевдоморфозу над ним. Псевдоморфоза шириной вверху 0,8 м и высотой 0,9–1,5 м выполнена слоистыми ожелезнёнными песками и супесями, её окончание местами проникает в нижележащую жилу в виде прожилков охристого песка. Вблизи псевдоморфозы слои песков и супесей изогнуты вверх. До глубины 1 м породы талые, ниже – мёрзлые. Ледогрунтовая жила вместе с трещинным льдом [20] залегает в супесях с прослоями песка и растительных остатков, которые отнесены к аллювиальным осадкам поймы [27].

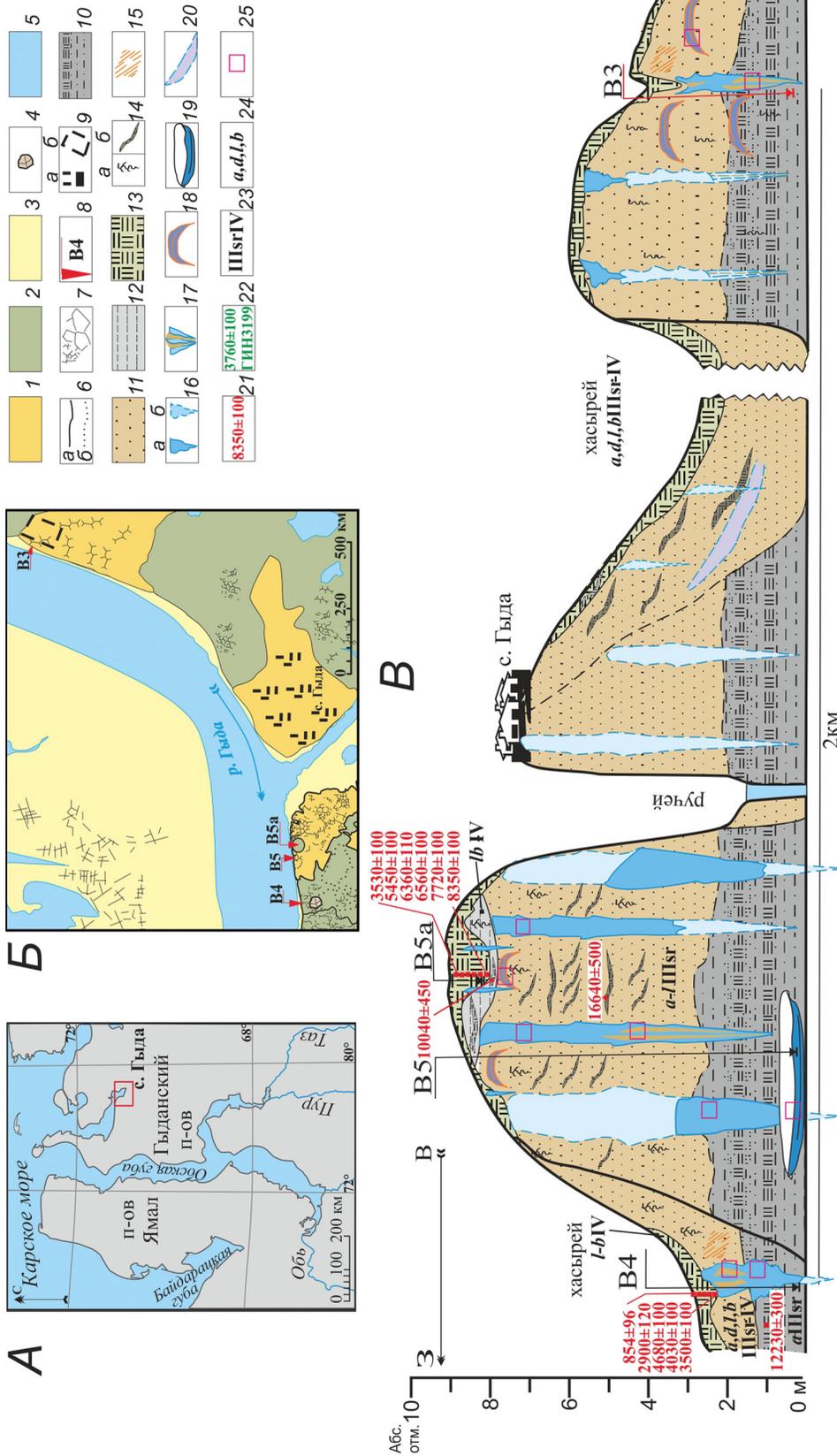


Рис. 1. Район исследований (А), расположение расчисток (Б) и разрез (В) в пределах II озёрно-аллювиальной террасы: 1 – останцы террасы (плакоры); 2 – эрозивно-термокарстовые ложбины и хасырей; 3 – пойма, пляжи и прирусловые отмели; 4 – бурог пучения в хасырей; 5 – гидросеть; 6 – контуры геоморфологических уровней (а), контуры береговых линий осушенных озёр (б); 7 – полигональный рельеф; 8 – расчистки; 9 – застро-енная территория с. Гыда (а), карьер (б); 10 – супеси с растительным детритом и прослоями песка [26]; 11 – супеси [26]; 12 – супеси [26]; 13 – горф автохтонный; 14 – нитевидные корешки трав *in situ* (а), линзы, прослои намытых растительных остатков близкого перемещения и переложения (б); 15 – охристые пятна; 16 – полигонально-жильный лёд вскрытый (а), предполагаемый (б); 17 – ледогрунтовые элементы строения жилы; 18 – трещинный лёд [18]; 19 – лёд термо-абразионной ниши [20, 27]; 20 – лёд пластовой линзовидный (по данным Ю.К. Васильчука [24]); 21 – радиоуглеродные даты растительных остатков по данным авторов (см. табл. 2); 22 – радиоуглеродные даты растительных остатков (по данным Ю.К. Васильчука [24]); 23 – возраст отложений: сартанский, голоценовый; 24 – те негиз отложений; аллювиальный (а), делювиальный (а), озёрный (а), болотный (б); 25 – места отбора образцов

Fig. 1. Research area (A), location of cross sections (B) generalized section (B) within the geomorphic levels of the 2d the lacustrine-fluvial terraces. 1 – remnants of the terrace (flat watershed); 2 – erosion-thermokarst depressions and khasyres; 3 – floodplain, beaches and hursts; 4 – permafrost mound in the khasyrey; 5 – hydrographic system; 6 – geomorphic levels (a), drained lake coastline (б); 7 – polygonal relief; 8 – cross sections; 9 – Gyuđa village (a), quarry (б); 10 – loamy sand with plant detritus and sand interbeds [26]; 11 – sand [26]; 12 – loamy sand [26]; 13 – autochthonous peat; 14 – thin roots (*in situ*) (a), lens, interbeds of allochthonous plant rem-nants transported from adjacent places (б); 15 – ferruginous spots; 16 – ice wedge; observed (a), supposed (б); 17 – composite part of wedge; 18 – crack ice [18]; 19 – ice of thermoabrasional niche [20, 27]; 20 – lenticular-shaped massive ice (by Yu.K. Vasil'chuk [24]); 21 – radiocarbon data by authors (see table 2); 22 – radiocarbon data by Yu.K. Vasil'chuk [24]; 23 – sediment age: Sartaan, Holocene; 24 – genesis of deposits: alluvial (a), deluvium (a), lacustrine (a), bog (б); 25 – sampling place

Расчистками В5, В5а (с.ш. $70^{\circ}53'33,6''$, в.д. $078^{\circ}27'48,7''$; см. рис. 1, В), расположенными на останце террасы высотой 9,5 м над урезом р. Гыда, вскрыта верхняя часть разреза. Поверхность останца с пологим склоном к крупному хасырею сухая, покрыта мохово-травянистой и кустарничковой растительностью с карликовой берёзкой и ивой в понижениях. Полигональный рельеф образован пятиугольными полигонами разного размера: крупными — до 18 м, средними — до 8 м и мелкими — до 2,5–4,0 м. Расчисткой вскрыты полигонально-жильные льды с плечиками: а) нижняя половина крупной ледяной жилы первой генерации, верхняя часть которой вытаяла и размыта, а окончание уходит под урез реки; б) ледяная и ледо-грунтовая жилы второй генерации. Ледо-грунтовая жила второй генерации внедрена в нижележащую жилу первой генерации. Слоистость вмещающих полигонально-жильные льды отложений изгибается вверх вдоль жил. Нижние 1,5 м разреза размыты в термоабразионной нише с современным льдом и закрыты осыпью; верхняя часть разреза осложнена блоками отседания с трещинным льдом [20] (см. рис. 1, В). Средняя часть разреза, сложенная песками с намытыми растительными остатками, отнесена к сингенетически промерзавшим аллювиальным осадкам прирусловых отмелей, которые накапливались в первую половину сартанского времени позднего неоплейстацена (см. рис. 1, В, см. табл. 1). Супеси в верхней части разреза накапливались около $10\ 040 \pm 450$ ВР (ИМКЭС-14С1262) в небольшом термокарстовом озере на останце террасы, а покровный торф — во время его заболачивания и осушения. В расчистке В5а в нижних слоях торфа над озёрными отложениями (см. рис. 1, В), преобладают остатки *Sphagnum sp.* и *Hypnales sp.*, характерные для зарастающих мелких водоёмов, а вверху — остатки *Carex sp.*, *Eriophorum sp.*, присутствуют кустарнички, в том числе *Betula nana*, что указывает на осушение заболоченного участка. В нижней части торфа имеется инверсия датировок (см. табл. 1), по-видимому, связанная с про-садками и оползанием над вытаявающими полигонально-жильными льдами.

Расчисткой В4 (с.ш. $70^{\circ}53'32,0''$, в.д. $78^{\circ}26'59,5''$; см. рис. 1, Б, В) в береговом обрыве высотой 3 м от уреза р. Гыда и в 0,3 км от склона останца террасы вскрыты отложения крупного хасырея. На поверхности хасырея выражены плоские полигоны пятиугольной трапециевидной формы попе-

речником от 15–16 м до 6 м, а также межполигональные понижения шириной до 1,5 м и глубиной 0,3–0,4 м. Под понижением вскрыты полигонально-жильный лёд с ледо-грунтовыми включениями и торфяная псевдоморфоза над ним. Окончание псевдоморфозы внедрено в жилу. Нижняя часть разреза закрыта современными осадками пляжа р. Гыда. Отложения крупного хасырея внизу разреза представлены мёрзлыми сингенетически промерзавшими заторфованными супесями — осадками поймы второй половины сартанского времени (см. табл. 1). Вверху разрез сложен слоистыми охристыми песками, которые отнесены к субаэральным делювиальным и аллювиальным осадкам [26] предположительно раннего голоцена.

Инволюции и охристая окраска пород обусловлены повторяющимися увеличениями глубины протаивания, вероятно связанными с половодьями при сингенетическом промерзании. На контакте с жилой в песчаных отложениях фиксируется вертикально-плотчатая криогенная текстура. Покровный торф мощностью 0,2–0,5 м — слоистый: внизу — наклонная перемятая слоистость с линзами супеси (криотурбирован); вверху — горизонтально-слоистая с присыпками песка. По данным ботанического анализа, торф внизу — осоковый разложенный, содержит корешки *Eriophorum sp.*, *Carex sp.*, *Equisetum sp.*, *Calamagrostis sp.*, *Vaccinium vitis-idaea*, листья мха *Drepanocladus polygamus* с примесью *Betula nana*; торф вверху отличается высоким содержанием *Betula nana*, постепенным увеличением доли кустарничков — *Empetrum sp.*, *Vaccinium uliginosum*, *Rubus arcticus* и травянистых — *Eriophorum sp.*, *Carex sp.*, *Equisetum sp.*, *Petasites sp.*, появлением мха *Sphagnum sp.* и отсутствием мха *Drepanocladus* [27]. Датировки в нижней части торфа имеют обратную последовательность (см. табл. 1), что, по-видимому, связано с перемывом и переворотом кочек и торфяных блоков.

Структурно-текстурные характеристики льда

Ледяные и ледо-грунтовые жилы останца II террасы. Ледяная жила первой генерации шириной около 2 м с видимым вертикальным размером 4–4,5 м (расчистка В5, высота от уреза р. Гыда 3,5 м; см. рис. 1, В) имеет вертикальную полосчатость, образованную круглыми воздушными пузырьками и редкими тонкими прожилками

(толщиной до 5 мм) минеральных частиц и растительного детрита. В поляризованном свете выражена чёткая ровная вертикальная полосчатость, образованная осевыми швами элементарных жилок, однако характерные для них кристаллы — удлинённые по нормали к шву — не установлены, что указывает на перекристаллизацию льда [3]. Основной массив льда сложен однородными по размеру изометричными, иногда слабоудлинёнными и хаотично ориентированными кристаллами (см. табл. 2).

Ледяная жила второй генерации шириной 1–1,5 м с видимым вертикальным размером более 4,5 м (расчистка В5, высота от уреза р. Гыда 7 м; см. рис. 1, В) имеет субвертикальные прожилки песка и супеси (толщиной 0,5–3 мм), прерывистые, параллельные с резкими границами, и вертикальные цепочки крупных круглых пузырьков воздуха. В поляризованном свете выделяется вертикально-полосчатая текстура от сохранившихся осевых швов элементарных жилок. Основной массив льда формируют однородные по размеру изометричные кристаллы, иногда слабоудлинённые (рис. 2, В), характерные для перекристаллизованных элементарных жилок. Размеры кристаллов в вертикальном срезе больше, чем в горизонтальном (см. табл. 2). Вблизи редких минеральных прожилков отмечены мелкие кристаллы, не включённые в расчёт параметров кристаллов основного массива льда.

Ледогрунтовая жила второй генерации (расчистка В5, высота от уреза р. Гыда 5–5,3 м; см. рис. 1, В и рис. 2, А) состоит из чередования параллельных вертикально-волнистых чётко ограниченных прожилков преобладающего льда и тонкодисперсного грунта. Во льду отмечено небольшое количество круглых пузырьков воздуха. В поляризованном свете чётко выделяются мелковолнистые изогнутые параллельные друг другу швы смыкания кристаллов с защемлёнными мелкими пузырьками воздуха и плёнками мути, которые отличаются от осевых швов элементарных жилок. Изометричные и слабоудлинённые параллельно прожилкам кристаллы льда повторяют вертикально-волнистую слоистость грунта внутри жилы (см. рис. 2, Б), что характерно для сегрегационного льда [3, 4]. Размеры кристаллов в горизонтальном срезе больше, чем в вертикальном (см. табл. 2).

Ледогрунтовый «хвост» жилы второй генерации (расчистка В3, высота от уреза р. Гыда 1 м; см. рис. 1, В) состоит из чередования вертикально-волнистых прожилков льда, песков разной круп-

ности и супеси. В прожилках грунта отмечены криогенные микротекстуры: вертикально-волнистая слоистая плейчатая (2); массивная (3); тонкая параллельная линзовидная (4); порфирировидная (5); грунты разделены вертикальными и извилистыми прожилками льда (1) разной толщины (см. рис. 2, Г). Криогенные микротекстуры грунта в жиле по ориентировке не совпадают с горизонтальными линзовидными и плейчатыми криогенными текстурами вмещающих пород. В ледяных прожилках в поляризованном свете отсутствуют образованная кристаллами полосчатая текстура и швы элементарных жилок. В тонких (до 0,5 см) прожилках льда кристаллы вытянуты в виде цепочки между ровных (уплотнённых) стенок грунта и имеют пластинчатую форму. В прожилках более 1 см кристаллы слагают несколько рядов, имеют изометричную, слабоудлинённую и неправильную формы. Кристаллы льда согласованы с вертикально-волнистой слоистостью грунта, что характерно для сегрегационного льда [1, 3].

Ледогрунтовая жила в отложениях крупного хвосты второй террасы. Полигонально-жильный лёд шириной 0,3–0,5 м с вертикальным размером 1,5 м (расчистка В4, см. рис. 1, В) в нижней части представлен расширенным за счёт плечиков «чистым» льдом, а в верхней — более узкой и неравномерно обтаявшей кровлей и ледогрунтовыми включениями сбоку и в центре жилы. Вертикально-вытянутые включения ледогрунта состоят из прожилков льда, супеси и тонкого песка; изометричные включения песка с внедрениями торфа из псевдоморфозы без видимых включений льда секут жилу (рис. 3, А).

Ледяная нижняя часть жилы (высота от уреза р. Гыда 2,1 м) имеет полосчатую текстуру из вертикально ориентированных цепочек круглых и вытянутых пузырьков воздуха, отдельных включений растительного детрита и плёнок мути. В поляризованном свете выражена чёткая ровная вертикальная полосчатость льда за счёт осевых швов элементарных жилок с зажатыми между кристаллами пузырьками воздуха. Основной массив льда сложен неоднородными по размеру изометричными кристаллами. Фрагменты элементарных жилок состоят из ориентированных перпендикулярно осевому шву удлинённых кристаллов (см. рис. 3, В, см. табл. 2).

Ледогрунтовое включение в верхней части жилы расположено между «чистым» льдом жилы и вмещающей породой (высота от уреза р. Гыда 2,2 м)

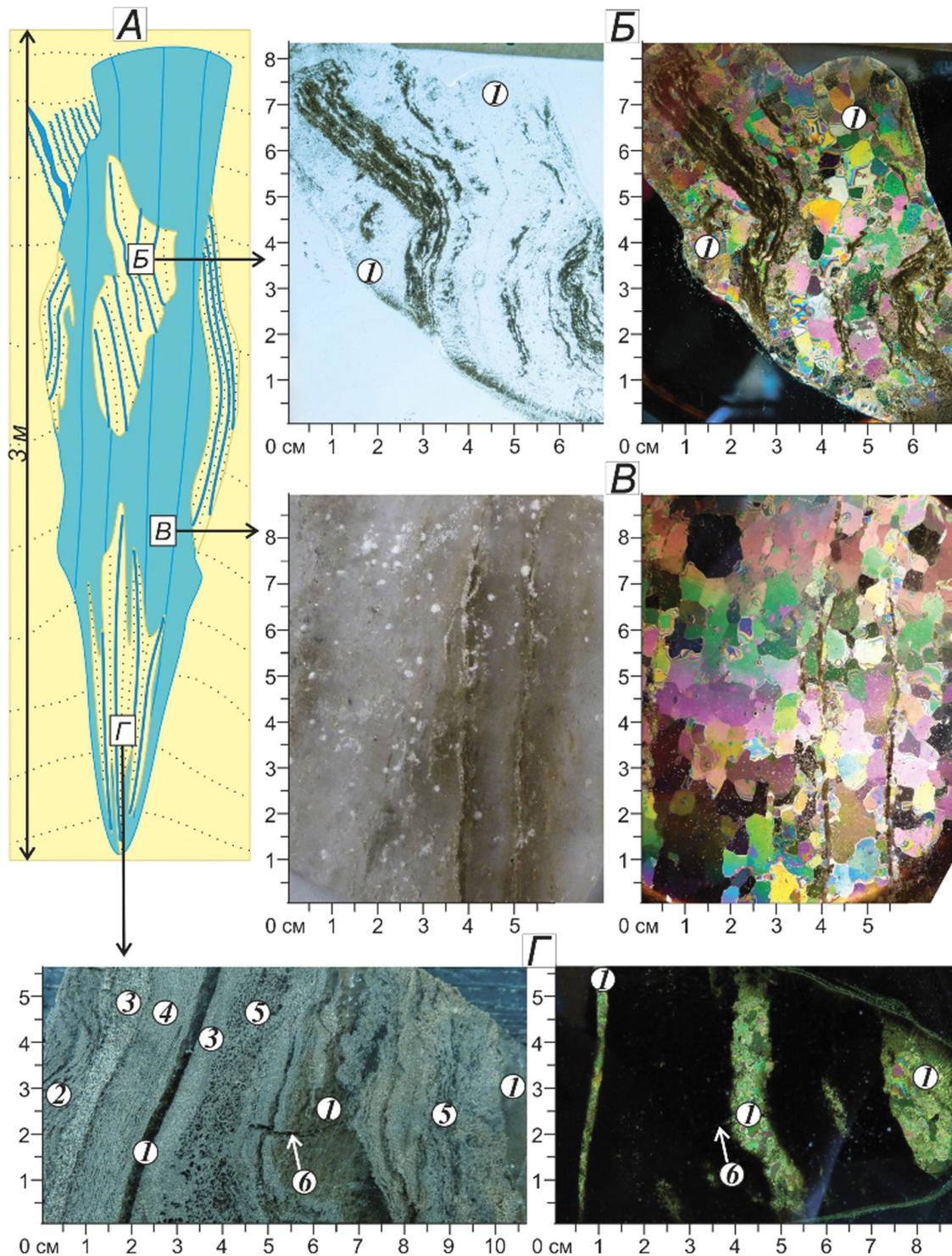


Рис. 2. Схема ледогрунтовой жилы (А) и строение шлифов в проходящем и поляризованном свете: ледогрунтовая часть из расчистки В5 на высоте 5,0–5,3 м (Б); ледяная часть из расчистки В5 на высоте 7,0 м (Б); ледогрунтовый «хвост» из расчистки В3 на высоте 1,0 м (Г).
 1 – прожилок льда; 2–6 – криогенные микротекстуры: вертикальная плойчатая (2); массивная (3); тонкая вертикально-линзовидная (4); порфириовидная (5); 6 – горизонтальная трещина

Fig. 2. Scheme composite wedge structure (А) and structure of thin section under the diffused and polarized light: composite zone from В5 cross-section on 5,0–5,3 m height (Б); ice zone from В5 cross-section on 7,0 m height (Б); composite ice-wedge «tail» from В5 cross-section on 1,0 m height (Г).

1 – icy interbed; 2–5 – cryogenic microstructures: vertica wavy lenticular (2); porous invisible (3); vertica lenticular (4); porous visible (5); 6 – horizontal crack

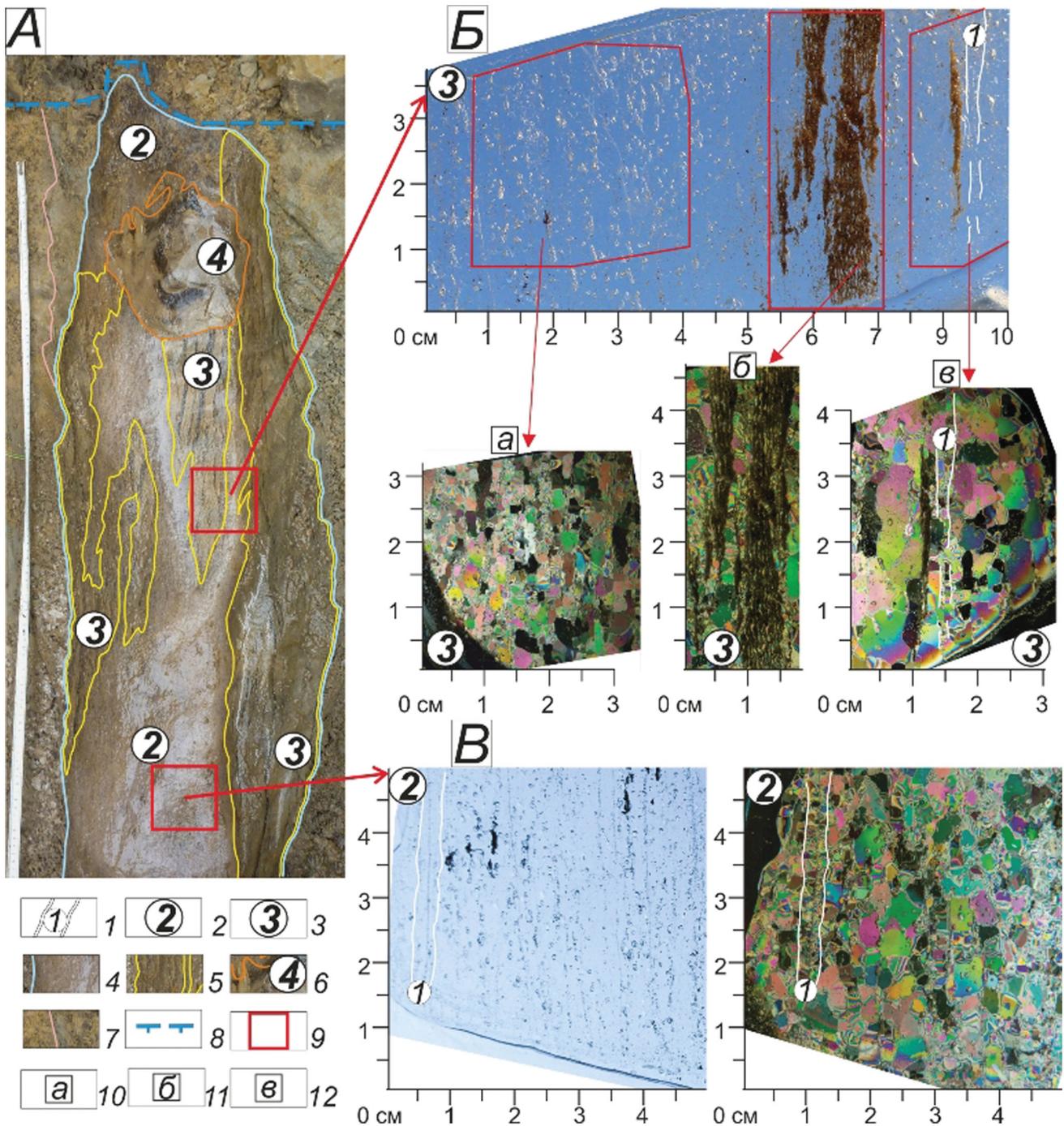


Рис. 3. Ледогрунтовая жила в расщелке В4 хасырея (А) и структурно-текстурные характеристики её элементов строения – ледогрунтовой части (Б) и ледяной части (В).

1 – элементарная жилка; 2 – ледяная часть жилы; 3 – ледогрунтовая часть жилы; 4 – граница жилы; 5 – граница ледогрунта; 6 – граница современной термоэрозионной промоины; 7 – граница субвертикально плейчатой криогенной текстуры на контакте с ледогрунтовой жилой; 8 – граница мёрзлых пород (05.08.2016 г.); 9 – место отбора монолитов; 10–12 – выделенные зоны в образце льдогрунта: льда морозобойных трещин (10); минерального прожилка с сегрегационным льдом (11); крупных кристаллов сегрегационного льда на контакте с вмещающей жилу толщей (12)

Fig. 3. Composite wedge within the khasyrey (drained lake) (A); texture and structure of the composite part of wedge (B) icy part of wedge (B).

1 – ice vein; 2 – ice part of wedge; 3 – composite part of wedge; 4 – ice wedge border; 5 – composite part border; 6 – border of the modern thermoerosion gully; 7 – sub-vertical wavy microlenticular cryostructure on the contact with composite wedge; 8 – depth of the active layer (05.08.2016); 9 – monolith sampling places; 10–12 – zones within composite part: wedge ice (10); mineral vertical layer with segregation ice (11); big crystal of the segregation ice on the contact to enclosing sediment (12)

и представлено чередованием вертикально-волнистых прожилков супеси и прожилков льда. В шлифе в поляризованном свете выделено три зоны (см. рис. 3, Б): «а» — «чистого» льда с вертикально-полосчатой текстурой из осевых швов элементарных жилок; «б» — вертикально-волнистого супесчаного прожилка в теле жилы; «в» — контакта льда жилы и вмещающих отложений. Зона «а» аналогична по строению вышеописанной нижней части ледяной жилы (см. табл. 2, см. рис. 3, Б, В), представлена изометричными кристаллами и фрагментами элементарных жилок из кристаллов, вытянутых перпендикулярно осевому шву. В зоне «б» внутри прожилка супеси мелкие кристаллы образуют вертикальные цепочки вдоль уплотнённых минеральных частиц и формируют вертикально-волнистую микролинзовидную криогенную текстуру. Зона «в» представлена в основном крупными вертикально-вытянутыми и изометричными кристаллами, которые пересечены элементарной жилкой с удлинёнными кристаллами, ориентированными перпендикулярно осевому шву (см. табл. 2, см. рис. 3, Б).

Обсуждение результатов

Для изученных полигонально-жилых льдов второй озёрно-аллювиальной террасы характерно присутствие вертикально-волнистых ледогрунтовых элементов строения с разным соотношением льда и грунта. Включения ледогрунта приурочены к разным частям ледяных жил — верхним и нижним, боковым и центральным участкам, что указывает на разное время их формирования. Ледяные жилы первой и второй генераций в сартанских отложениях останца второй террасы характеризуются признаками первичной кристаллизации: чёткой ровной вертикально-полосчатой текстурой, образованной осевыми швами элементарных жилок, иногда подчёркнутыми зажатými между кристаллами плёнками мути и пузырьками воздуха. Признаки первичной кристаллизации указывают на ведущий процесс морозобойного растрескивания при формировании ледяных жил. Кристаллы основного массива льда округлены и укрупнены приблизительно в два раза по сравнению с удлинёнными по нормали ко шву кристаллами современных элементарных жилок [20] (см. табл. 2). Это связано с перекристаллизацией льда жилы под длительным

воздействием более высоких отрицательных температур вмещающей толщи, чем при образовании элементарных жилок [3].

Ледогрунтовые жилы и «хвостовые» части полигонально-жилых льдов второй генерации сложены чередующимися вертикально-волнистыми прожилками сегрегационного льда и прожилками грунта, не содержащими элементарных жилок, т.е. признаков кристаллизации в морозобойных трещинах. Кристаллы сегрегационного льда существенно дифференцированы по размерам: для льда-цемента и микролинз в грунтовых прожилках значение D от $< 0,2$ см, в прожилках льда эта величина достигает $0,55$ см (см. табл. 2), что определяется количеством внутрigrунтовой влаги, дисперсностью пород и температурными условиями льдовыделения: низкие температуры приводят к быстрой кристаллизации и росту мелких кристаллов; высокие — к медленному росту более крупных кристаллов [3]. Протаивание полигонально-жилых льдов, образование полостей и заполнение их вмещающими и перекрывающими водонасыщенными тальми грунтами происходит летом. Промерзают эти полости преимущественно с двух сторон в осенне-зимний период при более высоких отрицательных температурах стенок полости, что способствует медленному льдовыделению и росту кристаллов сегрегационного льда, более крупных в прожилках льда и мелких между тонкими прожилками грунта.

Полигонально-жилый лёд в верхнесартанских—голоценовых отложениях хасырея в нижней части представлен льдом с вертикально-полосчатой текстурой, а в верхней части содержит ледогрунтовые элементы строения. В ледяной части жилы фрагментарно сохранились элементарные жилки с размерами кристаллов $D = 0,1$ см, указывающие на формирование льда за счёт морозобойного растрескивания. Ледогрунтовые элементы в верхней части жилы сложены мелкими кристаллами ($D = \sim 0,15$ см) сегрегационного льда, формирующими вертикальную микролинзовидную криотекстуру в прожилках супеси. На контакте с отложениями, вмещающими жилу, выделены крупные кристаллы сегрегационного льда с $D = 0,4$ см. Эти кристаллы пересечены элементарной жилкой, что указывает на продолжение морозобойного растрескивания после образования сегрегационного льда в жиле. Крупные кристаллы по форме и распределению подобны кри-

сталлам каймы сегрегационного льда, выделенной В.И. Соломатиным [2] в боковой части жилы.

Сравнение кристаллографических параметров полигонально-жильных льдов показало, что сартанские жилы останца террасы имеют худшую сохранность элементарных жилок — более округлые, однородные по размеру и укрупнённые в 2 раза кристаллы основного массива льда по сравнению с кристаллами жилы в верхнесартанско-голоценовых отложениях хасырея (см. табл. 2). Это указывает на сильную перекристаллизацию сартанских полигонально-жильных льдов останцов террасы в связи с более длительным их нахождением в мёрзлой толще [3]. Кристаллы сегрегационного льда в ледогрунтовых включениях сартанской жилы неоднородны по размеру и в среднем крупнее в 2–4 раза, чем в верхней части верхнесартанско-голоценовой жилы хасырея (см. табл. 2), что также может быть следствием как более высоких отрицательных температур промерзания, так и перекристаллизации. Близкие значения коэффициентов формы ($C_f = \sim 1$) и удлинения ($C_{el} = \sim 1$) не показательны для выделения сегрегационного льда в составе полигонально-жильного льда без учёта морфологии элементов строения жил, а также взаиморасположения, ориентировки и формы кристаллов, визуально выделяемых в шлифах в поляризованном свете. Чёткие отличия изученных ледяных и ледогрунтовых жил установлены при сравнении с позднеголоценовыми (современными) новообразованиями льда [20]. Позднеголоценовые элементарные жилки в районе р. Юрибей (п-ов Ямал) [20] имеют сходные кристаллографические параметры с приведёнными в данной статье: $C_f = \sim 1,1$; $C_{el} = \sim 1,0$; $C_{diff} = 7 \div 14$, но бóльшие размеры $D = \sim 0,2$ см. Другие типы современных льдов характеризуются однородными крупными размерами поперечника кристаллов D : термокарстово-полостной (термокарстово-пещерный по терминологии П.А. Шумского [2]) — $\sim 0,8$ см, трещинные — $\sim 1,4$ см, лёд термоабразионной ниши — $\sim 2,3$ см; их кристаллы имеют более вытянутую (C_{el} до 1,5 см) или неправильную форму с отростками (C_f до 1,59 см).

Образование двух генераций полигонально-жильных льдов второй террасы в изученном районе происходило в период накопления и сингенетического промерзания аллювиальных прирусловых и пойменных осадков. При формировании первой генерации крупных ледяных жил преобладал про-

цесс морозобойного растрескивания, что связано с холодными условиями раннего сартанского периода. В это же время, вероятно, начинали расти узкие ледяные жилы второй генерации. После ~ 20 тыс. cal BP (ИМКЭС-14C1256) (см. табл. 1) в связи с изменениями фациальных условий накопления осадков и локального термокарста под полигональными ваннами ледяные жилы второй генерации начали вытаивать с образованием полостей различной формы. При промерзании с боков этих полостей протаивания, заполненных водонасыщенными песками и супесями, за счёт сегрегационного льдообразования сформировались ледогрунтовые окончания жил. Позднее процесс морозобойного растрескивания вновь стал преобладающим, что привело к росту верхних ледяных частей полигонально-жильных льдов первой и второй генераций. Накопление аллювиальных отложений и рост описанной здесь системы полигонально-жильных льдов второй террасы завершились термокарстом и образованием мелководного озера ~ 12 тыс. cal BP (ИМКЭС-14C1262). Зараствание озера, накопление торфа на останце террасы происходило от 9,5 тыс. cal BP (ИМКЭС-14C1259) до 3,5 тыс. cal BP (ИМКЭС-14C1268) на фоне потеплений и похолоданий в голоцене.

Образование ледогрунтовых жил в крупном хасырее. Термокарстовая депрессия в пределах хасырея образована за счёт протаивания полигонально-жильных льдов и размыва льдистых отложений. Термокарстовые озёра, вероятно, заливались речными водами, поскольку кровля таберированного комплекса с псевдоморфозами снизилась и местами опустилась ниже уровня р. Гыда. Поэтому около 15 тыс. cal BP (ИМКЭС-14C1257) в озёрных понижениях шло накопление пойменных и прирусловых отложений, а также обмеление озёр. Рост полигонально-жильных льдов при промерзании в хасырее в это время был связан в основном с морозобойным растрескиванием поверхности. Верхняя часть жил залегает в субаэральных аллювиальных и делювиальных песчаных отложениях хасырея, которые отличаются охристой окраской и несколькими горизонтами криотурбаций, что указывает на частые изменения глубины сезонного протаивания при их накоплении и сингенетическом промерзании [26].

Образование ледогрунтовых включений с сегрегационным льдом обусловлено также сезонным локальным протаиванием ледяных жил и последу-



Рис. 4. Типизация льда и его диагностических признаков в ледогрунтовых жилах на севере Гыдана
Fig. 4. Types of ice and its diagnostic features in composite wedge in the northern part of Gydan Peninsula

ющим медленным промерзанием водонасыщенного грунта в полостях разной формы. В образовании верхних частей жил участвовали процессы морозобойного растрескивания, поскольку элементарные жилки секут сегрегационный лёд. Формирование верхних частей жил с ледогрунтом сопровождалось затоплением речными водами и происходило, вероятно, в оптимум голоцена, поскольку перекрывающий их автохтонный торф формировался от ~5,6 тыс. cal BP (ИМКЭС-14С1093) по настоящее время. С современным протаиванием связано образование торфяной псевдоморфозы в кровле жилы и промоин, заполненных ледогрунтом и торфом без видимых включений льда (см. рис. 3, А).

Сингенетические полигонально-жилые льды с ледогрунтовыми включениями (рис. 4) в сартанских и верхнесартанско-голоценовых отложениях сформированы за счёт проявления локальных термокарстовых процессов в динамичной пойменной аллювиальной фациальной обстановке на разных этапах роста ледяных жил.

Заключение

Выполненные исследования морфологии и структурно-текстурных характеристик льда расширяют представления об участии разных типов льда в формировании полигонально-жилых льдов. Эти льды в мёрзлых сартанских и голоценовых отложениях второй озёрно-аллювиальной террасы в низовьях р. Гыда состоят из ледяных и ледогрунтовых частей. Ледяные участки жил сложены элементарными жилками льда, образованы за счёт преобладающих процессов морозобойного

растрескивания и в разной степени перекристаллизованы в зависимости от их возраста.

Ледогрунтовые включения в жилах сложены вертикальными и волнистыми прожилками льда и грунтовыми прожилками с вертикально-волнистой линзовидной, плейчатой, порфириформной и массивной криогенными микротекстурами, образованными сегрегационным льдом. Формирование ледогрунтовых включений связано с локальным протаиванием, заполнением полостей и медленным двухсторонним промерзанием водонасыщенного грунта в полостях в жиле на разных этапах её роста. Структурно-текстурные характеристики льда и ледогрунта подтверждают представления исследователей о формировании ледогрунтовых жил не только за счёт процессов морозобойного растрескивания и элементарных жилок, но и сегрегационного льдообразования.

Полигонально-жилые льды в низовьях р. Гыда продолжали своё развитие как в холодные периоды за счёт морозобойного растрескивания, так и в периоды относительного потепления при промерзании термокарстовых полостей в жилах в сартанское и голоценовое время. Локальные термокарстовые процессы, приводившие к образованию полостей протаивания, обусловлены изменениями аллювиальной фациальной обстановки во время накопления, промерзания отложений и роста жил.

Благодарности. Работа выполнена по госзаданию Федерального научного центра Тюменского научного центра СО РАН согласно Плану НИР на 2018–2020 годы, протокол № 2 от 8.12.2017, проект IX.133.1.2: «Закономерности стадийных изменений мёрзлых толщ, льдов и ландшафтов аркти-

ческих островов и обрамления Карского моря под воздействием климата, экзогенных и эндогенных геологических процессов»; госзаданию Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН № АААА-А18-218012490093-1 при поддержке грантов РФФИ № 17-35-50048 мол_нр; 18-55-11005 АФ_т.

Acknowledgments. The research was carried out within the state assignment of the Research work Plan of the

Tyumen Scientific Centre SB RAS for 2018–2020 protocol № 2 from 8.12.2017, project IX.133.1.2: «Regularities of the permafrost, ice and environmental dynamics of the Arctic islands and Kara Sea coast under the influence of climate, exogenous and endogenous geological processes»; the state assignment of the Institute of Physicochemical and Biological Problems at Soil Science RAS No. АААА-А18-218012490093-1; partly supported by the RFBR (project № 17-35-50048 мол_нр; 18-55-11005 АФ_т).

Литература

1. Втюрин Б.И. Подземные льды СССР. М.: Наука, 1975. 215 с.
2. Соломатин В.И. О структуре полигонально-жильного льда // Подземный лед: Вып. II. М.: Изд-во МГУ, 1965. С. 46–73.
3. Rogov V.V. Основы криогенеза. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2009. 203 с.
4. Шумский П.А. К вопросу о происхождении жильного подземного льда // Тр. Ин-та мерзлотоведения АН СССР. Т. XVI. 1960. С. 81–97.
5. Попов А.И., Розенбаум Г.Э., Тумель Н.В. Криолитология. М.: Изд-во МГУ, 1985. 239 с.
6. Соломатин В.И., Крючков М.В. Элементарные жилки полигонально-жильных льдов и реконструкция палеотемператур льдообразования // Проблемы криолитологии. Вып. IX. М.: Изд-во МГУ, 1981. С. 179–183.
7. Романовский Н.Н. Формирование полигонально-жильных структур. Новосибирск: Наука, 1977. 292 с.
8. Баулин В.В. Повторно-жильные образования и палеогеография верхнего плейстоцена (западная часть Западно-Сибирской низменности) // Мерзлотные исследования. Вып. VII. 1967. С. 174–184.
9. Розенбаум Г.Э., Маслов А.Д. Мерзлотно-фациальное строение современных аллювиальных отложений р. Омолуй // Подземный лед. Вып. III. М.: Изд-во МГУ, 1967. С. 70–93.
10. Каплина Т.Н. Формы начальной стадии образования ледяных жил // Мерзлотные исследования. Вып. XI. 1971. С. 168–171.
11. Катасонов Е.М. Литология мерзлых четвертичных отложений (криолитология) Янской приморской низменности / Ред. Т.Н. Каплина. М.: изд. ПНИИИС, 2009. 176 с.
12. Куницкий В.В. Криолитология низовья Лены. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР, 1989. 162 с.

References

1. Vtyurin B.I. *Podzemnye l'dy SSSR*. Underground ice in the USSR. Moscow: Nauka, 1975: 215 p. [In Russian].
2. Solomatina V.I. *O strukture poligonal'no-zhil'nogo l'da*. On structure of ice-wedge. *Podzemnyi led*. Underground ice. Is. II. Moscow: MGU, 1965: 46–73. [In Russian].
3. Rogov V.V. *Osnovy kriogeneza*. Fundamentals of cryogenesis. Novosibirsk: GEO, 2009: 203 p. [In Russian].
4. Shumskiy, P.A. On the origin of vein underground ice. *Tr. In-ta merzlotovedeniya AN SSSR*. Proceedings of the Institute of Permafrost, USSR Academy of Sciences. 1960, XVI: 81–97 [In Russian].
5. Popov A.I., Rozenbaum G.E., Tumel' N.V. *Kriolitologiya*. Cryolithology. Moscow: MGU, 1985: 239 p. [In Russian].
6. Solomatina V.I., Kryuchkov M.V. Ice veins of ice wedges and reconstruction of paleotemperature of ice formation. *Problemy kriolitologii*. Problems of Cryolithology. Is. IX. Moscow: Moscow State University, 1981: 179–183. [In Russian]
7. Romanovskiy N.N. *Formirovanie poligonal'no-zhil'nykh struktur*. Formation of polygonal wedge structures. Novosibirsk: Nauka, 1977: 292 p. [In Russian].
8. Baulin V.V. Ice wedge formations and paleogeography of the Upper Pleistocene (western part of the West Siberian lowland). *Merzlotnye issledovaniya*. Permafrost research. Is. 7. Moscow: MGU, 1967: 174–184. [In Russian].
9. Rozenbaum G.E., Maslov A.D. Permafrost-facies structure of modern fluvial deposits of the Omoloy river. *Podzemnyi led*. Underground ice. Is. III. Moscow: MGU, 1967: 70–93. [In Russian].
10. Kaplina T.N. The first stage of ice wedges formation. *Merzlotnye issledovaniya*. Permafrost research. Is. XI. Moscow: MGU. 1971: 168–171. [In Russian].
11. Katasonov E.M. *Litologiya merzlykh chetvertichnykh otlozheniy (kriolitologiya) Yanskoj primorskoj nizmennosti*. Lithology of Frozen Quaternary Deposits (Cryolithology) of the Yana lowland. Moscow: PNIIS, 2009: 176 p. [In Russian].
12. Kunitskiy V.V. *Kriolitologiya nizov'ya Leny*. Lithology of the Lena lowland. Yakutsk: Permafrost Institute, Siberian Branch of the USSR Academy of Science, 1989: 162 p. [In Russian].

13. Деревягин А.Ю., Куницкий В.В., Мейер Х. Песчано-ледяные жилы на крайнем севере Якутии // Криосфера Земли, 2007. Т. XI. № 1. С. 62–71.
14. Berg T.E., Black R.F. Preliminary measurements of growth of non-sorted polygons, Victoria Land, Antarctica // Amer. Geophys. Union. Antarctic Research Ser. 1966. V. 8. P. 61–108.
15. Кац Н.Я., Кац С.В., Скобеева Е.И. Атлас растительных остатков в торфах. М.: Недра, 1977. 376 с.
16. Домбровская Ф.В., Коренева М.М., Тюремнов С.Н. Атлас растительных остатков, встречаемых в торфе. Л.–М.: Гос. энерг. изд-во, 1959. 90 с.
17. Faegri K., Iversen J. Textbook of Pollen Analysis. London: The Blackburn Press, 1989. 328 p.
18. Вагнер Г.А. Научные методы датирования в геологии, археологии и истории. М: Техносфера, 2006. 576 с.
19. Электронный ресурс: <http://c14.arch.ox.ac.uk>.
20. Тихонравова Я.В., Слагода Е.А., Рогов В.В., Галеева Э.И., Курчатов В.В. Текстура и структура подземных льдов позднего голоцена севера Западной Сибири // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 4. С. 553–564. doi: 10.15356/2076-6734-2017-4-553-564.
21. Втюрин Б.И., Втюрина Е.А. Зимние наблюдения за образованием и поведением морозобойной трещины в ледяной жиле // Тр. Ин-та мерзлотоведения АН СССР. Т. XVI. 1960. С. 98–105.
22. Геокриология СССР. Западная Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 454 с.
23. Государственная геологическая карта Российской Федерации (новая серия). Карта плиоцен-четвертичных образований, масштаб: 1:1 000 000 / Ред. Г.И. Колотушкина, Н.Ю. Смирнова. СПб: изд. ВСЕГЕИ, 2000.
24. Васильчук Ю.К. Гомогенные и гетерогенные пластовые ледяные залежи в многолетнемерзлых породах // Криосфера Земли, 2011. Т. XV. № 1. С. 40–51.
25. Васильчук Ю.К., Котляков В.М. Основы изотопной геокриологии и гляциологии. М.: Изд-во МГУ, 2000. 616 с.
26. Бутаков В.И., Тихонравова Я.В., Слагода Е.А. Закономерности формирования геохимического состава подземных льдов и отложений на севере п-ва Гыдан // Изв. вузов. Нефть и газ. 2018. № 5. С. 30–40. doi: 10.31660/0445-0108-2018-5-30-40.
27. Kuznetsova A., Afonin A., Tikhonravova Ya., Narushko M., Slagoda E. Reconstruction of the dynamics of the natural environment by the method of definition vegetations residues in peat and the deposits of the khasyrey on terraces of Gyda river // Pushchino Permafrost Conf. «Earth's Cryosphere: Past, Present and Future – Book of Abstracts, 5–8 June, 2017. P. 155–156.
13. Derevyagin A. Yu., Kunitskiy V. V., Meyer H. Composite wedges in the north of Yakutia. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2007, XI (1): 62–71. [In Russian].
14. Berg T. E., Black R. F. Preliminary measurements of growth of non-sorted polygons, Victoria Land, Antarctica. *Amer. Geophys. Union Antarctic Res. Ser.* 1966, 8: 61–108.
15. Katz N. Ya., Katz S. V., Skobeveva E. I. *Atlas rastitel'nykh ostatkov v torfe*. Atlas of Plant Remains. Moscow: Nedra, 1977: 376 p. [In Russian].
16. Dombrovskaya A. V., Koreneva M. M., Tyuremnov S. N. *Atlas rastitel'nykh ostatkov, vstrechaemykh v torfe*. Atlas of plant remains occurring in peat. Leningrad–Moscow: Gosenergoizdat, 1959: 90 p. [In Russian].
17. Faegri K., Iversen J. Textbook of Pollen Analysis. London: The Blackburn Press, 1989: 328 p.
18. Wagner G. A. *Nauchnye metody datirovaniya v geologii, arkheologii i istorii*. Scientific methods of dating in geology, archaeology and history. Moscow: Technosfera, 2006: 576 p. [In Russian].
19. <http://c14.arch.ox.ac.uk>.
20. Tikhonravova Ya. V., Slagoda E. A., Rogov V. V., Galeeva E. I., Kurchatov V. V. Texture and structure of the Late Holocene ground ice in the Northern West Siberia. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2017, 57 (4): 553–564. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2017-4-553-564.
21. Vtyurin B. I., Vtyurina E. A. Winter observations on formation and behavior of thermal-contraction crack within ice wedge. *Tr. In-ta merzlotovedeniya AN SSSR*. Proceedings of the Institute of Permafrost, USSR Academy of Sciences. 1960, XVI: 98–105. [In Russian].
22. *Geokriologiya SSSR. Zapadnaya Sibir'*. Geocryology of the USSR. West Siberia. Ed. E. D. Ershov. Moscow: Nedra, 1989: 454 p. [In Russian].
23. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii (novaya seriya)*. The State Geological Map of the Russian Federation (new series). Map the Pliocene–Quaternary formations. 1:1 000 000. Saint Petersburg: VSEGEI, 2000. [In Russian].
24. Vasil'chuk Yu. K. Homogeneous and heterogeneous massive ice in permafrost. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2011, XV (1): 40–51. [In Russian].
25. Vasil'chuk Yu. K., Kotlyakov V. M. *Osnovy izotopnoy geokriologii i glyatsiologii*. Principles of isotope geocryology and glaciology. Moscow: Moscow University Press, 2000: 616 p. [In Russian].
26. Butakov V. I., Tikhonravova Ya. V., Slagoda E. A. Regularities of geochemical composition formation of underground ice and deposits on the north Gydan peninsula. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft' i gaz*. Higher Educational Institutions News. Oil and Gas, 2018, 5: 30–40. doi: 10.31660/0445-0108-2018-5-30-40. [In Russian].
27. Kuznetsova A., Afonin A., Tikhonravova Ya., Narushko M., Slagoda E. Reconstruction of the dynamics of the natural environment by the method of definition vegetations residues in peat and the deposits of the khasyrey on terraces of Gyda river. Pushchino Permafrost Conf. «Earth's Cryosphere: Past, Present and Future – Book of Abstracts, 5–8 June, 2017: 155–156. [In Russian].