

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПОЛИГОНАЛЬНЫХ ЛАНДШАФТОВ ОСТРОВА БЕЛЫЙ (КАРСКОЕ МОРЕ) ENGINEERING-GEOLOGICAL AND GEOCHEMICAL CONDITIONS OF POLYGONAL LANDSCAPES ON THE BELYY ISLAND (THE KARA SEA)

ВАСИЛЬЧУК А.К.

Старший научный сотрудник географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, д.г.н., г. Москва, alla-vasilch@yandex.ru

ВАСИЛЬЧУК Ю.К.

Профессор географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, д.г.-м.н., действительный член Российской академии естественных наук, г. Москва, vasilch@geol.msu.ru, vasilch_geo@mail.ru

VASIL'CHUK A.C.

Senior staff scientist of the Geography Faculty of Lomonosov Moscow State University, DSc (doctor of science in Geography), Moscow, alla-vasilch@yandex.ru

VASIL'CHUK YU.K.

Professor of the Geography Faculty of Lomonosov Moscow State University, DSc (doctor of science in Geology and Mineralogy), member of the Russian Academy of Natural Sciences, Moscow, vasilch@geol.msu.ru, vasilch_geo@mail.ru

Ключевые слова:

остров Белый; криогенные ландшафты; высокоминерализованные повторно-жильные льды; криопэги; изменения температуры грунтов; пыльца; споры; инженерные изыскания.

Key words:

Belyy Island; polygonal landscapes; highly mineralized ice wedges; cryopegs; soil temperature changes; pollen; spores; engineering surveys.

Аннотация

Рассмотрены факторы, определяющие инженерно-геологические аспекты освоения территории острова Белый (Карское море): широкое развитие полигональных ландшафтов и особый геохимический фон — засоление грунтов и повторно-жильных льдов, наличие криопэгов. Прослежены изменения температур грунтов за последние 40 лет. По сравнению с 1972 г. в 2009 г. температура грунтов, слагающих первую морскую террасу, повысилась на 2,4°C. В толще первой террасы изучены повторно-жильные льды, характеризующиеся минерализацией от 816 до 1240 мг/л, однако встречены и ультрапресные жилы с содержанием солей 36–45 мг/л. Высокая минерализация объясняется локальным влиянием засоленных озер. Повторно-жильные льды в толще лайды менее минерализованы (60–268 мг/л). Наиболее существенная минерализация зафиксирована для криопэгов — она составляет более 110 г/л, что намного выше, чем у морской воды. Сделан вывод, что высокая минерализация изученных повторно-жильных льдов и их постоянный хлоридно-натриевый состав указывают на их субкавальное сингенетическое накопление при смене фациальных и климатических условий.

Abstract

The article deals with the factors determining engineering-geological peculiarities of the Belyy Island (the Kara Sea) such as wide spread of polygonal landscapes and special geochemical background (salinization of soils and ice wedges, presence of cryopegs). The soil temperature changes over the last 40 years are traced. In 2009 the temperature of soils of the first marine terrace increased by 2,4°C in comparison with 1972. Ice wedges having the salinity of 816–1240 mg/l were investigated within the first terrace, but ultra-fresh ice wedges with the salt content of 36–45 mg/l were also found. The high mineralization is explained by local influence of the saline lakes. The ice wedges within the marshes are less mineralized (60–268 mg/l). The most significant mineralization is observed in cryopegs. It is more than 110 g/l that is much more than in the seawater. The authors conclude that the high mineralization and stable sodium-chloride composition indicate ice wedge subaqueous syngenetic accumulation during changing facial and climatic conditions.

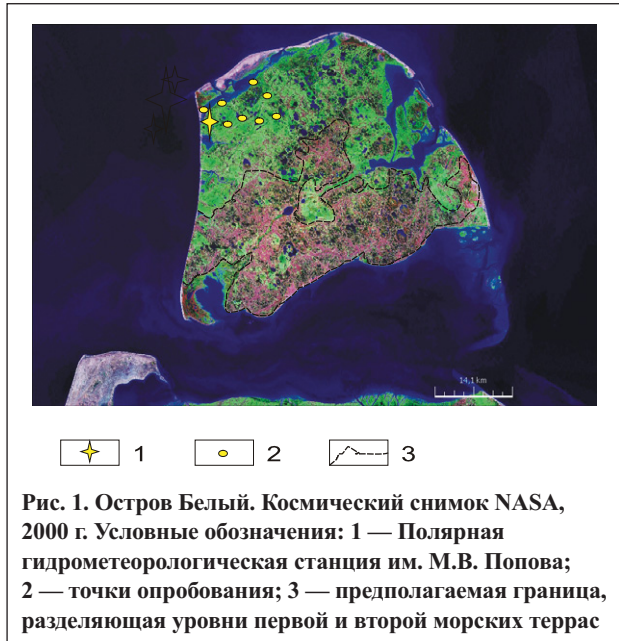
Введение

Остров Белый (73°15' с.ш., 70°50' в.д. — 73°25' с.ш., 70°03' в.д.) расположен в Карском море и отделен от полуострова Ямал проливом. Его площадь составляет 1900 км², высота — до 12 м. Исследования инженерно-геологических условий проводились в районе Полярной гидрометеорологической станции им. М.В. Попова (рис. 1, 2, а).

Этот остров считался у ненцев священным, там было капище одного из верховных богов ненецкого пантеона — Сэр Ири Нго, поэтому туда старались не пускать чужаков. Первым на остров смог проникнуть В.П.

Евладов, который совместно с Уральским комитетом Севера организовал в 1928–1929 гг. научную экспедицию по тундрам Ямала. Им были зафиксированы почти все крупные культовые места ненцев [8]. Ему в 1928 г. удалось посетить и описать главную святыню ненцев на острове Белый, который ненцы называли Белым Стариком (Сэр Ири Нго) [10].

В ноябре 1933 г. на берегу протоки Рогозина в 800 м от Карского моря на северо-западном берегу острова Белый была открыта Полярная гидрометеорологическая станция им. М.В. Попова (рис. 3). К настоящему времени воздействие цивилизации на уязвимые экосистемы острова продолжается уже более 80 лет, и оно



весьма заметно. В том числе скопилось немало антропогенного мусора — в основном заиленных бочек из-под топлива (рис. 4). Помимо железа среди отходов есть еще техническая резина, каучук, горюче-смазочные материалы. Переработать отравляющий все вокруг мусор на острове невозможно — он подлежит утилизации и вывозу.

Именно поэтому на острове Белый уже три года работает экологическая экспедиция волонтеров по очистке его от строительного и технического хлама. Реабилитация острова стала одной из приоритетных задач для правительства Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО): в настоящее время отсюда вывозится 75-100 т металлолома в год [11]. После того как весь мусор будет вывезен, необходима рекультивация земель. Один из путей рекультивации — использование абсорбента на основе модифицированного сфагнового мохового торфа, который подходит для территории арктических тундр. Суть модификации торфа состоит в том, что при высокотемпературной обработке он меняет свои свойства с гидрофильных на гид-

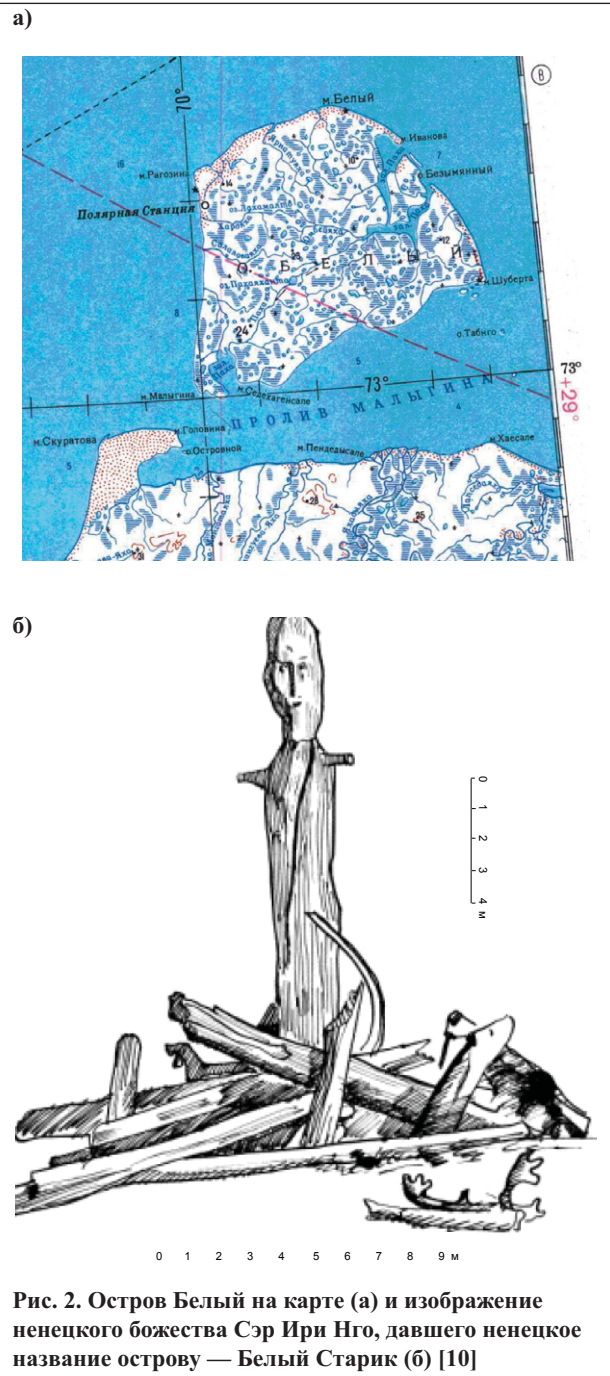


Рис. 3. Полярная гидрометеорологическая станция им. М.В. Попова у протоки Рогозина на острове Белый (фото Г. Шпикалова)



Рис. 4. Скопление бочек из-под горючего на острове Белый и пролившееся горючее, которое постепенно загрязняет территорию, распространяясь по поверхности острова и по подошве сезонно-талого слоя (фото Г. Шпикалова)

рофобные и олеофильные. Его гуминовая составляющая при этом работает как катализатор активности аборигенного биоценоза, ускоряя его взаимодействие с углеводородами. После биологического распада углеводородов торфяная капсула переходит в гидрофильное состояние и начинает впитывать воду, как в обычных природных условиях, становясь полезным компонентом биогеоценоза [9].

Ликвидация последствий нерационального использования хрупких арктических экосистем особенно важна, поскольку остров является местом временного обитания белых медведей, которые появляются здесь и летом, и зимой (рис. 5). Их самки устраивают на острове родовые берлоги, где производят на свет потомство и первое время его растят. Также только здесь отмечается присутствие небольшого количества диких оленей, которых на Ямале вытеснили домашние (рис. 6). Кроме белых медведей и диких оленей тут встречаются песцы, россомахи, а также такие краснокнижные виды, как малый лебедь, белоклювая гагара, атлантический морж.

Географическое положение острова Белый позволяет отслеживать многие атмосферные процессы, происходящие в западном секторе Арктики, поэтому

организация наблюдательной научной станции этого региона, как подчеркивается в резолюции Десятой международной конференции по мерзлотоведению «Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире», целесообразна именно здесь. На сегодняшний день четыре таких наблюдательных станции находятся в Канаде, три — в прибрежных областях США, две — на Северо-Востоке РФ (полярная геокосмофизическая обсерватория «Тикси» и станция «Плейстоценовый парк», созданная недалеко от поселка Черский С.А. Зимовым). Западный сектор Арктики пока такой наблюдательной станции не имеет.

Освоение острова Белый предполагает оценку условий инженерно-хозяйственной деятельности человека. В данном случае наиболее важны криолитологические условия и современные геологические процессы, с ними связанные.

Рельеф

Поверхность острова Белый равнинная. Его северное и восточное побережья низкие, песчаные, на западном и южном местах встречаются обнажения вы-



Рис. 5. Остров Белый часто посещают белые медведи и вплотную приближаются к Полярной станции им. М.В. Попова (фото С. Анисимова)



Рис. 6. Дикие олени на острове Белый выживают, спасаясь от стресса, созданного перевыпасом домашних оленей и освоением нефтегазовых месторождений на полуострове Ямал (фото Е. Андреева)



сотой до 6 м. Среди геоморфологических уровней выделяются: отмели, пляж, лайда, первая морская терраса (с высотными отметками 3-7 м), вторая морская терраса (6-12 м).

На малых островах взаимосвязь природных компонентов гораздо заметнее, теснее по сравнению с крупными участками суши. Взаимоотношения условий, факторов и процессов рельефообразования на них чрезвычайно сложны и разнообразны. Такие острова чутко реагируют на изменения уровня Мирового океана, поэтому несущественные (до 1 м) поднятия уровня моря могут значительно сократить площадь или даже привести к исчезновению целого острова [3].

Большая часть острова Белый находится на уровнях 3-6 м. Слагающие его грунты характеризуются высокой макрольдистостью, поэтому даже небольшое изменение уровня Карского моря может сказаться и на размерах острова, и на инженерно-геологических свойствах его грунтов.

Климат

Длительная зима, короткое прохладное лето, сильные ветры, незначительная мощность снежного покрова — все это способствует низким температурам грунтов. Характерной чертой является преобладание циклонического типа погоды в течение всего года, особенно в переходные сезоны и в начале зимы. В связи с этим с декабря по февраль, а также в августе и сентябре наблюдаются туманы. Довольно часты магнитные бури: в зимнее время они нередко сопровождаются полярным сиянием. Среднегодовая температура воздуха составляет минус 10,6 °С (табл. 1). Зима холодная, длится около 8 месяцев. Особенность зимнего периода — отсутствие выраженного периода с минимальными температурами. Лето короткое, умеренно прохладное. Сумма зимних температур (т.е. сумма среднесуточных температур ниже 0 °С) составляет минус 4 151 °С, сумма летних температур равна 372 °С. Среднегодовая температура воздуха за 30-40 лет до 1966 г. составляла минус 10,4 °С, средняя за февраль (самый холодный месяц) — минус 24,2 °С, средняя за август (самый теплый месяц) — плюс 5,3 °С. Минимальные температуры опускаются до минус 59 °С. Сумма осадков составляет 258 мм/год. С ноября по март выпадает 87 мм, а с апреля по октябрь — 171 мм осадков. Максимум осадков выпадает в августе (около 20 мм), минимум — в апреле (примерно 14 мм). Мощность снегового по-

крова в ноябре в среднем составляет 11 см, в начале мая — 50 см. Средняя дата таяния снежного покрова — 11 июня. Погода на острове весьма неустойчива. Так, в феврале 2015 г. отмечались значительные колебания среднесуточных температур воздуха — от минус 5,4 до минус 43,6 °С [1].

Растительность

Остров Белый расположен в подзоне арктических тундр. Растительность представлена различными видами мхов, тундровыми травами, местами стелющейся карликовой ивой. Здесь обнаружено 75 видов сосудистых растений, относящихся к 34 родам и 16 семействам. Доминируют семейства Poaceae (20 видов), Cyperaceae (11 видов) и Ranunculaceae (9 видов). Представлены также семейства Caryophyllaceae (7 видов), Brassicaceae (7 видов), Saxifragaceae (6 видов), Juncaceae (3 вида), Salicaceae (3 вида), Rosaceae (3 вида), Polygonaceae (2 вида), а также по одному виду из семейств Equisetaceae, Huperziaceae, Liliaceae, Ericaceae, Scrophulariaceae и Asteraceae [22, 29].

Среди долготных географических групп абсолютно преобладают циркумполярные виды (70,7%), среди широтных — виды арктической фракции (78,7-52% арктических видов и 26,7% арктоальпийских).

Проведенные исследования субфоссильных палиноспектров показали, что в их составе доминирует пыльца Poaceae и Cyperaceae, которая в сумме составляет более 60%, отражая преобладание растений этих семейств в растительном покрове. Пыльца остальных встречающихся в растительном покрове семейств также отмечается, но, как правило, единично, часто не соответствуя роли этих представителей в растительных сообществах. Для субфоссильных спектров характерно сравнительно высокое содержание заносной пыльцы сосны обыкновенной (до 10%) и сибирского кедра (до 9%), содержание пыльцы ели в большинстве изученных образцов составило около 2%. Вероятно, это фоновые региональные значения. По сравнению с северными районами Ямала роль пыльцы кустарников карликовой березки и ольховника несущественна (1-4%), пыльца ивы встречена в единственной поверхностной пробе (непосредственно рядом с растением), пыльца полыни встречается единично [4].

Согласно флористическому анализу флора острова является молодой арктической флорой, заселившей осушенный шельф Северного Ледовитого океана в

Таблица 1

Температуры воздуха и осадки на острове Белый в 1966–1970 гг. (по [20])						
Характеристика	Год					Среднее
	1966	1967	1968	1969	1970	
Среднегодовые и среднемноголетние температуры воздуха, °С	-12,8	-9,3	-12,4	-11,5	-11,3	-11,6
Амплитуды температур воздуха, °С	36,5	36,6	31,8	32,1	33,1	34,0
Среднемесячные температуры самого холодного месяца, °С	-33,4	-31,0	-27,7	-28,4	-28,0	-
Среднемесячные температуры самого теплого месяца, °С	3,1	5,6	4,1	3,7	3,1	-
Годовые и среднемноголетние суммы осадков, мм	288	313	489	257	259	321

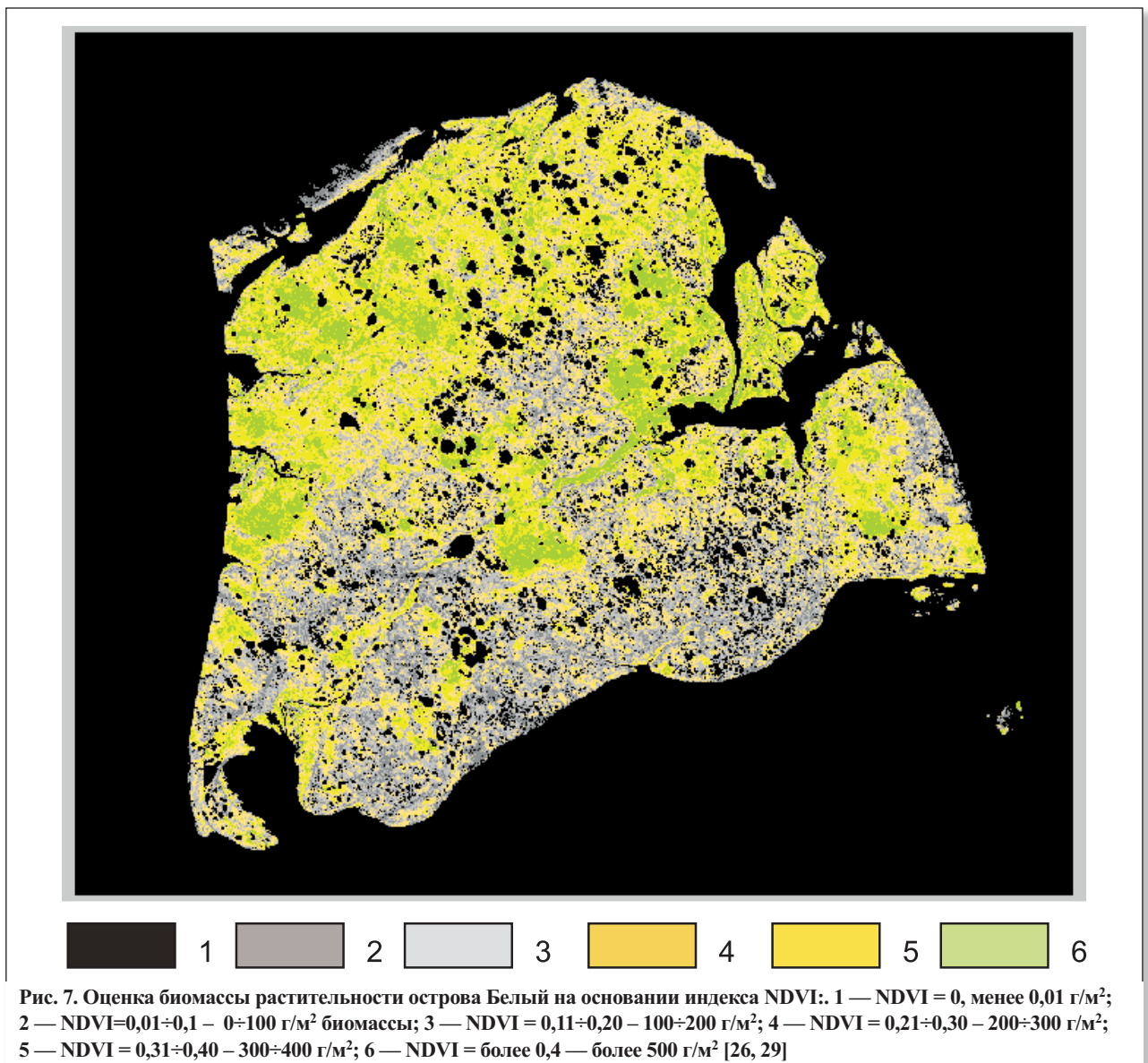
начале голоцена и находящейся на стадии формирования [12].

Оценка растительности острова Белый, проведенная на основании полевых исследований и индекса NDVI¹, который опосредованно отражает количество растительной биомассы [26, 29], показала, что оно является наименьшим на сухих песчаных участках (0-100 г/м²), средним — на суглинистых тундровых участках со средним увлажнением (100-400 г/м²), максимальным — на увлажненных тундровых участках (более 500 г/м²) (рис. 7).

На сухих песчаных участках исследователи отметили наиболее низкие температуры грунтов [29]. Таким образом, было подтверждено, что биомасса связана с температурным режимом грунтов. Участки, на которых развиты песчаные грунты, как показали исследования, существенно промерзают в зимний период из-за перевевания снега и низкой толщины снежного покрова на наиболее высоких высотных отметках — на второй морской террасе [29].

Криогенные ландшафты

Преобладающие ландшафты на острове — полигональные. Наблюдается широкое развитие полигонов, почти повсеместно отмечаемых на поверхности первой морской террасы (см. рис. 8, а). Они проявляются с разной степенью четкости, более явно — в пределах сильно обводненных участков (рис. 8, б). Полигоны, как правило, выпуклые, размером от 5×5 до 10×7 м. На крупную полигональную сеть нередко накладывается более мелкая с полигонами порядка 1,5×1,2 м, на субаквальных участках она особенно заметна. Ширина канавок сопоставима с размерами полигонов и достигает 4 м. Нередко полигоны имеют форму плоских бугров округлой и овальной формы. На поверхности лайды отмечаются полигоны со сторонами до 40-50 м (в среднем 25-26 м), разделенные канавками шириной от 0,3-0,4 до 2,5 м и глубиной 0,10-0,15 м.



¹ NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) — нормализованный относительный индекс растительности, или вегетационный индекс, являющийся показателем количества фотосинтетически активной биомассы. Вычисляется по формуле: $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$, где NIR — отражение в ближней инфракрасной области спектра; RED — отражение в красной области спектра (<http://gis-lab.info/qa/ndvi.html>).



Современные экзогенные геологические процессы

Современные экзогенные геологические процессы определяют облик острова Белый. Большое значение в преобразовании рельефа имеют мерзлотные и эрозионные процессы, а также абразия. Важную роль в развитии абразионных процессов играют приливные и сгонно-нагонные течения. Скорость приливных течений у острова достигает 150 см/с, что значительно превышает скорости постоянных течений в Карском море. Приливные изменения уровня поверхности моря сравнительно невелики и в среднем составляют 0,5-0,8 м. Нередко их затушевывают сгонно-нагонные колебания уровня, которые на материковом берегу моря больше 1 м, а в глубине заливов и губ в безледные сезоны доходят до 2 м и более.

В прибрежных районах активно развиваются процессы абразионного разрушения сильнольдистых отложений (рис. 9) и накопления тонкодисперсных отложений на современном пляже и низкой лайде. В 1940-х гг. скорость отступления бровки оценивалась начальником Полярной станции им. М.В. Попова Ф.П. Снегиревым величиной 1,0-1,5 м в год. За 20 лет, с 1974 по 1994 г., береговые уступы отступили на 7-8 м (со скоростью 0,3-0,4 м/год), а летом 1991 г. на некоторых участках из-за сильных штормов берег отступил на 20 м [13]. Из-за разрушения берегов ме-

теоплощадку за время существования метеостанции переносили несколько раз.

Главным фактором развития термоабразии Ф.А. Романенко [13] считает ледовую обстановку. При сплошном ледовом покрове берега практически не подмываются, а при длительно открытом море сильные ветры, нагоны и приливные явления вызывают разрушения нередко катастрофических размеров. Особенно значительны скорости отступления берегов во время штормов, когда подмываются и отваливаются целые блоки грунта и бровка уступа сразу уходит на несколько метров.

Большой научный и практический интерес представляет вопрос о многолетних колебаниях интенсивности геоморфологических процессов. В XX веке климат в Арктике несколько изменился. По данным наблюдений полярных станций, 1930–1940-е гг. приходится на теплую фазу, 1950–1960-е — на холодную, а с 1970-х гг. (по настоящее время) снова наблюдается потепление. На 1930–1960-е гг. приходится и большая часть полученных авторами геоморфологических материалов. Их анализ показывает, что период потепления 1930-1940-х гг. сопровождался и заметной активностью геоморфологических процессов. При похолодании 1950-х гг. интенсивность некоторых из них иногда уменьшалась, а локальная активизация обычно обуславливалась деятельностью человека. В настоящее время эти процессы продолжают развиваться примерно с той же интенсивностью, что и ранее.

Главные экзогенные процессы на острове — криогенные, в первую очередь растрескивание и пучение. Это подчеркивается повсеместным развитием полигонов. Как уже отмечалось, полигоны в основном являются выпуклыми, их размеры на первой террасе составляют от 5×5 до 7×10 м. В пределах лайды они, как правило, имеют большую площадь. На лайде стороны полигонов варьируют в пределах 25–50 м, их контуры часто незамкнуты. Ширина канавок тоже сильно варьи-

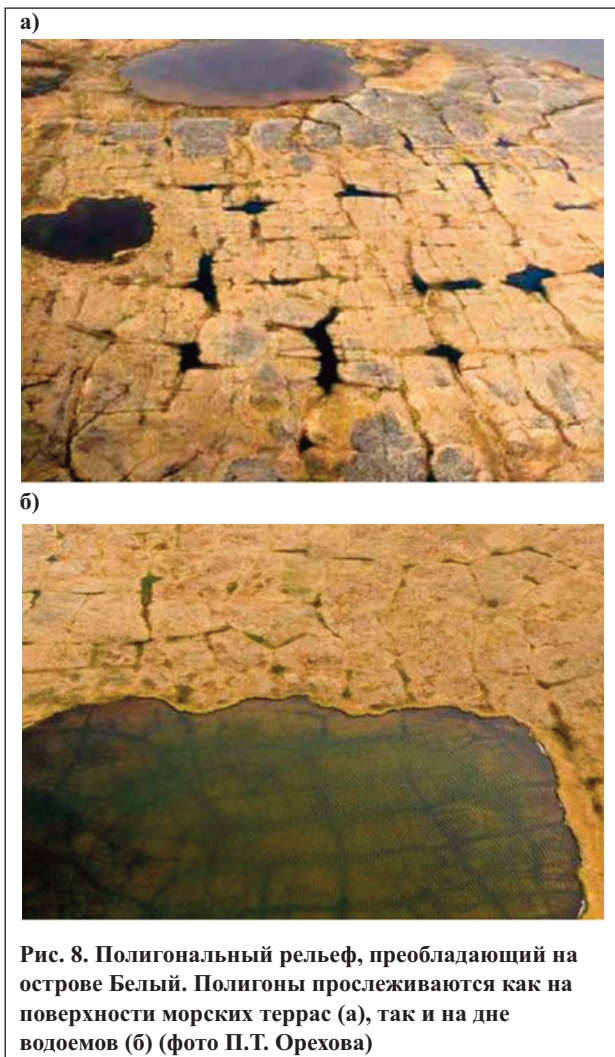


Рис. 8. Полигональный рельеф, преобладающий на острове Белый. Полигоны прослеживаются как на поверхности морских террас (а), так и на дне водоемов (б) (фото П.Т. Орехова)



Рис. 9. Разрушение льдистых берегов острова Белый (фото С. Анисимова)

ирует. Развиты также процессы пучения, антропогенного термокарста.

На суглинистых участках поверхности первой морской террасы описан мелкополигональный рельеф [27, 29]. Полигоны здесь имеют стороны 20-50 см (рис. 10, а). На них в виде корки отмечен в основном печеночник (*Gymnomitrium corallioides*), а по трещинам — листостебельный мох (*Racomitrium lanuginosum*). На поверхности полигонов также часто встречаются *Salix nummularia* и *Luzula confusa*.

Снятие поверхностного слоя (рис. 10, б, в) позволило проследить глубину проникновения трещин. Наиболее глубокие Г.В. Матышак отметил в более увлажненных местах [27].

Геокриологические особенности

Мощность многолетнемерзлых пород (ММП) в среднем составляет 2-10 м на пляже, 30 м на современной лайде, до 50–80 м в ее тыловых частях. В пределах первой морской террасы мощность ММП варьирует от 65 до 165 м, в среднем составляя 125 м [19]. Величина слоя сезонного протаивания (активного слоя) на поверхности первой террасы на полигонах, по данным наблюдений авторов, в конце 1970-х гг. в сентябре составляла 18-23 см, а в канавках — 35–40 см. по данным замеров 2009 г. [29], глубина сезонного протаивания колеблется от 65 до 98 см на полигонах, от 68,3 до 92 см в канавках, от 48 до 65 см в пределах участков пятнистых тундр. На отмели в 1978 г. была зафиксирована глубина протаивания 1,5 м.

Бурение и замеры температур проводились на острове Белый в рамках выполнения работ Тюменской экспедиции МГУ. В 1972 г. В.Г. Кудряшов выполнил бурение скважин на первой террасе и на лайде.

В пределах лайды была пробурена скважина в центре полигона (в точке 148-К), где в интервале 0–1,5 м был вскрыт мелкий серый песок, талый до глубины 0,3 м, в интервале 1,5-9,5 м — мерзлый серый суглинок (бурение выполнялось шнеком, поэтому криотекстура не была установлена).

В скважине, заложенной в центре полигональной канавки на поверхности первой морской террасы (в точке 149-К), сверху вниз были вскрыты:

- 0,0–0,8 м — темно-серая супесь с горизонтально слоистой криотекстурой и льдистостью 60%;
- 0,8–2,4 м — повторно-жильный лед;
- 2,4-9,6 м — темно-серая супесь с включениями и горизонтальными прослоями растительного детрита и тонкими прослоями светло-серого пылеватого песка.

С глубины 4,0 м было отмечено ритмичное переслаивание тонких прослоев песка и супеси с горизонтальной и косой (под углом 60–70°) слоистостью, горизонтально-слоистой криотекстурой. С интервалом 5–10 см наблюдались шлиры льда толщиной 0,5–1,0 см, встречались редкие шлиры толщиной 2-3 см.

Через 6 лет примерно в этом же месте, но в центре выпуклого полигона размером около 7×10 м авторами данной статьи была пробурена скважина и выполнено повторное измерение температур (табл. 2).

В скважине, пробуренной авторами в 1 км к востоку от Полярной станции им. М.В. Попова на плоской по-

верхности первой террасы (в точке 206-YuV), были вскрыты сверху вниз:

- 0-0,10 м — мох, подстилаемый темно-коричневым торфом;
- 0,10-0,20 м — талая светло-серая глина;
- 0,20-0,60 м — лед, с глубины 0,25 м сильно загрязненный, слоистый за счет переслаивания матового и прозрачного льда;
- 0,60-0,85 м — серовато-желтый песок с криотекстурой от массивной до тонкошлировой, среднесетчатой;
- 0,85-1,00 м — серовато-бурая оторфованная глина с базальной криотекстурой и льдистостью 40%;
- 1,00–1,15 м — серый мелкий песок с массивной криотекстурой и льдистостью 5-8%;

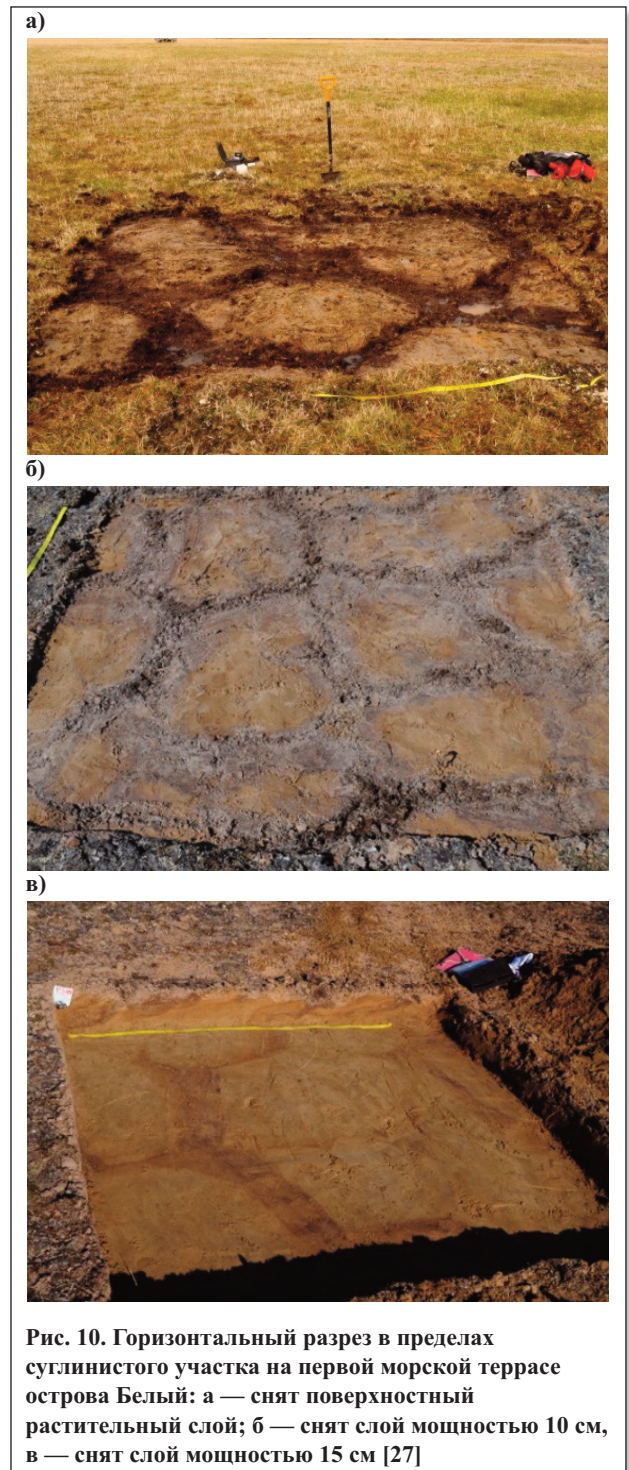


Рис. 10. Горизонтальный разрез в пределах суглинистого участка на первой морской террасе острова Белый: а — снят поверхностный растительный слой; б — снят слой мощностью 10 см, в — снят слой мощностью 15 см [27]



Таблица 2

Температура мерзлых грунтов (°С) в разрезе первой морской террасы острова Белый по данным скважин, пробуренных в 1972 и 1978 гг.				
Глубина, м	Дата, место точка			
	23.08.1972, лайда, 148-К	26.08.1972, первая терраса, 149-К	2.09.1978, первая терраса, 206-YuV	3.09.1978, первая терраса, 206-YuV
0	-	-	+1,4	+1,8
0,5	+4,6	+0,5	-	-
1,0	+1,4	-1,5	-1,2	-1,0
1,5	-0,1	-3,1	-	-
2,0	-	-	-3,6	-3,5
2,5	-5,7	-5,7	-	-
3,0	-	-	-5,9	-5,9
3,5	-8	-7,4	-	-
4,0	-	-	-8,1	-8,0
4,5	-8,7	-8,9	-	-
5,0	-	-	-8,1	-8,1
5,5	-8,5	-9,3	-	-
6,0	-	-	-8,6	-8,6
6,5	-8,4	-9,7	-	-
7,0	-	-	-8,6	-8,6
7,5	-8,4	-9,7	-	-
8,0	-	-	-8,5	-8,5
8,5	-8,4	-9,6	-	-
9,0	-	-	-8,5	-8,5
9,5	-8,4	-9,5	-	-

- 1,15-1,30 м — вертикальный контакт серого ожелезненного песка и сильнотлистой серо-бурой глины;
- 1,30-2,20 м — серовато-бурая глина с прослоями песка и черного ила, с микрошлировой среднеслоистой криотекстурой;
- 2,20-2,75 м — тонкое переслаивание серовато-бурой глины и белого песка с тонкошлировой среднеслоистой криотекстурой;
- 2,75-3,30 м — косое переслаивание серовато-бурой глины, серого песка и коричневого торфа с мощностью прослоев 0,5-0,7 см и среднеслоистой микрошлировой криотекстурой;
- 3,30-3,80 м — тонкое переслаивание серовато-бурой глины и серого песка с среднесетчатой тонкошлировой криотекстурой;
- 3,80-3,90 м — серовато-бурая глина с базальной криотекстурой и льдистостью 40%;
- 3,90-4,40 м — серый песок с редкими прослоями серовато-бурой глины с неполносетчатой тонкошлировой криотекстурой;
- 4,40-5,20 м — сильнотлистая серая глина с базальной и крупносетчатой криотекстурой;
- 5,20-5,60 м — переслаивание серой глины, белого песка и желто-серого песка с крупносетчатой мелкошлировой криотекстурой;
- 5,60-6,10 м — сильнотлистая серая глина с частослоистой тонкошлировой криотекстурой;
- 6,10-8,10 м — сильнотлистая серая со стальным отливом глина с неполносетчатой тонкошлировой криотекстурой;
- 8,10-9,10 м — среднетлистая серая оскольчатая глина, сверху опесчаненная, с массивной криотекстурой.

Было выполнено определение свойств грунтов из скважин, пробуренных на первой террасе (табл. 3).

В приборочном обнажении у морской протоки (в точках 207-YuV, 208-YuV, 209-YuV) сверху вниз были вскрыты:

- 0-0,03(до 0,10 м) — моховая подстилка;

Таблица 3

Свойства мерзлых грунтов первой морской террасы острова Белый					
Точка	Грунт	Глубина, м	Влажность, %	Плотность мерзлого грунта, г/см ³	Плотность скелета грунта, г/см ³
206-YuV	Глина серая	4,4-4,5	21,0	1,98	1,63
	Переслаивающиеся песок и глина	5,4-5,5	13,4	1,82	1,60
	Глина серая	6,4-6,5	12,1	1,96	1,75
	Глина серая	7,4-7,5	14,7	1,96	1,70
	Глина серая	8,4-8,5	10,7	1,95	1,76
149-К	Супесь темно-серая	2,9-3,0	31,8	1,92	1,46
	Супесь темно-серая	3,9-4,0	39,7	1,87	1,49
	Супесь темно-серая	4,9-5,0	38,8	1,86	1,48
	Супесь темно-серая	5,9-6,0	29,4	1,77	1,33
	Супесь темно-серая	6,9-7,0	39,0	1,87	1,49
	Супесь темно-серая	7,9-8,0	33,2	1,80	1,38
	Супесь темно-серая	8,9-9,0	35,0	1,88	1,46

- 0,03–0,05 м — рыжий мелкий ожелезненный песок;
 - 0,05–0,18 м — коричневая легкая опесчаненная супесь с корнями растений;
 - 0,18–0,23 м — серовато-желтый мелкий ожелезненный песок с фестончатым контактом с нижележащим суглинком;
 - 0,23–0,29 м — средний темно-коричневый оторфованный суглинок (возможно, недоразвитая ископаемая почва);
 - 0,29–0,36 м — мелкий серо-коричневый песок, слабооторфованный по контакту с нижележащим торфом, с массивной криотекстурой и льдистостью 5–8%;
 - 0,36–0,42 м — темно-коричневый плохо разложившийся торф (низинный топяной согласно ботаническому анализу растительных остатков — осок (55%), злаков (20%) и двудольных трав (25%)) с волнистым контактом с нижележащим песком;
 - непосредственно под торфом — тонкий прерывистый прослой белого мелкого кварцевого песка, контакт которого с нижележащим песком ожелезнен;
 - 0,42–0,51 м — коричневатосерый мелкий ожелезненный песок;
 - 0,51–0,85 м — серый мелкий песок с пятнами ожелезнения и марганцевыми примазками;
 - 0,85–1,60 м — желтосерый мелкий слоистый песок с косою слоистостью;
 - 1,60–3,20 м — прозрачный лед (на глубине 1,95–2,18 м — матовый);
 - 3,20–3,67 м — желтосерый мелкий песок с пятнами и включениями торфа, массивной криотекстурой, льдистостью 5%;
 - 3,67–3,80 м — хорошо разложившийся темно-коричневый опесчаненный торф с включениями светло-коричневого торфа, тонкошлиривой криотекстурой, льдистостью 5%;
 - 3,80–3,94 м — серый мелкий песок с прослоями темно-серого песка, с мощностью прослоев 0,5 см, косою и волнистой слоистостью, тонкошлиривой криотекстурой, льдистостью 5%;
 - 3,94–4,20 м — хорошо разложившийся черно-коричневый опесчаненный торф с включениями коричневого и черного торфа, льдистостью 5%, тонкошлиривой криотекстурой (также встречено 3 субгоризонтальных шпиря льда мощностью по 0,5 см).
- Сопоставление температурных данных (рис. 11) показало, что в начале 1970-х гг. минимальная температура грунтов на первой террасе составляла минус 9,5 °С. При этом на глубине 4 м она достигала минус 8 °С.
- На лайде в начале 1970-х гг. температура была примерно на 1 °С выше, чем на первой террасе.
- В конце 1970-х гг. в тыловой части толщи первой морской террасы на глубине 4 м температура была минус 8,1 °С. На глубине 9 м она была на 1 °С выше по сравнению с 1972 г. и составляла минус 8,5 °С.
- В 2009 г. в аналогичных условиях температура на глубине 4 м находилась в интервале минус 5 — минус 6 °С, а на глубине 10 м составляла минус 7,1 °С. То есть по сравнению с 1972 г. в 2009 г. температура грунтов, слагающих первую террасу, повысилась на 2,4 °С. Заметим, что с 1970 по 1978 г. температура грунтов повысилась на 1 °С, т.е. волна потепления, обусловленная высокими летними температурами 1972 г. к концу 1970-х сказалась на температуре грунтов, а повышение температуры еще на 1,4 °С произошло за следующий 31 год.
- В скважине, пробуренной в днище водотока, температура грунта на глубине 2 и 10 м в 2009 г. была около минус 4 °С. В приблизительно таких же условиях лайды температура грунта на глубине 2 м в 1978 г. составила минус 3,7 °С, т.е. отепляющее воздействие поверхностных вод постоянно и проявляется весьма существенно.
- В береговом обнажении рядом с метеостанцией (в точке 209-YuV) вскрыта система двух сложно перекрещивающихся сингенетических повторно-жильных льдов (рис. 12). Вскрытая высота жил — около 3 м. Ширина более узкой из них в верхней части — 0,46 м, ниже — до 0,65 м. Ширина более широкой — более

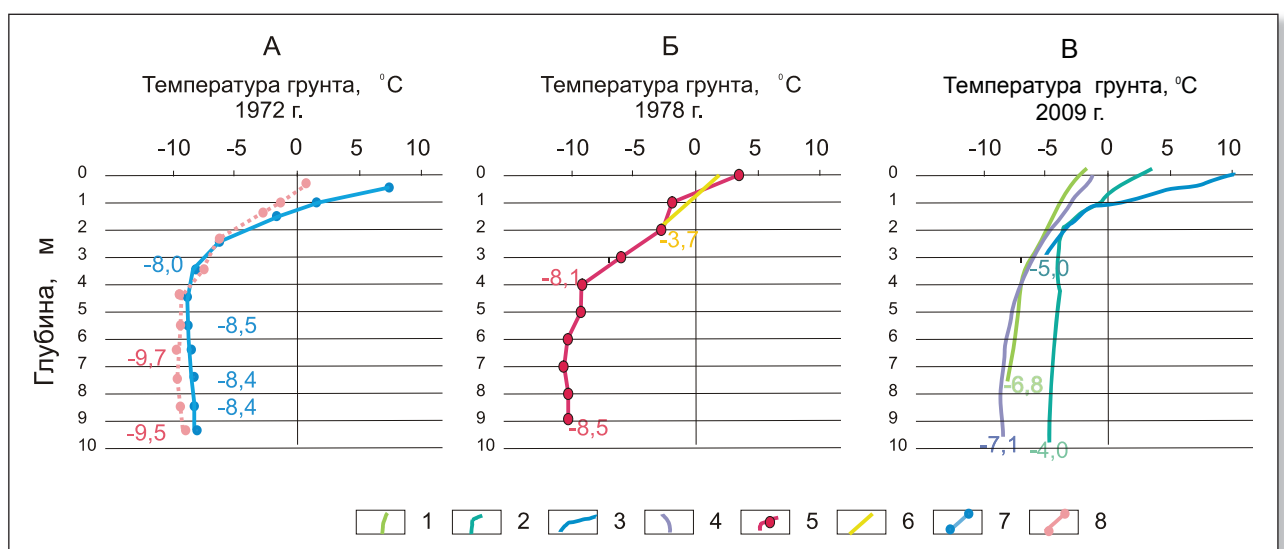


Рис. 11. Сопоставление температур грунтов острова Белый, измеренных в 1972 (А), 1978 (Б) и 2009 (В) годах: 1 — тыловая часть первой террасы, 2009 г.; 2 — днище ручья на первой террасе, 2009 г.; 3 — прибрежная часть первой террасы, 2009 г.; 4 — тыловая часть первой террасы, 2009 г. (по [24, 25]); 5 — тыловая часть первой террасы, 1978 г.; 6 — тыловая часть лайды, 1978 г.; 7 — морская лайда, 1972 г.; 8 — тыловая часть первой морской террасы, 1972 г.



1 м. Конфигурация этих ледяных жил весьма своеобразна. Они X-образно перекрещиваются, при этом одна из них явно пересекает другую, что указывает на ее более позднее, хотя также сингенетическое, формирование. Лед изученной жилы — прозрачный, голубовато-серый, четко вертикально-полосчатый. В верхней части насчитывается 34 элементарных жилки, а на глубине 1 м — 40 элементарных жилок. По обеим сторонам жилы выделяется «кайма» чистого стекловатого льда шириной 3–4 см. На глубине 1 м справа от «каймы» ледогрунт представлен субвертикальными элементарными жилками шириной 0,4–0,5 см, разделенными вертикальными слоями песка такой же ширины. В основном теле узкой жилы встречены два ксенолита песка шириной до 1,5 см, а также небольшая прерывистая по вертикали жилка шириной до 0,3–0,5 см, сложенная опесчаненным торфом. На глубине 1,05 м от этой ледяной жилы вправо отходит тонкая (шириной 4–5 см) ледяная жила, состоящая из трех элементарных жилок, достигающая длины 0,9 м. В обнажении вскрыт контакт двух жил — описанной выше и более широкой. В теле широкой этот контакт выделяется в виде шва, вдоль которого проходит полоса матового льда шириной 2 см, а в теле узкой такого шва не прослеживается, что может свидетельствовать об эпигенетическом характере ее формирования. Размер широкой жилы по горизонтали на глубине 1,7 м достигает 140 см, ее лед — матовый, вертикально-полосчатый, с желтым и розовым отливом. На этой глубине она состоит из 135 элементарных жилок, которые визуальны в два раза уже элементарных жилок узкой жилы.

В ходе экспедиции «Ямал-Арктика 2012» А.В. Баранская [2] описала похожую систему повторно-жильных льдов в разрезе первой морской террасы острова Белый (рис. 13). Следовательно, исследованное строе-



Рис. 12. Обнажение отложений первой морской террасы в точках 207-YuV, 208-YuV и 209-YuV (фото Ю.К. Васильчука)

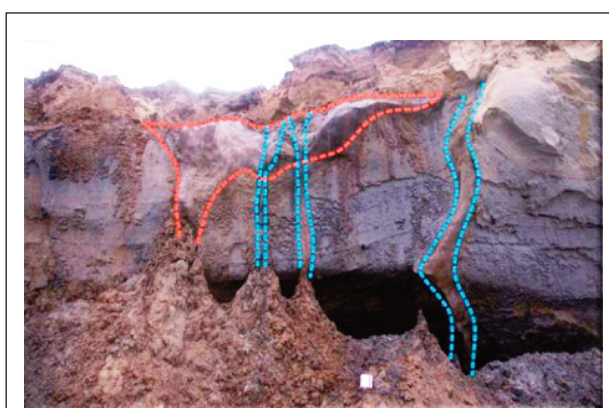


Рис. 13. Обнажение первой морской террасы с системой пересекающихся повторно-жильных льдов (фото А.В. Баранской)

Таблица 4

Содержание и состав водорастворимых солей в повторно-жильных льдах первой морской террасы острова Белый

№ образца	Глубина отбора, м	Общая минерализация, мг/л	Содержание ионов, мг/л (%-экв)							pH
			HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	Na ⁺ +K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Fe общ.	
209-YuV/1	0,4–0,6	488,0	12,2 (0,20)	259,2 (7,31)	37,8 (0,79)	8,4 (0,42)	16,8 (1,38)	148,6 (6,46)	0,8 (0,04)	5,50
209-YuV/2	0,4–0,6	624,0	6,1 (0,10)	309,3 (8,72)	40,3 (0,84)	10,2 (0,51)	19,6 (1,61)	172,9 (7,52)	0,3 (0,02)	4,85
209-YuV/3	1,0–1,15	824,0	12,2 (0,20)	379,6 (10,70)	59,2 (1,23)	14,8 (0,74)	23,6 (1,94)	215,2 (9,36)	1,7 (0,09)	5,60
209-YuV/4	1,0–1,15	816,0	18,3 (0,30)	365,5 (10,31)	56,0 (1,16)	13,0 (0,65)	22,4 (1,84)	212,5 (9,24)	0,7 (0,04)	5,95
209-YuV/5	1,3–1,5	704,0	12,2 (0,20)	323,0 (9,12)	46,9 (0,98)	13,0 (0,65)	20,2 (1,66)	181,2 (7,88)	2,0 (0,11)	6,65
209-YuV/6	2,5–2,7	444,0	24,4 (0,39)	168,7 (4,76)	24,7 (0,51)	10,2 (0,51)	11,2 (0,42)	97,5 (4,24)	1,4 (0,06)	7,20
209-YuV/7	0,4–0,6	460,0	18,3 (0,30)	217,9 (6,14)	32,9 (0,68)	7,4 (0,37)	13,5 (1,11)	129,0 (5,61)	0,6 (0,03)	6,90
209-YuV/8	0,4–0,6	708,0	24,4 (0,39)	338,5 (9,54)	51,8 (1,80)	13,0 (0,65)	23,0 (1,89)	195,0 (8,48)	1,0 (0,40)	7,35
209-YuV/9	1,6–1,7	488,0	12,2 (0,20)	232,0 (6,54)	36,2 (0,75)	8,4 (0,42)	14,0 (1,15)	135,4 (5,89)	0,6 (0,03)	5,85
209-YuV/10	1,6–1,7	584,0	18,3 (0,30)	274,1 (7,73)	41,2 (0,86)	12,0 (0,60)	16,9 (1,39)	158,7 (6,90)	0,6 (0,03)	7,20
209-YuV/11	2,1–2,2	432,0	18,3 (0,30)	186,3 (5,25)	31,3 (0,65)	9,2 (0,46)	11,8 (0,97)	109,5 (4,76)	0,14 (0,01)	5,85
209-YuV/12	1,9–2,0 (перекрестье)	1240,0	18,3 (0,30)	636,1 (17,94)	93,8 (1,95)	18,4 (0,92)	40,5 (3,33)	365,6 (15,90)	8,7 (0,40)	6,80
209-YuV/13	2,15–2,45	820,0	48,8 (0,78)	393,6 (11,10)	59,2 (1,23)	19,4 (0,97)	25,3 (2,08)	231,8 (10,80)	0,6 (0,03)	7,40
209-YuV/14	2,6–2,9	1076,0	36,6 (0,59)	506,1 (14,27)	81,5 (1,70)	20,4 (1,02)	33,1 (2,72)	295,1 (12,83)	0,6 (0,03)	7,55

ние повторно-жильных льдов верхнего яруса в толще первой террасы характерно для всей толщи грунтов в целом. При детальном (по сетке) изучении авторами настоящей статьи была установлена высокая минерализация льда и ее существенное изменение как по горизонтали, так и по вертикали (табл. 4, рис. 14).

Изучение химического состава повторно-жильных льдов первой террасы позволило выделить зоны с разной степенью минерализации, которые отражают отдельные этапы аккумуляции льдов. Так, ледяные клинья IV и I (см. рис. 13), слагающие основное тело ледяной жилы и вскрытые в интервале глубины 1,2–4,5 м, характеризуются наиболее высокими значениями минерализации — от 816 до 1240 мг/л. Максимальная минерализация 1240 мг/л получена на перекрестье жил. В период формирования этого льда засоление было наибольшим. В ионном составе это выражается в преобладании ионов хлора и натрия, что свидетельствует об участии морских вод. Ледяные клинья II и V, выделенные в разрезе на глубине 0,7–3,7 м, характеризуются минерализацией 500–800 мг/л. Снижение минерализации, очевидно, отражает постепенное изменение фациальной обстановки аккумуляции повторно-жильных льдов. При этом глубина растрескивания также была заметной, судя по мощности выделенных клиньев. Наименее минерализованные, но все же заметно отличающиеся от более распространенных ультрапресных повторно-жильных льдов клинья III и VI характеризуются минерализацией от 400 до 500 мг/л.

Зарождение сильноминерализованных жил в отложениях первой морской террасы можно отнести к периоду голоценового оптимума, имея в виду радиоуглеродную датировку 8500 ± 120 лет, полученную для образца, отобранного В.М. Леоновым из прослая торфа в подошве торфяника с глубины 2,5 м в обнажении первой террасы (в точке ЛУ-1139). Радиоуглеродный

возраст торфяника по калибровочному стандарту *IntCal13* попадает в интервал 7831–7816 лет до н.э. Позднее уровень моря превышал современный [5]. Высокая минерализация льда жил (до 1240 мг/л) и преобладание в ионном составе хлора и натрия свидетельствуют об их субаквальном формировании (или попадании небольшой доли морской воды в трещины). Образование сильноминерализованных льдов могло быть связано с промерзанием воды, попавшей в трещину из мелкого соленого озера и происходить на поверхности, уже перешедшей в режим террасы.

Наличие сильноминерализованных жил и парагенетически связанных с ними криопэггов в толще первой террасы является существенным фактором, осложняющим инженерно-геологические условия на острове Белый. Ледяные жилы с высокой минерализацией льда встречаются редко — скорее их можно считать уникальными. На севере Западной Сибири повторно-жильные льды с высокой минерализацией обнаружены еще только в устье реки Монгаталянгьяха на лайде Карского моря на севере полуострова Явай [28]. В толще засоленных песков там формировались жилы, сложенные клиньями с разной минерализацией, которая отражает постепенный переход поверхности лайды от субаквального режима развития к субаэральному в настоящее время.

В толще первой террасы острова обнаружены и гораздо более пресные льды. Согласно данным, полученным авторами работ [14–16], химический состав изученных ультрапресных повторно-жильных льдов является хлоридно-гидрокарбонатным с содержанием солей 36,4–45,5 мг/л. Содержание ионов хлора (0,32–1,08 мг·экв/л) и гидрокарбонатов (0,12–0,16 мг·экв/л) в ледяной жиле уменьшается сверху вниз, а количество сульфатов (0,05–0,08 мг·экв/л) незначительно возрастает. Катионы натрия (0,23–0,25 мг·экв/л) преобладают по содержанию над катионами кальция (0,07–0,12 мг·экв/л), сверху вниз повышается концентрация катионов магния (0,12–0,34 мг·экв/л).

Палинологическая характеристика повторно-жильных льдов на первой террасе (табл. 5) свидетельствует о том, что в них попадал весенний пылевой дождь, поскольку в них преобладает легко переносимая ветром пыльца хвойных пород и берез, обычно преобладающая в данном районе весной [4] а также пыльца других анемофильных растений — полыни, маревых, злаков. Низкое содержание пыльцы карликовой березки и ольховника говорит о том, что, когда в более южных районах начиналось их пыление, в трещины талая вода уже не проникала, т.к. к этому времени жилы закрывались. По той же причине практически отсутствует и пыльца травянистых растений. У палиноспектров два источника — весенний пылевой дождь, попадавший на снег, и отложения, вмещающие жилы. Второй источник менее существенен, поскольку в повторно-жильном льду практически не отмечено переотложенных древних пыльцы и спор, которые характерны для вмещающих отложений изученных льдов. Палиноспектры однородны — вероятно, накопление изученного льда происходило в стабильных климатических условиях.

Авторами также был изучен химический состав водной вытяжки отложений, вмещающих повторно-жильные льды (табл. 6). Степень засоления отложений — преимущественно сильная (0,4–0,8%) и очень сильная

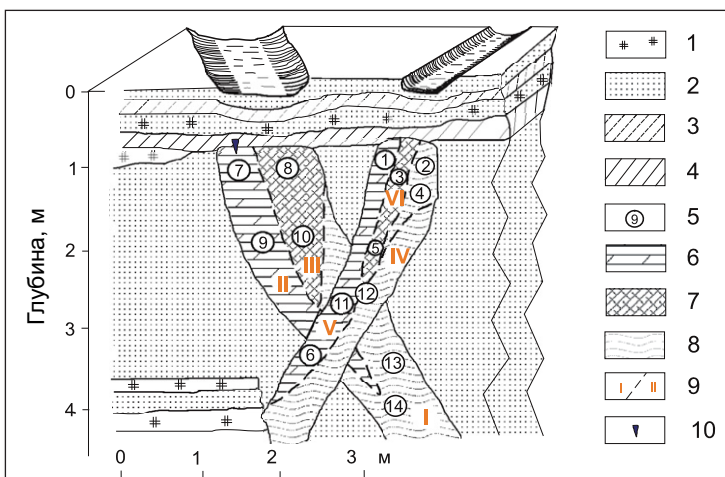


Рис. 14. Перекрещивающиеся сингенетические повторно-жильные льды в разрезе первой морской террасы острова Белый. Условные обозначения: 1 — торф; 2 — песок; 3 — супесь; 4 — суглинок; 5 — места отбора проб на химический и спорово-пылевой анализ; 6–8 — лед с различной степенью минерализации, т.е. с содержанием сухого остатка: 6 — 400÷500 мг/л, 7 — 500÷800 мг/л; 8 — более 800 мг/л; 9 — выделенные в пределах ледяной жилы клинья I–VI с различной степенью минерализации и границы между ними; 10 — современный «росток»



(более 0,8%). Тип засоления — хлоридный. Максимальная степень засоления отмечается в прослоях сильнольдистых серых средних глин с базальной и сетчатой криотекстурой в интервалах 4,5–4,7 и 8,5–8,6 м. По всему разрезу отмечаются ритмичные колебания содержания солей (рис. 15), а также преобладающих ионов хлора и натрия. Среднее количество сухого остатка составляет 0,603%, т.е. в целом толща имеет сильную степень засоления. Рассматривая химический состав водной вытяжки в современных морских осадках острова, отметим, что степень засоления колеблется от слабой (0,149 мг/л) до сильной (0,526 мг/л), существенная разница наблюдается в содержании ионов натрия, хлора, сульфат-ионов.

Поверхность лайды (точка 214-YuV, абс. отм. +1, +1,5 м) в 8 км севернее Полярной станции им. М.В. Попова является плоской, с полигонами размером от 25×25 до 40×50 м, разделенными канавками шириной 0,4–2,5 м и глубиной до 0,10–0,15 м.

Поперек одной из канавок, разбитой морозобойной трещиной, был заложен шурф, вскрывший сверху вниз (рис. 16):

- 0–0,15 м — мох, подстилаемый коричневым торфом;
- 0,15–0,30 м — коричневатый-серый оторфованный мелкий песок;
- 0,3–0,94 м — серый мелкий песок со льдистостью 80%, базальной криотекстурой, на глубине 0,6 м — с ростком прозрачного столбчатого жильного льда шириной 0,8 см из 4 элементарных жилок;

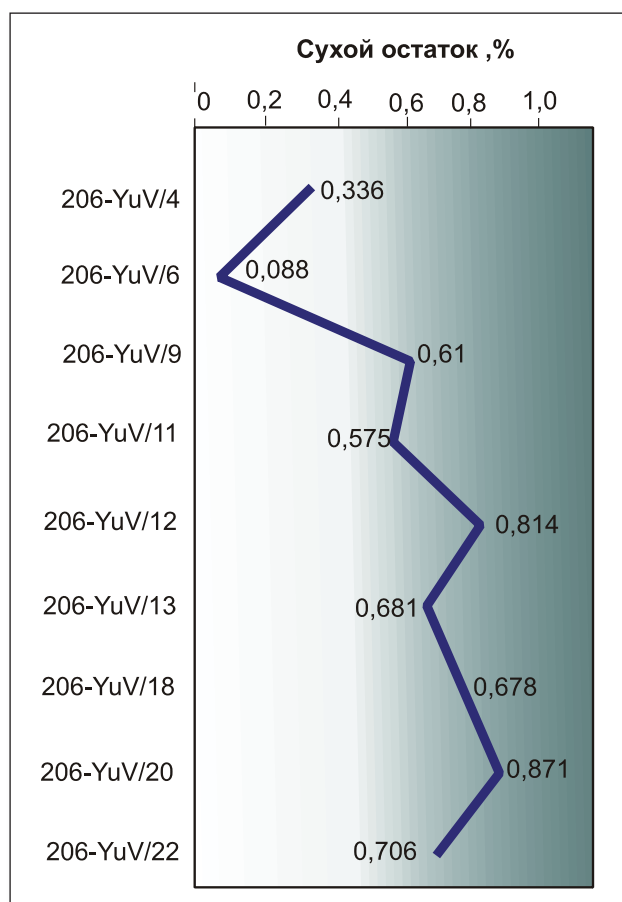


Рис. 15. Колебания содержания сухого остатка из водных вытяжек образцов из разреза первой морской террасы острова Белый. Вертикальная ось — номера образцов по разрезу

- 0,94–1,10 м — переслаивание прозрачного льда с минеральными примесями с матовым льдом при мощности прослоев 2–3 см;
- 1,10–1,20 м — переслаивание серого мелкого песка и льда, с наличием также вертикального контакта песка и льда;
- 1,20–1,45 м — переслаивание матового и прозрачного льда при мощности прослоев 2–3 см со слоистой структурой при толщине элементарных жилок 0,7–0,8 мм, субвертикальным направлением грунтовых жилок;
- 1,45–1,50 м — серый мелкий песок со льдистостью 65%, базальной криотекстурой;
- 1,50–1,55 м — темно-коричневый торф со льдистостью 10%, массивной криотекстурой;
- 1,55–1,60 м — темно-серый мелкий песок со льдистостью 5%, массивной криотекстурой.

Таблица 5

Таксон	№ образца (глубина отбора, м)				
	YuV-209/1 (0,5)	YuV-209/2 (0,5)	YuV-209/3 (1,1)	YuV-209/4 (1,1)	YuV-209/5 (1,4)
Деревья (пыльца), в т.ч.:	66,7	57,9	70,4	71,4	77,8
Picea sp.	10,0	15,8	3,7	14,3	2,8
Pinus sibirica	13,3	15,8	29,6	7,1	27,8
Pinus sylvestris	-	-	-	7,1	2,8
Alnus sp.	3,3	-	-	7,1	
Betula sect. Albae	40,0	26,3	37,0	35,7	44,4
Кустарники (пыльца), в т.ч.:	3,3	0	0	0	5,6
Salix sp.	-	-	-	-	2,8
Betula sect. Nanae	3,3	-	-	-	2,8
Травы и кустарнички (пыльца), в т.ч.:	30,0	42,1	29,6	28,6	16,7
Roaceae	-	5,3	3,7	21,4	5,6
Cyperaceae	-	-	-	7,1	2,8
Ericaceae	-	-	3,7	-	-
Chenopodiaceae	6,7	10,5	14,8	-	2,8
Artemisia sp.	13,3	21,1	7,4	-	5,6
Ranunculaceae	6,7	-	-	-	-
Fabaceae	3,3	5,3	-	-	-
Мхи и папоротники (споры), в т.ч.:	23,1	24,0	18,2	39,1	14,3
Bryales	12,8	6,8	6,1	21,7	11,9
Sphagnum sp.	7,7	6,8	6,1	13,0	-
Polypodiaceae	2,6	-	6,1	4,3	2,4
Концентрация, экз./л*	207	132	180	111	234

* Общее количество экземпляров спор и пыльцы на 1 л.

Таблица 6

Содержание и состав водорастворимых солей в грунтах первой террасы острова Белый										
№ образца	Глубина отбора, м	Грунт	Сухой остаток, %	Содержание ионов, мг/л (%-экв)						pH
				HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	
206-YuV/4	0,18–0,20	глина средняя	0,336	0,12 (0,007)	4,10 (0,143)	0,31 (0,015)	0,40 (0,008)	0,42 (0,005)	3,71 (0,085)	5,60
206-YuV/6	0,6–0,8	песок мелкий	0,088	0,08 (0,005)	0,60 (0,021)	0,51 (0,025)	0,10 (0,002)	0,08 (0,001)	1,01 (0,023)	6,30
206-YuV/9	2,2–2,4	глина легкая	0,610	0,48 (0,029)	6,60 (0,231)	1,39 (0,067)	0,32 (0,006)	0,44 (0,005)	7,71 (0,177)	7,05
206-YuV/11	3,8–3,9	глина легкая	0,575	0,28 (0,017)	7,80 (0,273)	0,14 (0,006)	0,30 (0,006)	0,20 (0,005)	7,72 (0,178)	7,20
206-YuV/12	4,5–4,7	глина средняя	0,814	0,44 (0,027)	11,00 (0,385)	0,53 (0,025)	0,20 (0,004)	0,48 (0,006)	11,29 (0,260)	7,60
206-YuV/13	4,9–5,1	глина средняя	0,681	0,44 (0,027)	8,70 (0,304)	0,67 (0,032)	0,22 (0,004)	0,24 (0,003)	9,35 (0,215)	7,60
206-YuV/18	7,5–7,8	глина средняя	0,748	0,36 (0,022)	10,20 (0,357)	0,43 (0,020)	0,20 (0,004)	0,28 (0,003)	10,51 (0,242)	7,60
206-YuV/20	8,3–8,6	глина средняя	0,871	0,44 (0,027)	11,00 (0,385)	0,99 (0,048)	0,18 (0,004)	0,38 (0,004)	11,87 (0,273)	7,04
206-YuV/22	8,8–9,1	глина тяжелая	0,706	0,44 (0,027)	8,00 (0,280)	0,77 (0,036)	0,16 (0,003)	0,34 (0,004)	8,71 (0,200)	6,97

Таблица 7

Содержание и состав водорастворимых солей в современных морских осадках на острове Белый										
№ образца	Место отбора	Грунт	Сухой остаток, %	Содержание ионов, мг/л (%-экв)						pH
				HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	
207-YuV/1	литораль	песок мелкий	0,149	0,20 (0,012)	1,50 (0,052)	0,15 (0,070)	0,08 (0,002)	0,10 (0,001)	1,67 (0,038)	7,55
215-YuV/2	литораль	песок мелкий	0,526	0,08 (0,050)	7,00 (0,246)	1,14 (0,055)	0,14 (0,003)	0,30 (0,004)	7,78 (0,179)	7,20

Определение состава водорастворимых солей в повторно-жильных льдах на лайде (табл. 8) показало, что здесь их минерализация существенно ниже — не превышает 268 мг/л, в среднем составляя 112 мг/л. В теле

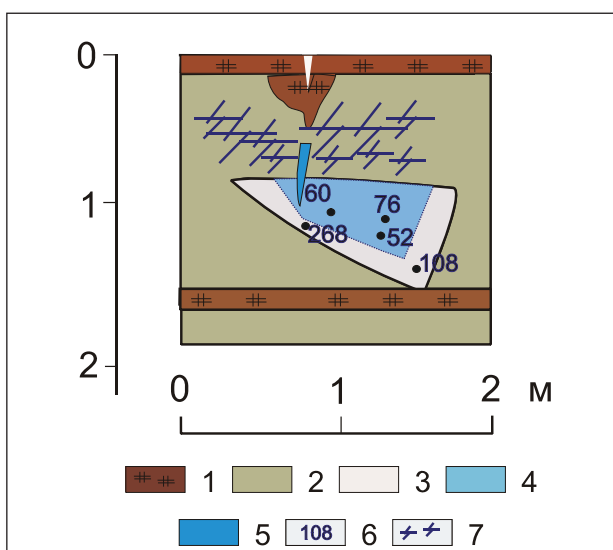


Рис. 16. Повторно-жильный лед в толще лайды острова Белый. Условные обозначения: 1 — торф; 2 — песок; 3 — лед с сухим остатком 50–100 мг/л; 4 — лед с сухим остатком более 100 мг/л; 5 — современный росток льда; 6 — места отбора проб на химический и спорово-пыльцевой анализ; 7 — ледяные шпильки

жилы визуально выделяются клинья льда, которые, как показывают определения, характеризуются разной минерализацией. Часть ледяной жилы, в которую внедряется росток, имеет минерализацию 52–76 мг/л, нижний клин более минерализован (108–268 мг/л), но эти значения в разы ниже, чем полученные для минерализованных жил на первой террасе (см. табл. 3). По составу солей они также различаются. Так, содержание ионов железа в повторно-жильных льдах лайды гораздо выше, (среднее — 13,24 мг/л, минимальное — 0,6 мг/л, максимальное — 56,8 мг/л). На первой террасе среднее содержание ионов железа — 1,41 мг/л, минимальное — 0,14 мг/л, и только в точке максимальной минерализации оно достигает 8,7 мг/л. Существенные различия наблюдаются в содержании ионов кальция: в минерализованных ледяных жилах первой террасы их среднее содержание составляет 189,1 мг/л, максимальное — 365,6 мг/л, минимальное — 97,5 мг/л, в то время как в повторно-жильных льдах лайды их среднее содержание — лишь 6,2 мг/л, максимальное — 13,5 мг/л, минимальное — 1,2 мг/л.

Повторно-жильные льды острова Белый имеют особенности, отличающие их от голоценовых льдов полуострова Ямал (табл. 9). Как было показано при анализе данных по химическому составу повторно-жильных льдов [28], льды на Ямале в целом преимущественно ультрапресные. Их минерализация изменяется в пределах 0,02–0,80 г/л, при этом ее увеличение не приводит к существенному изменению химического состава. На Ямале широко распространены льды сме-



Содержание и состав водорастворимых солей в повторно-жильных льдах лайды острова Белый										
№ точки	Глубина отбора, м	Общая минерализация, мг/л	Содержание ионов, мг/л (%-экв)							pH
			HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	Na ⁺ +K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Fe	
214-YuV/7	0,85–1,03	268,0	18,3 (0,30)	125,5 (3,54)	18,1 (0,38)	11,0 (0,55)	13,5 (1,11)	13,5 (1,11)	56,8 (2,47)	5,40
214-YuV/8	0,85–1,03	60,0	18,3 (0,30)	19,5 (0,55)	9,8 (0,20)	9,2 (0,46)	3,4 (0,28)	2,9 (0,13)	3,4 (0,18)	5,65
214-YuV/10	0,85–1,03	76,0	18,3 (0,30)	23,6 (0,66)	8,2 (0,17)	7,4 (0,36)	5,6 (0,46)	1,2 (0,05)	4,8 (0,26)	5,80
214-YuV/11	1,04–1,35	52,0	12,2 (0,20)	13,8 (0,39)	8,2 (0,17)	9,2 (0,46)	2,2 (0,18)	2,1 (0,09)	0,6 (0,03)	6,20
214-YuV/12	1,04–1,35	108,0	54,9 (0,88)	32,6 (0,92)	8,2 (0,17)	11,0 (0,55)	11,2 (0,92)	11,3 (0,49)	0,6 (0,03)	7,00

шанного анионного состава, при этом почти в 30% образцов отсутствуют сульфат-ионы. Среди анионов, как правило, преобладают ионы HCO⁻ (более чем в половине образцов), а среди катионов — ионы Na⁺. В среднем ионно-солевом составе повторно-жильных льдов основную массу солей составляют бикарбонаты (более чем в половине образцов). Доля морских солей обычно не более 1/3 [6]. С.М. Фотиев [21] относит льды Ямала преимущественно к гидрокарбонатному классу группы натрия и кальция. Это указывает на ведущую роль атмосферных осадков в формировании ионно-солевого состава повторно-жильных льдов на Ямале.

Наиболее существенная минерализация на острове Белый зафиксирована для криопэгов, где она составляет 111 830 мг/л (см. табл. 9), что намного выше, чем, например, для морской воды. Соотношение концентраций Cl⁻/SO₄²⁻ составляет в криопэге 29,721 (рис. 17), в наиболее минерализованном повторно-жильном льду (ПЖЛ) — 6,766, в среднеминерализованном — 6,0, в ПЖЛ на лайде — 6,934, в ультрапресном льду — 4,666. На лайде полуострова Явай в минерализованном ПЖЛ это соотношение такое же, как и в ультрапресном льду, т.е. 4,666. В сегрегационном льду на первой террасе оно совершенно иное — 1,076 (для сравнения: в мор-

ской воде оно составляет 7,166, в снежнике на севере Ямала — 0,539, в осадках там же — 0,778). Таким образом, по соотношению содержания хлор- и сульфат-ионов изученные авторами минерализованные повторно-жильные льды ближе всего к морской воде, ультрапресные льды на острове Белый ближе к снежникам, сегрегационный лед ближе к осадкам. Принципиально другую характеристику имеют, например, сильноминерализованные жилы на острове Сеймур (имеющем координаты 64°15' ю.ш., 56°45' з.д. и являющемся частью островов Джеймса Росса к северо-востоку от Антарктического полуострова в северной части Антарктиды), где соотношение концентраций Cl⁻/SO₄²⁻ составляет 0,022, что связано с совершенно иными климатическими характеристиками, в частности с сублимационными процессами. Точки ионного состава повторно-жильных льдов острова Белый и лайды Карского моря в районе устья реки Монгаталянгьяха на севере полуострова Явай располагаются вблизи точки морской воды, что говорит о морском генезисе воды, участвующей в формировании ледяных жил.

В пределах высоких террас и водоразделов сингенетические льды формируются исключительно из атмосферной воды, которая замерзает в морозобойных

Таблица 9

Криогидрохимическая характеристика льдов острова Белый и других криосферных и гидросферных объектов							
Место взятия, типы образцов [источник данных]	Общая минерализация, мг/л	Содержание ионов, мг/л					
		Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺ +K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
о. Белый, криопэг [20]	111 830	67 734	2 279	1 044	34 503	1 350	3 600
о. Белый, первая терраса, наиболее минерализованный ПЖЛ*	1 240	636	94	18	336	18	41
о. Белый, первая терраса, среднеминерализованный ПЖЛ	432	186	31	18	110	9	12
о. Белый, первая терраса, ультрапресный ПЖЛ [16]	36–46	11–38	2–4	7–10	5–6	1–2	1–4
о. Белый, лайда, наиболее минерализованный ПЖЛ	268	126	18	18	11	14	14
п-ов Явай, лайда, минерализованный ПЖЛ	1 080	280	60	120	140	30	40
о. Сеймур, минерализованный ПЖЛ [23]	5 756	80	3600	–	1600	81	42
о. Белый, первая терраса, современный сегрегационный лед (образец 206-YuV/5)	50	14	13	12	7	7	2
Карское море, морская вода [18]	35 000	19 350	2 700	70	11 100	420	1 300
п-ов Ямал, северная часть, атмосферные осадки [18]	38	7	9	10	9	2	1
п-ов Ямал, северная часть, снежник [18]	83	7	13	39	19	3	2

* ПЖЛ — повторно-жильный лед.

трещинах. На поверхности поймы, приречных или приморских равнин, маршей, вагтов и лайд небольшие жилки обычно также формируются из атмосферной воды, проникающей в трещины (если трещины достигают поверхности), или из воды сезонно-талого слоя (если трещины не достигают поверхности). Вода с высокой минерализацией может случайно попасть в трещины, если имеются соленые озера, возникшие в результате экстремально высоких приливов. Такие приливы и штормовые нагоны могут быть только летом, когда поверхность моря или эстуария свободна ото льда. К этому времени большинство морозобойных трещин уже закрыто и только в единичных случаях эта вода может проникнуть в ледяные жилы.

Наверное, самые минерализованные жилы были изучены на острове Сеймур, где встречаются обнажения верхнемеловых пород и раннекайнозойских отложений с большим количеством ископаемых остатков. Слой сезонного протаивания здесь не превышает 50 см. Повторно-жильные льды острова Сеймур и псевдоморфозы по ним были изучены японскими исследователями [23]. Эти ледяные жилы очень узкие, эпигенетические, проникают в скальные кайнозойские породы. Полигоны имеют прямоугольную форму, средняя длина каждого прямоугольника составляет около 10 м. Верхняя часть жил содержит много вертикально удлиненных воздушных пузырьков. Концентрация солей очень высока, особенно в нижней части (до 6000 мг/л). График распределения минерализации по вертикали имеет зигзагообразную форму. Даже верхняя часть ледяных жил характеризуется существенно более высоким содержанием солей, чем свежевывапавший снег и поверхностный лед. Столь высокая минерализация жил может объ-

ясняться как сублимационными процессами в зимний период, так и существенным испарением в короткие периоды появления воды в виде жидкой фазы.

Выводы

Преобладающие на острове Белый полигональные ландшафты, засоление грунтов и повторно-жильных льдов определяют инженерно-геологические аспекты его освоения.

На поверхности первой морской террасы острова распространены выпуклые сухие и вогнутые влажные полигоны с размерами от 5×5 до 10×7 м. На поверхности лайды отмечаются полигоны со сторонами до 40-50 м, в среднем 25-26 м. Полигоны встречаются и на дне неглубоких озер.

На поверхности первой морской террасы развит мелкополигональный рельеф — полигоны со сторонами 20-50 см.

Важную роль в преобразовании рельефа острова играют термоэрозия и термоабразия. Скорость отступления бровки первой террасы варьирует от 0,3-0,4 до 1,0-1,5 м/год. На некоторых участках летом 1991 г. из-за сильных штормов берег отступил на 20 м.

Мощность многолетнемерзлых пород составляет: 2-10 м на пляже, 30 м на лайде, до 50-80 м в ее тыловых частях. В пределах первой морской террасы мощность ММП варьирует от 65 до 165 м, в среднем составляя 125 м.

Среднегодовые температуры грунтов за последние 40 лет заметно повысились. В 1972 г. в толще первой террасы они составляли минус 9,5 °С, на лайде они были примерно на 1 °С выше. В 1978 г. в толще первой террасы температура повысилась на 1 °С по сравнению с 1972 г., составив минус 8,6 °С. В 2009 г. среднегодовая температура грунта в толще первой террасы составила минус 7,1 °С. Таким образом, по сравнению с 1972 г. в 2009 г. температура грунтов, слагающих первую террасу, повысилась на 2,4 °С.

В толще первой террасы вскрыта система сложно-перекрещивающихся сингенетических повторно-жильных льдов. Вскрытая высота жил — около 3 м. Ширина жил в верхней части — от 0,46 до 1,0 м и более.

Повторно-жильные льды в толще первой террасы характеризуются очень высокой минерализацией — от 816 до 1240 мг/л, но, очевидно, не повсеместно. Встречены и пресные жилы с содержанием солей 36-45 мг/л. Высокая минерализация объясняется локальным влиянием засоленных озер.

Повторно-жильные льды в толще лайды менее минерализованы (от 60 до 268 мг/л).

Наиболее существенная минерализация зафиксирована для криопэгов (более 110 г/л), что намного выше, чем у морской воды.

Высокая минерализация изученных на острове Белый повторно-жильных льдов и их хлоридно-натриевый состав указывают на их субаквальное сингенетическое накопление в условиях смены фациальных и климатических условий. ❄️

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 14-27-00083, Ю.К. Васильчук) и РФФИ (14-05-00930, А.К. Васильчук)

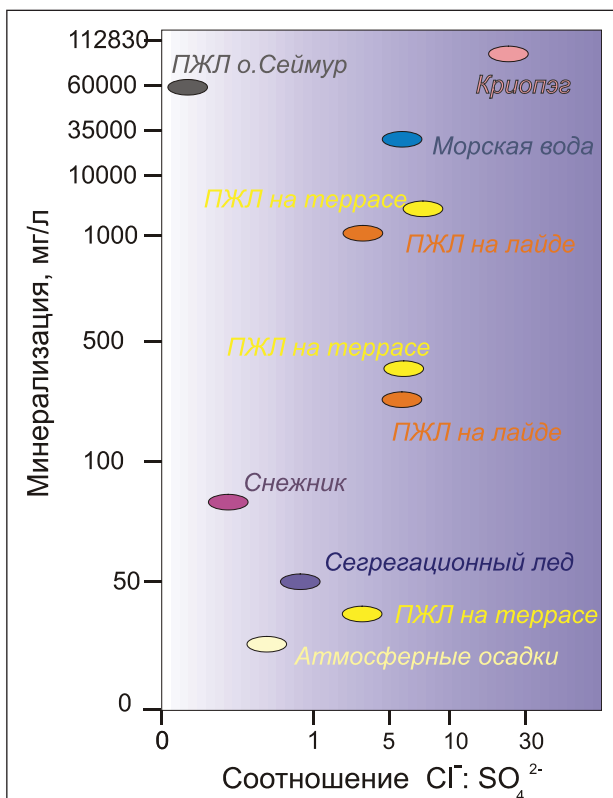


Рис. 17. Соотношение концентраций Cl⁻/SO₄²⁻ в повторно-жильных льдах острова Белый и на других криосферных и гидросферных объектах



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архив погоды в Имени Попова / Погода и климат: веб-сайт. 2015. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/weather.php?id=20667&bday=1&fday=28&amonth=2&ayear=2015>.
2. Баранская А.В. Чем сложен край Земли? И чем он прост? Геоморфологические исследования на Ямале // Российские полярные исследования. 2012. № 4 (10). С. 43-47.
3. Булочникова А.С., Романенко Ф.А. Особенности рельефа малых островов арктических и дальневосточных морей // Природа шельфов и архипелагов Европейской Арктики. Вып. 10. М.: ГЕОС, 2010. С. 25-30.
4. Васильчук А.К. Региональная и дальнезональная пыльца в тундровых палиноспектрах // Известия Российской академии наук. Сер. биол. 2005. № 1. С. 85-99.
5. Васильчук Ю.К., Петрова Е.А., Васильчук А.К. Некоторые черты палеогеографии голоцена Ямала // Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода. 1983. Вып. 52. С. 73-89.
6. Васильчук Ю.К., Трофимов В.Т. Криогидрохимические особенности повторно-жильных льдов Ямало-Гыданской провинции // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отд. геол. 1985. Т. 60. Вып. 3. С. 114-120.
7. Васильчук Ю.К., Трофимов В.Т. О находках сильноминерализованных повторно-жильных льдов // Известия АН СССР. Сер. геол. 1984. № 8. С. 129-134.
8. Евландов В. П. По тундрам Ямала к Белому острову. Экспедиция на Крайний Север полуострова в 1928-1929 гг. Тюмень: ИПОС СО РАН, 1992. 281 с.
9. Изучение влияния торфяного абсорбента на очистку почвы от нефтяного загрязнения. Отчет по результатам исследования. М.: ФХТЭ РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, кафедра промышленной экологии, 2008.
10. Лар А.Л. «Ямал Хэбидя я» — священные места на Ямале // Вестник археологии и этнографии. 2004. № 4. URL: http://www.ipdn.ru/rics/va/_private/a4/3—lar.pdf.
11. Мажаров А.В. Реабилитация острова Белый — одна из приоритетных задач руководства Ямало-Ненецкого автономного округа // Арктические ведомости. 2013. № 1 (5). С. 134-139.
12. Ребристая О.В. Сосудистые растения острова Белого (Карское море) // Ботанический журнал. 1995. Т. 80. № 7. С. 26-36.
13. Романенко Ф.А. Интенсивность геоморфологических процессов на островах и побережьях морей Карского и Лаптевых (по материалам наблюдений полярных станций) // Геоморфология. 2008. № 1. С. 56-64.
14. Слагода Е.А., Курчатова А.Н., Опокина О.Л., Томберг И.В., Ходжер Т.В., Фирсова А.Д., Родионова Е.В., Попов К.А., Никулина Е.Л. Криолитологическое строение первой террасы острова Белый в Карском море: геокриологическая история и изменения природных условий. Часть 3 // Криосфера Земли. 2014. Том 18. № 3. С. 33-45.
15. Слагода Е.А., Курчатова А.Н., Попов К.А., Томберг И.В., Опокина О.Л., Никулина Е.Л. Криолитологическое строение первой террасы острова Белый в Карском море: микростроение и признаки криолитогенеза. Часть 2 // Криосфера Земли. 2014. Т. 18. № 1. С. 12-22.
16. 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. 17. № 4. С. 12-22.
17. Справочник по климату СССР. Часть 2: Температура воздуха и почвы. Вып. 17. Тюменская и Омская области. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 400 с.
18. Стрелецкая И.Д., Лейбман М.О. Криогеохимическая взаимосвязь пластовых льдов, криопэггов и вмещающих их отложений Центрального Ямала // Криосфера Земли. 2004. Т. 6. № 3. С. 15-24.
19. Трофимов В.Т., Баду Ю.Б., Васильчук Ю.К., Кашиперюк П.И., Кудряшов В.Г., Фирсов Н.Г. Геокриологическое районирование Западно-Сибирской плиты. М.: Наука, 1987. 222 с.
20. Трофимов В.Т., Баду Ю.Б., Кудряшов В.Г., Фирсов Н.Г. Полуостров Ямал. М.: Изд-во МГУ, 1975. 278 с.
21. Фотиев С.М. Закономерности формирования ионно-солевого состава природных вод Ямала // Криосфера Земли. 1999. Т. 3. № 2. С. 40-65.
22. Хитун О.В., Ермохина К.А., Лейбман М.О., Хомутов А.В. Растительные индикаторы мощности сезонно-талого слоя на о. Белом // Материалы 4-й Конференции геокриологов России, МГУ им. М.В. Ломоносова, 7-9 июня 2011 г. Т. 3. М.: Университетская книга, 2011. С. 350-356.
23. Kato K., Corte A.E., Fukuda M. Chemical and isotopic characteristics of ice from an ice-wedge in Seymour Island (Isla Vcom. Marambio), Antarctic Peninsula region // Proceedings of the National Institute of Polar Research (NIPR) Symposium on Antarctic Geosciences. № 4. Tokyo, National Institute of Polar Research, 1990. P. 181-190.
24. Khomutov A., Leibman M., Moskalenko N., Orekhov P., Mullanurov D. Databasa of EAT permafrost information // Proceedings of the 3-d Yamal Land-Cover, Land-Use Change Workshop, Arctic Centre, Rovaniemi, Finland, 19-21 May 2012. http://www.geobotany.org/library/talks/KhomutovA2012_3rdYamalWkshop_tal20120519.pdf.
25. Leibman M.O., Khitun O.V., Khomutov A.V., Moskalenko N.G., Orekhov P.T., Ponomareva O.E., Mullanurov D.R., Gubarkov A.A., Ermokhina K.A. Synthesis of permafrost research along the Eurasia Arctic transect // Proceedings of the Arctic Change conference, Ottawa, Canada, 8-12 December 2014. URL: http://www.geobotany.uaf.edu/library/posters/Leibman2014_AC2014Ottawa_posLCLUC_T40.pdf.
26. Maier H.A., Walker D.A. Ostrov Belyy (White Island), Yamal Peninsula region, Russia: Landsat ETM+ false color image, land-cover map, and NDVI map (1:200K scale) // Proceedings of the 3-d Yamal Land-Cover, Land-Use Change Workshop, Arctic Centre, Rovaniemi, Finland 19-21 May 2012. URL: http://www.geobotany.org/library/talks/MaierH.2012_3rdYamalWkshop_tal20120519.pdf.
27. Matyshak G.V. Soils investigations along the EAT // Third Yamal Land—Cover Land—Use Change Workshop. Arctic Centre, Rovaniemi, Finland. 19-21 May 2012. URL: http://www.geobotany.org/library/talks/MatyshakGV2012_3rdYamalWkshop_tal20120519.pdf.
28. Vasil'chuk Yu.K., Trofimov V.T. Cryohydrochemical peculiarities of ice-wedge complexes in the north of Western Siberia // Proceedings of the 4-th International Conference of «Permafrost», Fairbanks, Alaska. Washington: National Academy Press, 1983. P. 1303-1308.
29. Walker D.A., Orekhov P., Frost G.V., Matyshak G., Epstein H.E., Leibman M.O., Khitun O., Khomutov A., Daanen R., Gobroski K., Maier H.A. The 2009 Yamal expedition to ostrov Belyy and Kharp, Yamal region, Russia. Data report. Alaska Geobotany Center, Institute of Arctic Biology, University of Alaska Fairbanks, AK. 2009. 49 p.