

БУГРЫ ПУЧЕНИЯ ОСТРОВА БЕЛЫЙ В ПРИБРЕЖНО-МОРСКОЙ ОБСТАНОВКЕ КАРСКОГО МОРЯ

**П.Т. Орехов¹, К.А. Попов¹, Е.А. Слагода^{1,2,3}, А.Н. Курчатова^{1,3}, Я.В. Тихонравова¹,
О.Л. Опокина^{1,3}, Г.В. Симонова⁴, В.Н. Мелков⁴**

¹Институт криосферы Земли СО РАН, 625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия; orekhov.eci@gmail.com, eslagoda@ikz.ru

²Тюменский государственный университет, 625003, Тюмень, ул. Володарского, 6, Россия

³Тюменский индустриальный университет, 625000, Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия

⁴Институт мониторинга климата и экологических систем СО РАН, 634055, Томск, пр. Академический, 10/3, Россия

Впервые изучены морфология и строение бугров пучения на о. Белый в Карском море. Определены возраст торфа, изотопный состав углерода торфа и газовых включений во льду, кристаллическое строение льда, гранулометрический состав отложений. По форме выделены конусовидные, тороидальные и пересеченные полигональной сетью протаявшие бугры пучения и плоские многолетние миграционные бугры с ледяным ядром. Современные миграционные плоские бугры пучения распространены в зоне регулярного подтопления лайдой морскими водами. Конусовидные и тороидальные бугры являются реликтовыми, они развивались в позднем голоцене. В мерзлых толщах Западного Ямала и островов Арктики реликты бугров пучения могут служить показателем прибрежно-морской обстановки их роста на низких гипсометрических уровнях в позднем голоцене.

Миграционные бугры пучения, протаявшие бугры пучения, возраст торфа, газовый состав, кристаллическая структура льда, гранулометрический состав отложений

FROST MOUNDS OF BELY ISLAND IN COASTAL MARINE SETTINGS OF THE KARA SEA

**P.T. Orekhov¹, K.A. Popov¹, E.A. Slagoda^{1,2,3}, A.N. Kurchatova^{1,3}, Ya.V. Tikhonravova¹,
O.L. Opokina^{1,3}, G.V. Simonova⁴, V.N. Melkov⁴**

¹Earth Cryosphere Institute, SB RAS, 86, Malygina str., Tyumen, 625026, Russia; orekhov.eci@gmail.com, eslagoda@ikz.ru

²Tyumen State University, 6, Volodarskogo str., Tyumen, 625003, Russia

³Industrial University of Tyumen, 38, Volodarskogo str., Tyumen, 625000, Russia

⁴Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, SB RAS, 10/3, Akademicheskoy ave., Tomsk, 634055, Russia

The paper describes the pioneering study of morphology and structure of frost mounds on Bely Island in the Kara Sea. Age of peat, carbon isotopic composition of peat and gas inclusions in ice, ice crystalline structure, and granulometric composition of sediments have been determined. By their shape, the identified frost mounds have been grouped into conical, toroidal, thaw-weakened (without ice core) frost mounds crosscut by polygonal network, and ice-cored flat-topped perennial palsas. Modern palsas are distributed in the areas of laida which are regularly flooded by sea water. Conical and toroidal frost mounds represent relict permafrost landforms developed in the late Holocene. Relict frost mounds of Western Yamal and Arctic islands can be indicators of coastal-marine settings of their growth on low elevations in the late Holocene.

Palsa, thaw-weakened frost mounds, age of peat, gas composition, ice crystalline structure, granulometric composition of sediments

ВВЕДЕНИЕ

Бугры пучения – свидетельства развития криогенных экзогенных процессов, опасных для инженерно-хозяйственных сооружений в криолитозоне. В прошлом веке большинство исследователей считали, что в северной геофизиологической зоне Западной Сибири нет условий для формирования многолетних бугров пучения как в настоящее время, так и в голоцене [Попов, 1965, 1967; Достовалов, Кудрявцев, 1967; Васильчук и др., 1983; Васильчук, Лахтина, 1986; Трофимов и др., 1989; Романовский, 1993; Васильчук и др., 2012]. Они связывали это с высокой скоростью промер-

зания, малой мощностью деятельного слоя и недостатком влаги для формирования льдистых ядер в суровых климатических условиях. Многолетние миграционные бугры пучения обозначают южную границу криолитозоны [Васильчук, 2013], распространены на полуостровах Ямал, Гыданский и Таймыр [Евсеев, 1975; Васильчук и др., 1983; Васильчук и др., 2008; Васильчук и др., 2013]. Данные о буграх пучения на островах в зоне арктической тундры приведены в редких публикациях [Белорусова, Украинцева, 1980; Касымская, 2014; Alexanderson et al., 2002; Roujanski, 2008], на о. Бе-

лый они не были изучены [Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., 2015].

Бугры пучения различают: по длительности существования (на сезонные и многолетние); по размерам и форме; по составу и льдистости отложений; по механизму льдообразования (инъекционному, миграционному или смешанному). Крупные и мелкие бугры пучения приурочены в основном к депрессиям рельефа – низким террасам, хасыреям, лайдам и заливаемым дельтам рек [Евсеев, 1975; Ершов, 2002; Маскау, 1973; Seppälä, 1980].

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ

В 2015 г. на северо-западе о. Белый на поверхности выявлены мелкие выпуклые образования – бугры пучения (рис. 1). Рельеф острова низменный, выровненный, с высотами 0–12 м над уровнем моря, в его пределах выделены геоморфологические элементы: отмели, пляж, лайда, пойма, первая (3–7 м) и вторая (6–12 м) морские террасы (см. рис. 1). Низкие уровни острова море затопляет при приливах, штормах, нагонах, о чем свидетельствует плавник.

По данным сайта (www.rp5.ru), для о. Белый характерны: продолжительная зима – 6 месяцев, лето – 2.5–3 месяца и короткие переходные сезоны (за период 2009–2015 гг.). Среднегодовая температура воздуха ($t_{\text{ср.в}}$) составляет $-10.2\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{ср.в}}$ января $-24.4\text{ }^{\circ}\text{C}$; августа $+5.3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Устойчивый переход среднесуточных температур ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит примерно 30 сентября. Средняя сумма осадков составляет 258 мм/год, высота снежного покрова возрастает от 11 см в октябре до 50 см в начале мая. Интенсивное таяние снега начинается в июне при $t_{\text{ср.в}} = -1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (www.rp5.ru).

Геологическое строение и геокриологические условия о. Белый. В кайнозойской толще выделены палеогеновые глины с прослоями песчаников, алевролитов тибейсалинской свиты мощностью 130 м и четвертичные отложения суммарной мощностью 230 м [Бро, 1986]. По аналогии с севером Ямала выделяют верхнеплейстоценово-нижнеголоценовые супесчано-песчаные, суглинистые морские отложения второй и первой террас мощностью до 20 м и сингенетически промерзавшие голоценовые пылеватые пески с прослоями супесей, суглинков и аллохтонного торфа, слагающие лайду и долины водотоков [Дубиков, 2002]. Мощность многолетнемерзлых пород (ММП) на II террасе о. Белый по температурным замерам в скважине составляла 350 м [Бро, 1986]. По другим данным, по аналогии с Ямалом предполагаемая мощность ММП на востоке острова на II террасе – до 240 м, на западе острова на I морской террасе – 65–165 м, на лайде у уреза воды – 2–10 м, в ее тыловой части – 80 м [Трофимов и др., 1987; Баду,

2011]. Температуру ММП о. Белый также характеризуют по-разному. По данным Ю.К. Васильчука, А.К. Васильчук [2015], с 1972 по 2009 г. температура ММП на I террасе на глубине 9–10 м повысилась с -8.5 до $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$, в 1978 г. на лайде на глубине 2 м она составляла $-3.7\text{ }^{\circ}\text{C}$. По измерениям в скважинах на глубинах 7–10 м в 2009 г. на I террасе температура ММП составляла на возвышенных участках от $-8.7\text{...}-12.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, в долинах ручьев до $-4.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ [Лейбман и др., 2011]. Глубина протаивания на лайде и I террасе под моховым покровом (толщиной 0.1 м) составляла до 0.3 м [Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., 2015]. Мощность сезонноталого слоя (СТС) по измерениям 2015 г. достигала на заболоченной лайде с торфяным покровом 0.2–0.3 м.

Растительный покров о. Белый обусловлен низменным слабодренированным рельефом и характерен для северной подзоны арктических тундр. В болотах, озерных депрессиях и долинах водотоков преобладают злаково-пушицевые, гипновые, сфагново-гипновые сообщества. На плоских увалах и дренированных склонах I террасы распространены злаково-пушицево-моховые, ивово-ожиково-ракомитриево-лишайниковые, реже разнотравно-ивково-осоково-моховые тундры. На краях песчаных увалов распространены пятнисто-трещиноватые разнотравно-ивково-ракомитриево-гимномитриевые тундры с мелким полигональным рельефом и сизым мхом *Racomitrium lanuginosum*. На лайде, в заливаемых морем долинах водотоков развиты галофитные луговые сообщества [Walker et al., 2009].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На о. Белый выполнены маршруты, включавшие изучение ландшафтов, ботанического состава и глубины сезонного протаивания, экзогенных геологических процессов. Кондуктометром-солемером DIST-4 измерена электропроводимость, определена соленость болотных и озерных вод. Выполнено описание морфологии и пяти разрезов отложений бугров, определены: гранулометрический состав пород лазерным гранулометром Malvern 3000 (16 проб), газовый состав воздушных включений во льду и кристаллическая структура льда в шлифах. Для пяти проб торфа из бугров пучения методом изотопной масс-спектрометрии на комплексе DELTA-V Advantage определен изотопный состав углерода (^{14}C , ^{13}C , ^{12}C). Радиоуглеродное датирование проб выполнено жидкостно-сцинтилляционным методом на спектрометре-радиометре Quantulus (ТомЦКП СО РАН). Калиброванный возраст по $\delta^{14}\text{C}$ рассчитан с учетом изотопного фракционирования (с поправкой 16 лет на каждый 1 ‰ $\delta^{13}\text{C}$ к норме для древесины $-25\text{ }^{\circ}\text{‰}$) [Вагнер, 2006; OxCal Program, 2016].

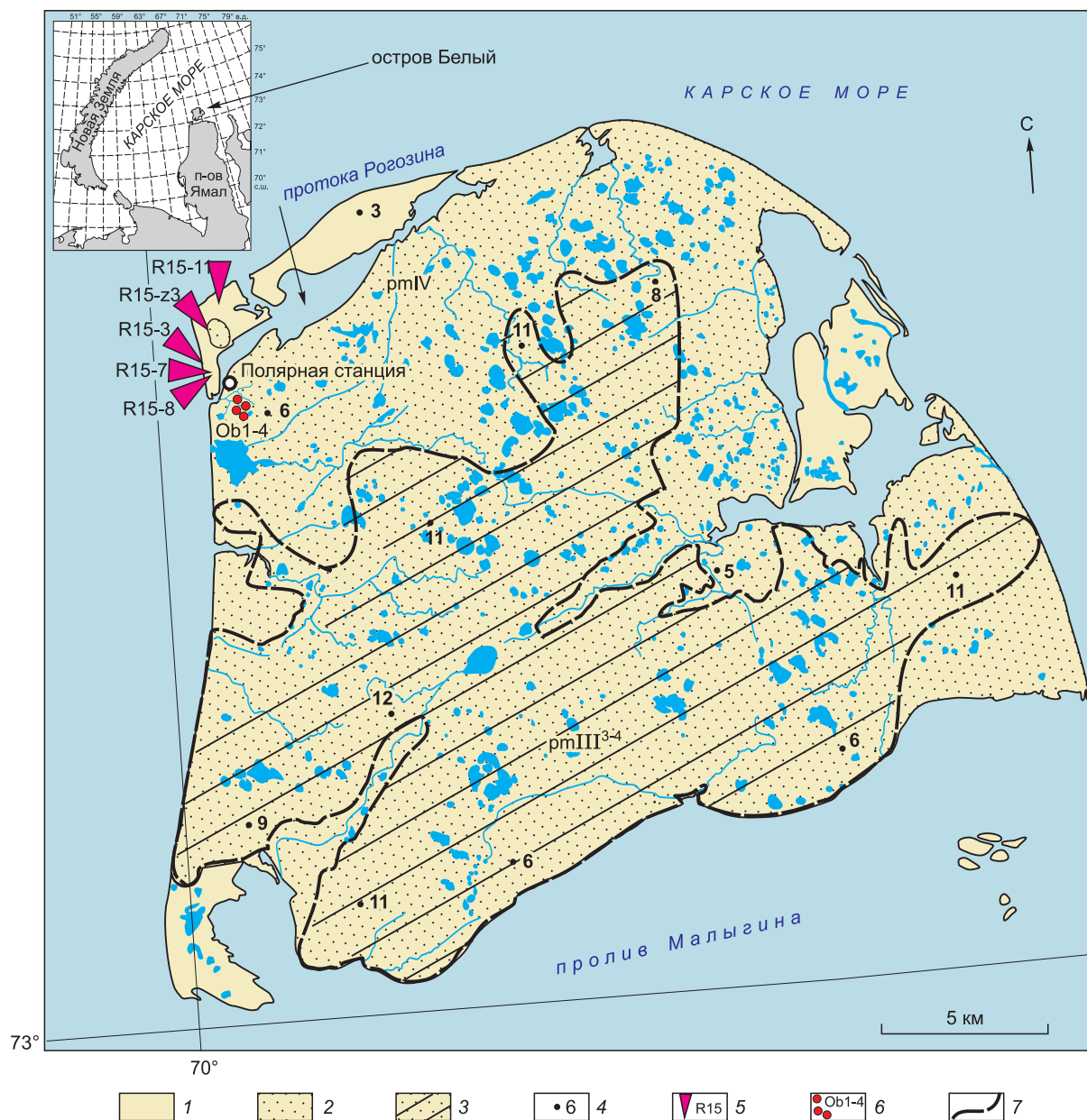


Рис. 1. Район исследований и расположение расчисток:

1 – лайда, пляжи, затопляемые дельты и острова, прилегающие к о. Белый; 2 – I прибрежно-морская терраса (pmIV); 3 – II прибрежно-морская терраса (pmIII³⁻⁴); 4 – абсолютные высоты поверхности; 5 – расчистка и ее номер; 6 – скважины 2010 г.; 7 – предполагаемые границы геоморфологических уровней.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ БУГРОВ ПУЧЕНИЯ О. БЕЛЫЙ

Бугры выявлены на низменном вытянутом островке с высотами до 3.5 м, отделенном от о. Белый протокой Рогозина. Этот островок включает лайду, пляжи, осушенные участки проток, а на юго-западе находится сниженный останец предположительно I морской террасы (см. рис. 1).

Морфология бугров пучения. Бугры высотой 0.5–1.2 м, диаметром от 1.0 до 8.0 м, по форме разделены на четыре разновидности.

Плоские торфяные бугры высотой до 0.7 м, диаметром 2.0–8.0 м с ледяным ядром, покрыты торфом и отмершей растительностью (расчистка R15-z3). Они окружены обводненным кочковатым болотом с участками открытой воды, глубиной 0.2–0.5 м, приурочены к заозерной и засоленной

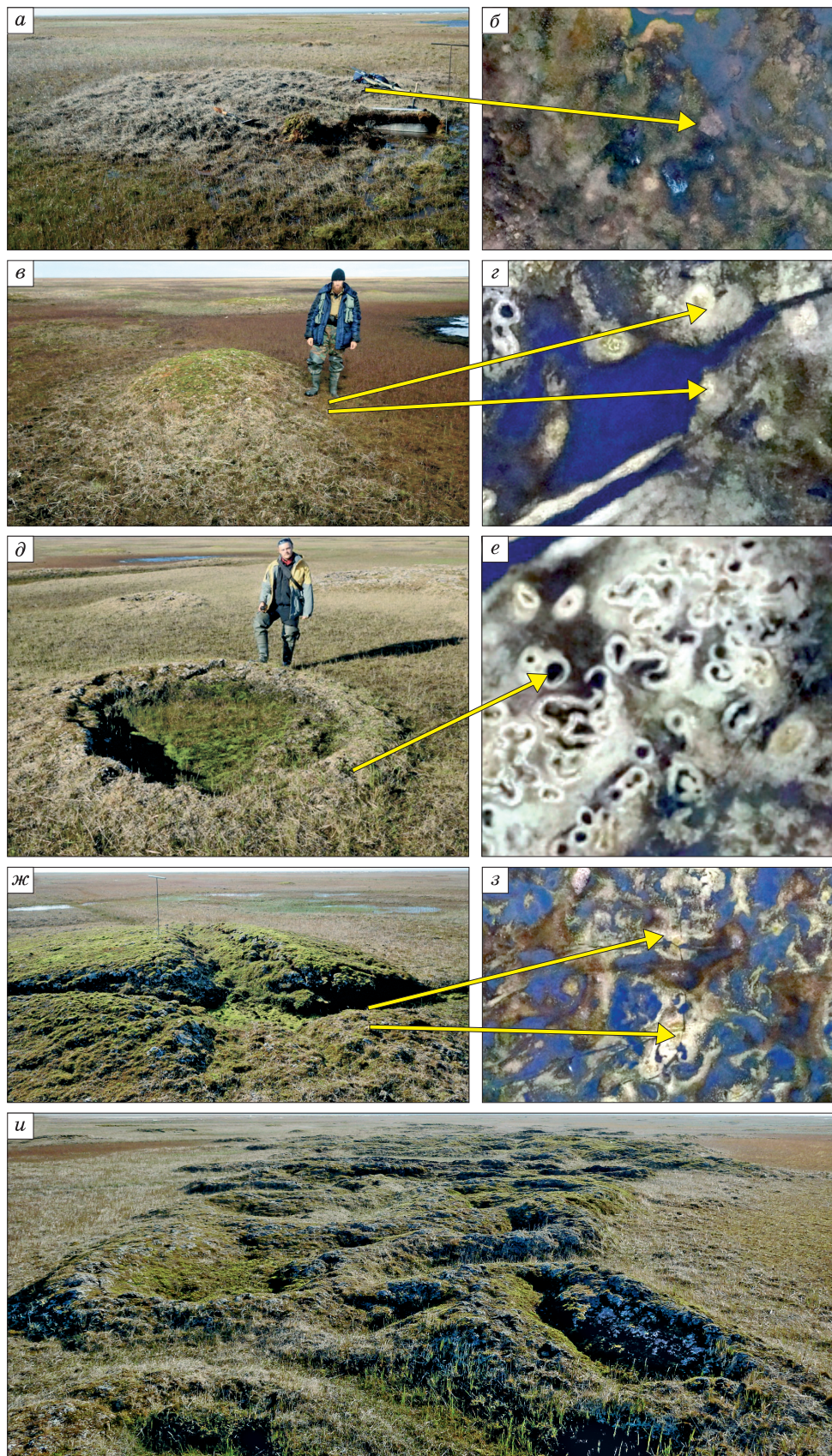


Рис. 2. Морфологические типы бугров пучения о. Белый:

a – плоские торфяные с ледяным ядром; *в* – конусовидные; *д* – тороидальные; *ж* – с просадками по полигонально-жильным льдам; *и* – гряды тороидальных бугров; *б, г, е, з* – изображение типов бугров на мультиспектральных АФС (м-ба 1:500, август 2015 г.). Фото П.Т. Орехова.

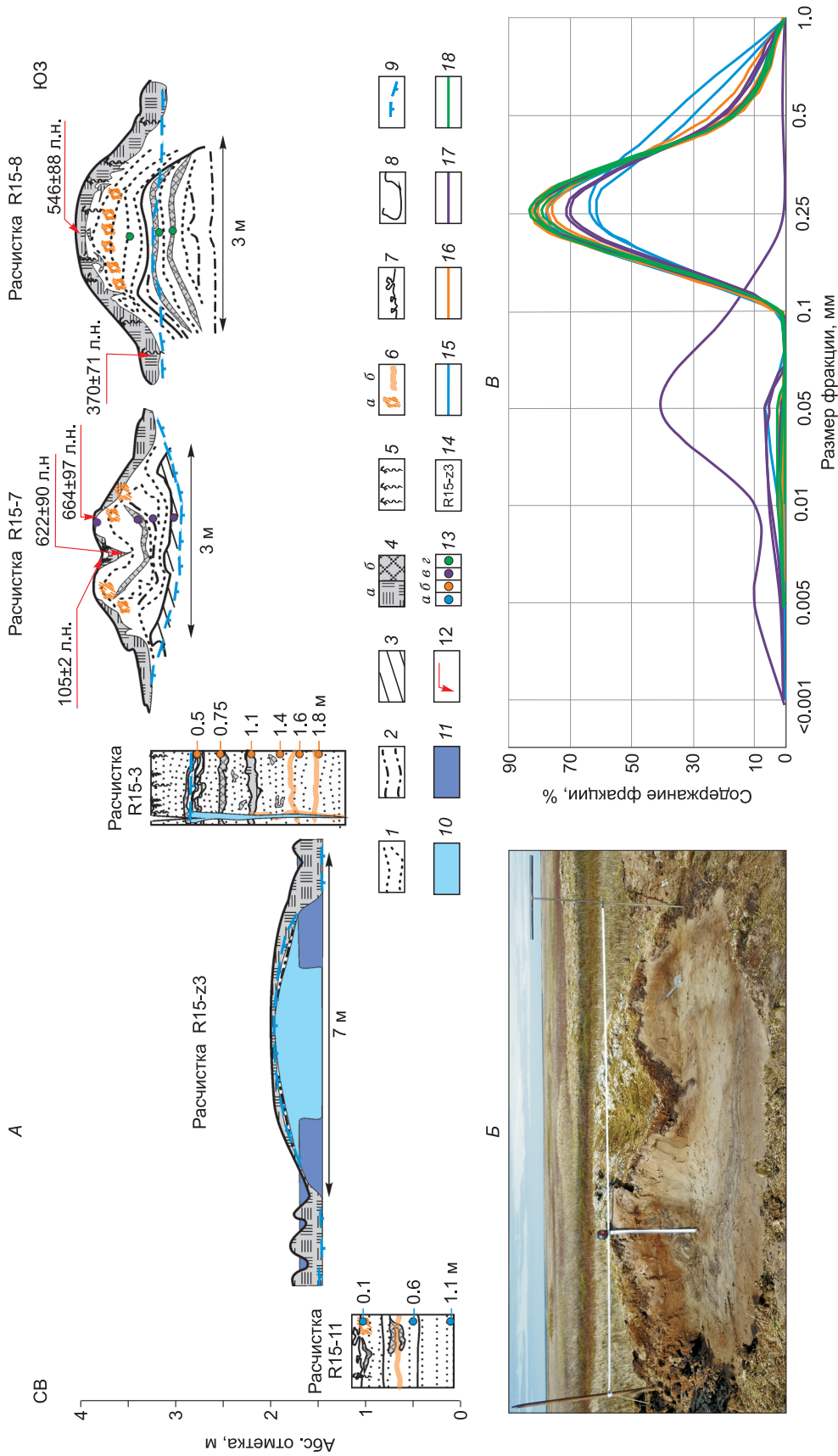


Рис. 3. Стрoение разрезов (А), расчетка R15-7 (Б), характеристика гранулометрического состава отложений (В) бугров пучения и останца, прибрежно-морской террасы о. Белый:

1 – песок; 2 – супеси; 3 – суглинки; 4 – торф автохтонный (а), аллохтонный (б); 5 – почвенный слой, корешки растений; 6 – охристые пятна (а), полосы (б); 7 – криотурбации; 8 – инволюции слоистых отложений; 9 – граница мерзлых пород; 10 – лед; 11 – вода; 12, 13 – места отбора проб (12 – органики на радиоуглеродное датирование, 13 – отложений на гранулометрический анализ); 14 – номер выработки/разреза; 15–18 – гистограммы гранулометрического состава пород из разрезов (15 – R15-11; 16 – R15-3; 17 – R15-7; 18 – R15-8). Фото П.Т. Орехова.

лайде с отметками 1.0–2.5 м, ежегодно заливаемой морем при нагонах и штормах (рис. 2, а, б). На этом участке неравномерно разбросан морской плавник – выветрелые стволы деревьев.

Конусовидные, отдельно стоящие, ненарушенные бугры пучения (расчистка R15-8) имеют правильную форму, высоту 0.6–0.8 м, диаметр 2.7–3.0 м и пьедестал – ступеньку вокруг бугра высотой до 0.3 м и шириной 0.7–0.9 м. Растительность представлена: на пьедестале – злаково-моховыми сообществами, на склонах бугра – сплошным мохово-лишайниковым покровом. Вершина бугра разбита хаотичными узкими (5–10 см) зияющими трещинами, глубиной 0.3–0.5 м. Эти бугры распространены на высокой лайде и склоне останца террасы с высотами 3.0–3.5 м над ур. моря, приурочены к переувлажненным понижениям со слабосолоноватыми осоково-моховыми и злаково-моховыми болотами (см. рис. 2, в, з).

Тороидальные бугры (см. фотографию на обложке) – округлые, овальные и неправильные замкнутые, выпуклые формы высотой 0.5–0.8 м, диаметром 1.0–5.0 м, с провалом в центре, выступающим вверх валом и пьедесталом, шириной до 0.5 м (расчистка R15-7). Эти образования часто соприкасаются друг с другом и образуют цепочки, вытянутые гряды (см. рис. 2, д, е, и). Растительность на валах бугров представлена лишайниково-моховым покровом с преобладанием лишайников (проективное покрытие 70 %). В просевшей части бугра, отделенного зияющими концентрическими трещинами от стенок вала, преобладают зеленые мхи (проективное покрытие 100 %). Мощность мохового покрова на вершине валов составляет 0.5 см, на их стенках – до 5 см. Под мхом залегает слой торфа толщиной 3–7 см на валах, в центре просадки – до 10–15 см. Этот тип бугров распространен в верхней части дренированного по полигональной сети склона (высота до 3.5 м над ур. моря), в осушенных болотах.

Второй и третий разновидности бугров расположены выше зон концентрации современного плавника, т. е. морем регулярно не заливаются.

Бугры с полигональной сетью высотой до 1.2 м, диаметром 3.0–7.0 м, с мохово-лишайниковым покровом, пересечены канавами глубиной до 0.5 м, которые делят бугры на 2, 3 или 4 части. Бугры окружены слабосолоноватым болотом с мочажинами в плоском понижении высокой лайды с высотами 1.5–2.5 м над ур. моря (см. рис. 2, ж, з).

Строение бугров пучения. Расчистками вскрыты отложения пляжа, останца I террасы и плоские, конусовидные, тороидальные бугры.

В разрезе плоского бугра (расчистка R15-z3, рис. 3, А) под слоем торфа мощностью 0.1–0.2 м в центре бугра залегает лед, на краях – водонасыщенный талый и мерзлый торф, темно-серые супеси. Лед имеет грибообразную форму, ближе к по-

верхности – четкую столбчатую отдельность (рис. 4, а), содержит рассеянные включения мелких растительных остатков. Кристаллическая структура льда вертикально-слоистая, с удлиненными по вертикали кристаллами шириной 1.0–1.5 см. На границах кристаллов и внутри них расположены многочисленные пузырьки газа, изометричные (~0.5 см) и вытянутые (длиной до 1 см, диаметром ~0.3 см), а также цепочки вытянутых пузырьков (см. рис. 4, б, в).

Состав газа из льда определен М.Д. Заватским: CO₂ ~1.17; O₂ ~15.71; N₂ ~74.91 объемных процентов (об.%); водород ~0.0009, метан ~7.35 об.%; в примесях пропан, изобутан, н-пентан. Для метана К. Кноблихом (Университет Гамбурга, Германия) определен δ¹³C –61.88 ‰.

В разрезе конусовидного бугра (расчистка R15-8, см. рис. 3, А) под торфом, мощность которого увеличивается от вершины к периферии от 0.01 до 0.3 м, сверху вниз залегают черные и серые пески с криотурбациями, ниже – линза ожелезненных песков, постепенно выклинивающаяся к краям бугра, под ней – двояковыпуклая линза светло-серых песков и переслаивающиеся водонасыщенные пески, серые супеси с инволюциями. Мерзлые отложения под вершиной бугра залегают на глубине 0.65 м, на краю и пьедестале – 0.4–0.5 м. Радиоуглеродный возраст торфа на вершине составляет 546 ± 88, на периферии – 370 ± 71 лет (см. рис. 3, А, таблицу).

В разрезе тороидального бугра (расчистка R15-7) торф из разрушенной вершины снесен в провал на глубину 0.5–0.6 м. Бугор сложен тальными песками и супесями с перемятой слоистостью – инволюциями и многочисленными пятнами ожелезнения. В краевых частях бугра слои задраны вверх, а в центре погружены вниз, облекая провал на месте вытаявшего ядра льда. Глубина протаивания на периферии бугра составляет 0.5–0.8 м, под просадкой – 0.8–1.2 м. Более древний торф (664 ± 97 лет назад) залегает на валу тороидального бугра на глубине 0–0.1 м, более молодой (622 ± 90 лет назад) – в просадке на глубине 0.6 м (см. рис. 3, А, Б, таблицу), что связано с вытаиванием ледяного ядра. В понижении над просадкой рост современных мхов продолжается, поэтому просевший торф может быть омоложен.

В разрезе останца террасы (расчистка R15-3, см. рис. 3, А) вскрыты пески, сверху с корнями современных растений, с параллельной мелковолнистой слоистостью, с линзами и комками аллохтонного торфа и тонкими прослоями автохтонного торфа; вскрытая мощность отложений 2.0 м. В песках отмечены охристые пятна и полосы на контактах слоев. Резкая пологонаклонная граница на глубине 0.5–0.6 м указывает на размыв подстилающих отложений. Седиментационная слоистость отложений СТС (до глубины 0.5 м) наруше-

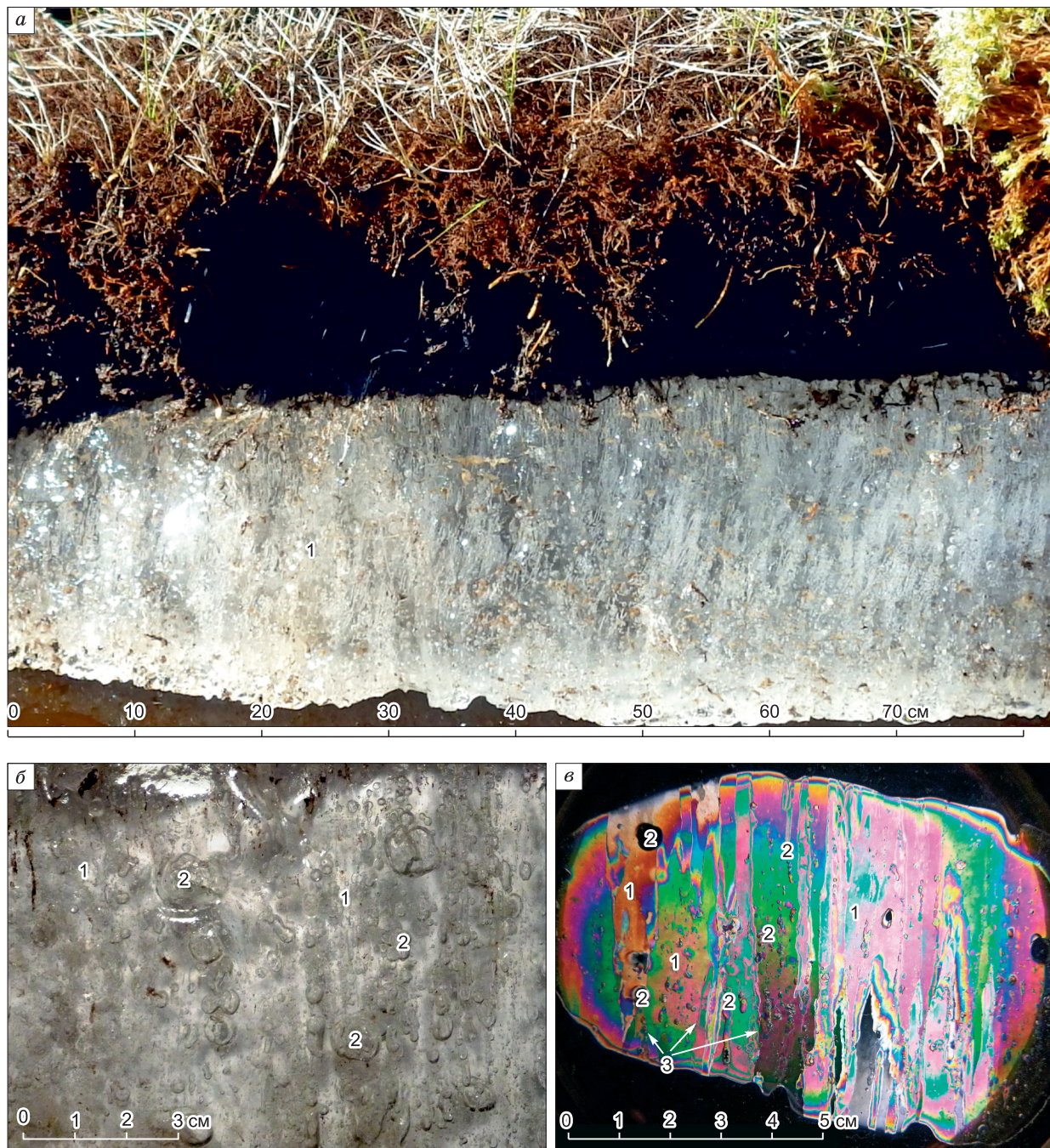


Рис. 4. Строение ледяного ядра бугра пучения на о. Белый: столбчатая структура льда (а), пузырьки газа во льду (б), кристаллическая структура льда (в).

1 – лед; 2 – пузырьки газа; 3 – границы кристаллов льда. Фото А.Н. Курчатовой.

на криотурбациями. Мерзлые отложения с массивной криотекстурой включают ледяные жилы: узкие элементарные (0.03–0.05 м) и широкие (вверху до 0.6–0.8 м). Широким жилам соответствуют дугообразные, линейные канавы и зияющие трещины отрыва на дренированном останце

террасы. Лед узких жил прозрачный, с четким швом посередине и пузырьками, ориентированными по нормали к боковым стенкам; по контакту с песком лед ожелезнен.

Отложения пляжа, вскрытые в разрезе R15-11 (см. рис. 3), представлены тальми слоистыми пес-

Радиоуглеродный возраст и изотопный состав углерода торфа бугров пучения о. Белый

Расчистка	Координаты	Глубина (см)	¹⁴ C-лет (от 1950 г. н.э.)	Календарные годы	Лабораторный номер	δ ¹³ C	Описание образца
R15-7	73°21'12.6" с.ш., 70°02'47.1" в.д.	60	622 ± 90	1220–1450	ИМКЭС-14C841	-24.2	Тороидальный бугор, торф из просадки
R15-7	73°21'12.6" с.ш., 70°02'47.1" в.д.	0–10	664 ± 97	1160–1450	ИМКЭС-14C849	-23.9	Тороидальный бугор, покровный торф бугра
R15-7	73°21'12.6" с.ш., 70°02'47.1" в.д.	55	105 ± 2	Современность	ИМКЭС-14C828	-24.9	Тороидальный бугор, современный торф из просадки
R15-8	73°21'13.4" с.ш., 70°02'46.8" в.д.	21	370 ± 71	1420–1660	ИМКЭС-14C840	-22.1	Покровный торф конусовидного бугра (периферия)
R15-8	73°21'13.4" с.ш., 70°02'46.8" в.д.	7	546 ± 88	1270–1520	ИМКЭС-14C831	-24.1	Покровный торф конусовидного бугра (вершина)

Примечание. Погрешность измерения δ¹³C не превысила ±0.2 ‰.

ками вскрытой мощностью 1.1 м, с гнездами и линзами намытых растительных остатков, с мелкими затеками, криотурбациями, охристыми пятнами и полосами.

По гранулометрическому составу отложения, слагающие высокую лайду, останец I террасы и бугры пучения, сходны. Они представлены преимущественно мелкозернистыми песками с примесями алевритовых и глинистых частиц не более 12 %. Пески пляжа представлены средне- и мелкозернистыми песками. Среднее содержание фракций в песках: 0.1–0.25 мм ~84 %; 0.25–0.5 мм <38 %; средний диаметр частиц (Md) – 0.19–0.23 мм, максимальный – 0.34–0.43 мм. Пески характеризуются хорошей сортировкой $S_0 = 1.2–1.3$ (см. рис. 3, Б). Внизу разрезов бугров пучения выделены водоупорные слои – среднесортированные ($S_0 = 2.6$) алевриты глинисто-песчаные (Md – 0.034 мм), которые содержат фракции: <0.005 мм – 10.6 %; 0.005–0.05 мм – 50.6 %; 0.05–0.1 мм – 17.8 %; 0.1–0.25 мм – 19.0 %.

Идентификация бугров пучения. Выделенные бугры пучения четко выражены на космических снимках Landsat (Google Earth), снимках высокого, сверхвысокого разрешения и на мультиспектральных аэрофотоснимках (АФС) масштаба 1:500, полученных в августе 2015 г. беспилотным летательным аппаратом ООО “Планер-Т” по заказу Российского центра освоения Арктики (г. Салехард, ЯНАО).

Плоским буграм на снимках (в видимом диапазоне спектра) соответствуют светло-серые округлые пятна с однородной мелкозернистой текстурой (см. рис. 2, б) среди темно- и светло-зеленых неправильных пятен (моховых кочек) на синеватом кружевном фоне озер и луж на высокой лайде.

Конусовидные бугры выделены как округлые белые пятна с ярко-зеленым или темно-серым ободком на фоне извилисто-полосчатых зеленых мохово-травянистых гряд и темных мочажин на склонах останца I террасы (см. рис. 2, з).

Тороидальные бугры на снимках дешифрируются как белые кольца и изогнутые замкнутые валы с темной, зеленой серединой (см. рис. 2, е). Отдельные бугры, их скопления и вытянутые гряды выделены на фоне светло-серой поверхности осушенных болот (см. рис. 2, и) на склоне останца I террасы с нечеткой полигонально-жильной сетью. В центре останца трапециевидные полигоны (до 10–12 м) пересечены линейными и дугообразными трещинами, на краях полигоны имеют форму ромбов.

Бугры с полигонально-жильными структурами на снимках отличаются темно-зелеными полосами, которые секут белые пятна на 2, 3 либо 4 части, распространены в обводненных понижениях высокой лайды (см. рис. 2, з).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ БУГРОВ ПУЧЕНИЯ

Бугры с ледяным ядром были изучены в августе; при глубине СТС 0.2–0.3 м лед не вытаивал полностью до начала промерзания в конце сентября, т. е. бугры являются многолетними. Об этом же свидетельствует их выраженность на космических снимках разных лет, отмерший растительный покров на поверхности бугров.

Генезис бугров. Залегание ледяного ядра под торфом характерно для бугров пучения. Прозрачность, вертикальная кристаллическая структура, столбчатая отдельность, отсутствие минеральных примесей и слоистости льда характерны как для сегрегационных, так и для инъекционных льдов [Втюрин, 1975; Попов и др., 1985]. Но выклинивание удлиненных крупных кристаллов льда, зажатые внутри них и по границам пузырьки воздуха, мелкие фрагменты мхов из перекрывающего торфа, отсутствие нарушения залегания кристаллов и льда с мелкокристаллической структурой свидетельствуют о медленном росте ледяного ядра при миграции влаги к фронту промерзания в полужамкнутых условиях. “Ножка” у ледяного ядра об-

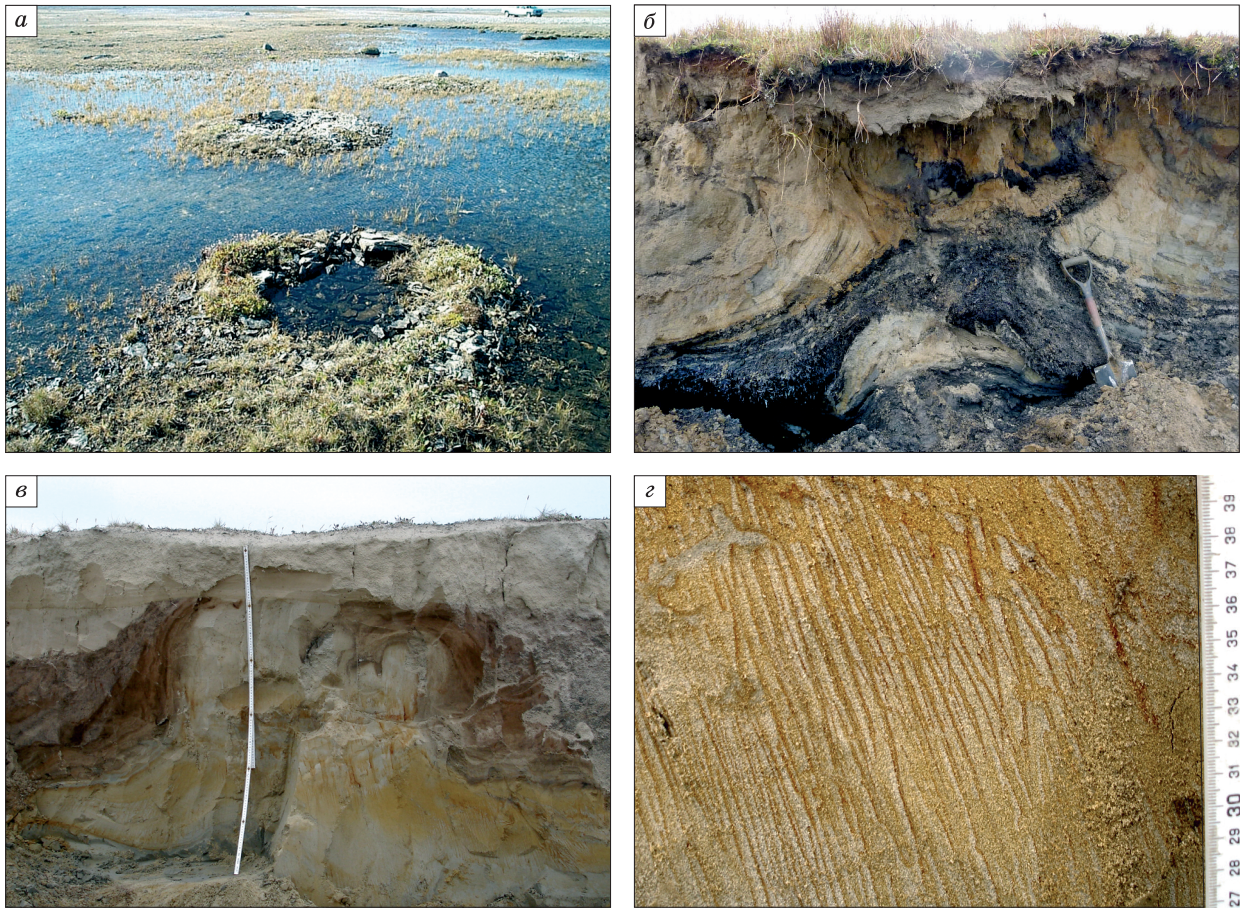


Рис. 5. Бугры пучения:

а – сезонные на заливаемых участках острова Виктория, Канада (фото В.Е. Ружанского); *б* – реликтовые погребенные в хасыряях, заливаемых морем на о. Сибирякова (фото Е.А. Слагоды); *в* – на Марресальских Кошках п-ова Ямал (фото О.Л. Опокиной); *г* – вертикально-полосчатое ожелезнение песков (следы вытаявания ледяного ядра бугра пучения) (увеличенный фрагмент рис. в, фото О.Л. Опокиной).

разована в результате подтопления бугра солоноватыми водами и протаивания льда сбоку.

Состав пузырьков газа во льду близок к атмосферному, но повышена доля углекислого газа, метана и отсутствует гелий, содержание $\delta^{13}\text{C}$ –61.88 ‰, что характерно для болотных газов, осадочных пород и свидетельствует о процессах разложения органики [Галимов и др., 1975]. Распределение пузырьков по границам и внутри кристаллов также указывает на постепенное поступление газа при росте льда. Вероятно, формированию крупных кристаллов способствовала засоленность песков лайды, пропитанных болотными и прибрежно-морскими водами. По полученным данным, бугры с ледяным ядром на ежегодно подтапливаемой морем лайде о. Белый относятся к многолетним миграционным.

Конусовидные и тороидальные разновидности бугров являются реликтовыми, поскольку ядра льда в них протаяли, отложения просели и

пропитаны охристыми соединениями железа, слоистость смята при пучении и просадке. Эти бугры приурочены к останцу I террасы, бровка которого в рельефе не выражена, и расположены параллельно его внешним контурам.

Изотопный состав углерода торфа реликтовых бугров пучения. Реликтовые бугры пучения содержали под торфом ледяное или льдистое песчаное ядро над глинистыми породами. Вероятно, они могли быть миграционными. Разложение торфа в холодных климатических условиях происходит медленно, поэтому его изотопный состав подобен изотопному составу углерода органического вещества [Skrzypek et al., 2008]. Изотопный состав ($\delta^{13}\text{C}$) наземных растений арктической зоны варьирует от –29 до –20 ‰, морского планктона – от –21 до –19 ‰ [Alewell et al., 2011; Krüger et al., 2014]. Исследование торфа в субарктике континентальной Канады показало, что изменения $\delta^{13}\text{C}$ также связаны с изменением летней температуры

воздуха: при ее повышении на 1 °С происходит утяжеление изотопного состава на 1.6 ‰ [Skrzypek et al., 2007]. Значения $\delta^{13}\text{C}$ торфа бугров пучения о. Белый варьируют от –24.9 до –22.1 ‰, что в основном соответствует болотным фитоценозам (см. таблицу).

Обстановки накопления отложений и формирования бугров. Бугры пучения сложены слоистыми сортированными песками с дефицитом тонкодисперсных частиц и перекрыты торфом. Пески накапливались в динамичной среде: в зонах волновой аккумуляции на литорали, пляже и низкой лайде и в активных водотоках [Трофимов и др., 2005]. По составу и криогенному строению пески сходны с отложениями I прибрежно-морской террасы о. Белый [Слагодя и др., 2013]. Торф формировался в спокойной застойной обстановке в зоне осушения–подтопления морскими солеными водами, в период формирования заболоченной лайды на сниженном останце террасы. Пучению торфа, образованию крупных кристаллов льда в ядре бугра способствовала засоленность болотных вод и осадков, понижающая температуру и замедляющая льдовыделение [Фотиев, 2011].

Торф конусовидных и тороидальных бугров формировался в холодный период позднего голоцена 1400–1814 гг. (см. таблицу) [Хантемиров, 2009]. Конусовидные бугры расположены в виде дуг на склоне останца террасы и, вероятно, могли формироваться при подтоплении–осушении поверхности вдоль берега моря. Тороидальные бугры расположены группами и грядами, они, по видимому, росли при подтоплении берегов водами мигрировавших на лайде морских протоков. Бугры могли протаять при увеличении глубины СТС как в период краткого потепления ~250 лет назад [Большиянов и др., 2009], так и при относительном повышении и дренаже поверхности. Плавника, указывающего на затопление этих бугров морем, нет.

Распространение реликтовых бугров в Карском регионе. Выраженность бугров пучения в рельефе лайды о. Белый, сохранность протаявших форм обусловлены их относительной молодостью. На о. Виктория (Канада) подобные формы сезонных бугров пучения выявлены на лайде и литорали (рис. 5, а) [Roujanski, 2008].

На о. Сибирякова отложения с инволюциями слоистости, инъекциями торфа и признаками вытаявания линз вертикально-слоистого льда в виде параллельных ржавых штрихов в песках присутствуют в разрезе борта хасырея (см. рис. 5, б). Верхняя часть толщи размыта и перекрыта склоновыми отложениями. Вероятно, образование бугров пучения с сегрегационным льдом было связано с регулярным подтоплением морем термокарстовой депрессии 4–3.5 тыс. лет назад [Опокина и др., 2014].

На низких террасах Западного Ямала реликты бугров пучения не описаны и редко выражены в рельефе. В разрезах они вскрыты в устье р. Яварь-Яха и в хасыреях I террасы м. Марре-Сале, затапливаемых морем при штормах. Верхние части бугров размыты, в разрезах сохранились разложенный торф, полигонально-жильные структуры, деформированные ядра песков с окристыми штрихами (следами вытаявания льда со столбчатой отдельностью), супеси с инволюциями (см. рис. 5, в, г) [Опокина и др., 2011].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлено распространение современных малоразмерных многолетних миграционных бугров пучения с ледяным ядром на подтапливаемой лайде о. Белый. Ледяное ядро формировалось при медленном промерзании болотных вод, обогащенных метаном и углекислым газом, о чем говорят кристаллическое строение и изотопный состав льда.

Протаявшие реликтовые бугры конической и тороидальной формы распространены на лайде и останце террасы о. Белый, подтапливаемых морем в позднем голоцене, на месте мигрировавших русел морских протоков.

Для них характерны просадки торфа, песчаное ожелезненное ядро, деформации слоистости отложений.

Реликты бугров пучения, выраженные в рельефе и разрезах мерзлых толщ в Карском регионе, могут служить показателем развития криогенного пучения в прибрежно-морской обстановке в голоцене – в условиях подтопления солеными водами лайды и хасыреев низких террас.

Работа выполнена по гранту РНФ (№ 14-17-00131), РФФИ-ЯНАО (проект № 16-45-890257).

Литература

- Бадю Ю.Б.** Геологическое строение криогенной толщи севера Западной Сибири // Инж. геология, 2011, № 1, с. 40–56.
- Белорусова Ж.М., Украинцева В.В.** Палеогеография позднего плейстоцена и голоцена бассейна р. Новой на Таймыре // Бот. журн., 1980, т. 65, № 3, с. 368–379.
- Большиянов Д.Ю., Макаров А.С., Морозова Е.А. и др.** Развитие природной среды полярных областей Земли последнего тысячелетия по данным изучения донных отложений озер // Проблемы Арктики и Антарктики, 2009, № 1 (81), с. 108–115.
- Бро Е.Г.** Отчет по обработке материалов бурения параметрической скважины Белый-1 (о. Белый, Карское море). Тема: IX((И.П.)/101(3,41)) 74-2/894. Программа бурения опорных и параметрических скважин на островах Советской Арктики в 1981–1985 гг. / Архангельскгеология, ВНИИ-океангеология. Архангельск, 1986, 321 с.
- Вагнер Г.А.** Научные методы датирования в геологии, археологии и истории / Г.А. Вагнер. М., Техносфера, 2006, 576 с.

- Васильчук Ю.К.** Выпуклые бугры пучения многолетнемерзлых торфяных массивов / Ю.К. Васильчук, А.К. Васильчук, Н.А. Буданцева и др. М., Изд-во Моск. ун-та, 2008, 572 с.
- Васильчук Ю.К.** Современное положение южной границы зоны многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской низменности // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 1, с. 17–27.
- Васильчук Ю.К., Васильчук А.К.** Инженерно-геологические и геохимические условия полигональных ландшафтов острова Белый (Карское море) // Инж. геология, 2015, № 1, с. 50–72.
- Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А. и др.** Миграционные бугры пучения на севере Западной Сибири: южный и северный пределы ареала и современная динамика // Инж. геология, 2012, № 3, с. 18–32.
- Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А. и др.** Миграционные бугры пучения в южной части криолитозоны Средней Сибири // Инж. геология, 2013, № 3, с. 14–34.
- Васильчук Ю.К., Лахтина О.В.** Развитие торфяных бугров в северных районах Западной Сибири в голоцене // Формирование мерзлых пород и прогноз криогенных процессов. М., Наука, 1986, с. 123–128.
- Васильчук Ю.К., Петрова Е.А., Васильчук А.К.** Некоторые черты палеогеографии голоцена Ямала // Бюл. Комиссии по изучению четвертичного периода. М., 1983, № 52, с. 73–89.
- Втюрин Б.И.** Подземные льды СССР / Б.И. Втюрин. М., Наука, 1975, 215 с.
- Галимов Э.М., Мигдисов А.А., Ронов А.Б.** Вариации изотопного состава карбонатного и органического углерода осадочных пород в истории Земли // Геохимия, 1975, № 3, с. 323–343.
- Достовалов Б.Н.** Общее мерзлотоведение / Б.Н. Достовалов, В.А. Кудрявцев. М., Изд-во Моск. ун-та, 1967, 404 с.
- Дубиков Г.И.** Состав и криогенное строение мерзлых толщ Западной Сибири / Г.И. Дубиков. М., ГЕОС, 2002, 246 с.
- Евсеев В.П.** К вопросу о закономерностях распространения миграционных бугров пучения на севере Западной Сибири и Печорской низменности // Природные условия Западной Сибири. М., 1975, вып. 5, с. 216–224.
- Ершов Э.Д.** Общая геокриология / Э.Д. Ершов. М., Изд-во Моск. ун-та, 2002, 682 с.
- Касымская М.В.** Сезонные и многолетние бугры пучения северо-востока полуострова Ямал // Науч.-исслед. публикации, 2014, № 15 (19), с. 13–18.
- Лейбман М.О., Москаленко Н.Г., Орехов П.Т. и др.** Взаимодействие криогенных и биотических компонентов геосистем в криолитозоне Западной Сибири на трансекте “Ямал” // Полярная криосфера и воды суши. М., Paulsen, 2011, с. 171–192.
- Опокина О.Л., Слагода Е.А., Васильев В.А. и др.** Деформации четвертичных отложений Карского региона и связь с криогенными процессами // Материалы Четвертой конф. геокриологов России. М., 2011, т. 2, с. 130–136.
- Опокина О.Л., Слагода Е.А., Томберг И.В. и др.** Колебания уровня моря и их отражение в составе и строении полигонально-жильных льдов в низовьях Енисея // Лед и снег, 2014, № 2 (126), с. 82–90.
- Попов А.И.** Подземное оледенение Северной Евразии // Подземный лед. М., Изд-во Моск. ун-та, 1965, вып. 2, с. 46–73.
- Попов А.И.** Мерзлотные явления в земной коре (криолитология) / А.И. Попов. М., Изд-во Моск. ун-та, 1967, 304 с.
- Попов А.И.** Криолитология / А.И. Попов, Г.Э. Розенбаум, Н.В. Тумель. М., Изд-во Моск. ун-та, 1985, 239 с.
- Романовский Н.Н.** Основы криогенеза литосферы / Н.Н. Романовский. М., Изд-во Моск. ун-та, 1993, 335 с.
- Слагода Е.А., Лейбман М.О., Хомутов А.В., Орехов П.Т.** Криолитологическое строение первой террасы острова Белый в Карском море (Часть 1) // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 4, с. 11–21.
- Трофимов В.Т.** Геокриологическое районирование Западно-Сибирской плиты / В.Т. Трофимов, Ю.В. Бадю, Ю.К. Васильчук и др. М., Наука, 1987, 224 с.
- Трофимов В.Т.** Геокриология СССР. Т. 2. Западная Сибирь / В.Т. Трофимов, Ю.К. Васильчук, В.В. Баулин и др. М., Недра, 1989, 454 с.
- Трофимов В.Т.** Грунтоведение / В.Т. Трофимов, В.А. Королев, Е.А. Вознесенский и др.. М., Изд-во Моск. ун-та, 2005, 1024 с.
- Фотиев С.М.** Механизм формирования инъекционных жил льда и гидролакколитов // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 2, с. 44–55.
- Хантемиров Р.М.** Динамика древесной растительности и изменения климата на севере Западной Сибири в голоцене: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Екатеринбург, 2009, 43 с.
- Alewell C., Giesler R., Klaminder J. et al.** Stable carbon isotopes as indicators for environmental change in peatlands // Biogeosciences, 2011, vol. 8, p. 1769–1778.
- Alexanderson H., Adrielsson L., Hjort C. et al.** Depositional history of the North Taymyr ice-marginal zone. Siberia – a landsystem approach // J. Quatern. Sci., 2002, vol. 17, No. 4, p. 361–382.
- Krüger J.P., Leifeld J., Alewell C.** Degradation changes stable carbon isotope depth profiles in peatlands // Biogeosciences, 2014, vol. 11, p. 3369–3380.
- Mackay J.R.** The growth of pingos, Western Arctic Coast, Canada // Can. J. Earth Sci., 1973, No. 10, p. 979–1004.
- OxCal Program v3.9.** – URL: <http://c14.arch.ox.ac.uk> (дата обращения: 25.04.2016).
- Roujanski V.E.** Stone frost mounds in shallow bedrock depressions at Lady Franklin Point, Victoria Island, Nunavut, Canada // Ninth Intern. Conf. on Permafrost. Fairbanks, Alaska, USA, 2008, p. 1537–1542.
- Seppälä M.** Stratigraphy of a silt-cored peat, Atlin Region, British Columbia, Canada // Arctic, 1980, vol. 33, No. 2, p. 357–365.
- Skrzypek G., Debajyoti P., Wojtuń B.** Stable isotope composition of plants and peat from Arctic mire and geothermal area in Iceland // Pol. Polar Res., 2008, vol. 29 (4), p. 365–376.
- Skrzypek G., Kałużny A., Wojtuń B., Jędrysek M.O.** The carbon stable isotopic composition of mosses – the record of temperature variations // Organic Geochem., 2007, No. 38, p. 1770–1781.
- Walker D.A., Orekhov P., Frost G.V. et al.** The 2009 Yamal Expeditions to Ostrov Belyy and Kharp, Yamal Region, Russia / Data Report of the Alaska Geobotany Center, Institute of Arctic Biology, University of Alaska Fairbanks, Fairbanks, 2009, 70 p. www.rp5.ru/Архив_погоды_на_метеостанции_им._М.В.Попова (дата обращения: 16.11.2015).

Поступила в редакцию
30 мая 2016 г.