

МИГРАЦИОННЫЕ БУГРЫ ПУЧЕНИЯ НА ЕВРОПЕЙСКОМ СЕВЕРЕ РОССИИ. ЮЖНЫЙ И СЕВЕРНЫЙ ПРЕДЕЛЫ АРЕАЛА И СОВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА

PALSAS IN THE NORTHERN EUROPEAN RUSSIA: THE SOUTHERN AND NORTHERN LIMITS OF THE AREAL AND THE MODERN DYNAMIC

ВАСИЛЬЧУК Ю.К., ВАСИЛЬЧУК А.К.,
БУДАНЦЕВА Н.А., ЧИЖОВА Ю.Н.

Географический и геологический факультеты
МГУ имени М.В. Ломоносова, vasilch@geol.msu.ru

VASILCHUK Yu.K., VASILCHUK A.C.,
BUDANTSEVA N.A., CHIZHOVA Ju.N.

The faculties of geography and geology
of Lomonosov Moscow State University

Ключевые слова:

миграционные бугры пучения; Россия; Северная Азия.

Key words:

palsa; Russia; Northern Asia.

Аннотация

Исследованы и датированы по ^{14}C выпуклые бугры пучения на многолетнемерзлых торфяных массивах в Большеземельской тундре (у поселков Бугры, Уса, Абезь, Никита, Елецкая и Хановей). Южный предел ареала этих бугров на Европейском Севере совпадает с южной границей распространения многолетнемерзлых грунтов: на Кольском полуострове это около $67^{\circ}50'$ с.ш., на полуострове Канин — около 67° с.ш., в Ненецком автономном округе — южнее $67^{\circ}10'$ с.ш., в Большеземельской тундре — южнее $66^{\circ}20'$ с.ш. Ареал миграционных бугров пучения в северной части Европейского Севера далеко заходит в зону низкотемпературных многолетнемерзлых пород со сплошным распространением с поверхности и достигает $68^{\circ}10'$ с.ш. в Ненецком автономном округе и $67^{\circ}30' - 68^{\circ}00'$ с.ш. в Большеземельской тундре. Установлено, что палеодинамика этих бугров в голоцене была различной. Часть из них активно росла даже в оптимум голоцена. Современное их состояние даже в пределах одного массива может быть как деградационным, так и стабильным, аградационным, пульсирующим.

Abstract

The Bolshezemelskaya Tundra palsas were studied and ^{14}C -dated on the permafrost peat massives around the settlements of Bugry, Usa, Abez, Nikita, Yeletskaia and Khanovey. The southern limit of the palsa areal in the north of Europe coincides with the southern boundary of the permafrost: about $67^{\circ}50'$ N — on the Kola Peninsula; about $67^{\circ}00'$ N — on the Kanin Peninsula; to the south of $67^{\circ}10'$ N — in the Nenets Autonomous District; to the south of $66^{\circ}20'$ N — in the Bolshezemelskaya Tundra. The palsa areal in the northern part of the European Far North comes to the zone of low-temperature permafrost with continuous surface distribution and reaches $68^{\circ}10'$ N in the Nenets Autonomous District and $67^{\circ}30' - 68^{\circ}00'$ N in the Bolshezemelskaya Tundra. It is established that the Holocene palaeodynamics of the palsas varied. Some part of them grew actively even in the Holocene Optimum. Their modern state even within the single area can be both degraded and stable, agraded, pulsing.

Введение

Формирование бугров пучения — это один из самых опасных процессов для длительно существующих линейных сооружений: дорог, взлетных полос аэродромов, нефте- и газопроводов и др. В настоящее время на 70% территории России, которые занимает криолитозона, нет, пожалуй, ни одного протяженного линейного сооружения, которое не подвергалось бы морозному пучению. Это нашло отражение во всех федеральных, региональных и ведомственных инструкциях и нормативных документах по инженерно-геологическому исследованию, освоению и эксплуатации сооружений.

Приведем выдержки из некоторых нормативных документов.

Согласно п. 3.12 СНиП 2.05.06-85 «Строительные нормы и правила. Магистральные трубопроводы»: «При выборе трассы для подземных трубопроводов на вечномерзлых грунтах следует по возможности избегать участки с... буграми пучения...».

Пункт 2.8 ВСН 61-89 по изысканиям, проектированию и строительству автомобильных дорог в районах распространения вечной мерзлоты гласит: «При трассировании необходимо обходить участки с неблагоприятными мерзлотными и грунтово-гидрогеологическими условиями (...крупные бугры и гряды пучения...)».

Согласно п. 2.12 ВСН 61-89 по изысканиям, проектированию и строительству железных дорог в районах вечной мерзлоты «следует избегать укладки трассы и размещения отдельных сооружений на участках с распространением... бугров пучения, с бессточными заболоченными понижениями местности, на косогорных участках с льдонасыщенными глинистыми и переувлажненными пылеватыми грунтами. Мощные бугры пучения следует, как правило, обходить с низовой стороны...».



В пункте 3.7 ВСН 014-89 «Строительство магистральных и промысловых трубопроводов» сказано: «При выборе трасс и площадок в зоне вечномерзлых грунтов под сооружения следует избегать участков с широким распространением бугров пучения, бугристых торфяников...» Там же в пункте 3.12: «При выборе трассы для подземных трубопроводов на вечномерзлых грунтах следует по возможности избегать участки с... буграми пучения... Бугры пучения следует обходить с нижней стороны».

Процессы пучения неравномерны, чем обусловлено образование миграционных бугров пучения, наиболее опасных с точки зрения влияния на трубопроводы. Их формирование происходит в холодное время года в связи с неравномерным промерзанием увлажненных пород, в результате чего возникает гидростатический напор. Процесс пучения начинается уже при промерзании верхних горизонтов увлажненных грунтов и продолжается на протяжении всего периода промерзания. Процессы криогенного пучения опасны для трубопровода прежде всего неравномерностью их проявления вдоль трасс.

На Европейском Севере России, на севере Западной Сибири, Якутии и др. в первые три-пять лет эксплуатации «горячих» газопроводов на многолетней мерзлоте формируются ореолы оттаивания, достигающие в глубину 10 м. Их образование, как правило, сопровождается просадкой поверхности грунта над трубопроводом, а иногда и вдоль целого технического коридора. Следующие за этим процессы охлаждения, образования сезонных и многолетних бугров пучения вызывают деформацию трубопроводов из-за воздействия кристаллизационного давления, достигающего 220 МПа при каждом цикле промерзания и следующего за ним пучения.

Установки искусственного охлаждения газа на Уренгойском, Ямбургском промыслах были построены после того, как в течение многих лет на участках, проложенных на территории распространения постоянномерзлых пород, подавался теплый газ. Переход на подачу холодного газа по таким магистралям неизбежно сопровождается неравномерным пучением и следующим за ним защемлением труб. Вертикальные перемещения газопроводов происходят вследствие выпучивания и всплывания и проявляются даже при наличии пригрузов.

Натурные крупномасштабные эксперименты и наблюдения за действующими нефте- и газопроводами в криолитозоне демонстрируют принципиальную важность учета процессов пучения при эксплуатации трубопроводов, т.к. наблюдается выпучивание и всплытие трубопроводов даже при наличии утяжелителей. За 10 лет эксплуатации на одном из участков сплошной балластировки пригрузами в лесотундре Западной Сибири началось пучение. Поднявшийся участок первоначально имел длину 40 м. К 2007 г. его длина достигла 250 м, и число пригрузов увеличилось с 20 до 170. Газопровод изменил свое положение и поднялся на высоту

1,7 м. На вершине одного из бугров пучения начали трескаться пригрузки. Геолокация показала, что выросло ледяное ядро в диаметре около 6 м. Это типичный участок, каких, например, на газопроводе Ямбург — Ныда порядка 600.

В трубопроводной системе Надым — Пунга, функционирующей уже около 40 лет, наиболее сильные нарушения произошли в т.ч. и в результате новообразования бугров и площадей пучения высотой более 1 м.

Осложнено сооружение нефтепроводов Перевозное — Варандей и Харьяга — Индига вследствие широкого развития бугристых торфяников и бугров пучения.

Даже прокладка протяженных линий связи требует учета расположения бугров пучения. Согласно п. 5.10 ВСН 116-93 инструкции по проектированию линейно-кабельных сооружений связи: «Трассы кабельных линий при прохождении их на участках с буграми пучения... должны выбираться в соответствии с рекомендациями технических указаний».

Миграционный бугор пучения на торфяном массиве в литературе обычно называется лапландским словом «пальза», что означает бугор с льдистым ядром, сложенный торфом или минеральными отложениями (обычно тонкодисперсным материалом), перекрытыми торфом, с максимальной высотой около 10 м. Такие бугры широко распространены на территории Северной Европы, Азии и Северной Америки. Обычно они встречаются в областях прерывистого и спорадического распространения многолетнемерзлых пород, часто являясь единственным надежным поверхностным признаком их существования.

Многолетнемерзлые бугры пучения являются одной из самых распространенных форм мерзлотного рельефа. Они широко встречаются во всем мире, чаще в районах с более высокими среднегодовыми температурами (около нуля) прерывистой по площади многолетней мерзлоты, но также нередки и в зонах сплошных с поверхности многолетнемерзлых пород с низкими среднегодовыми температурами (вплоть до -15° – -16° С).

Пожалуй, одними из самых экзотических мест, где были обнаружены пальза и пальзоподобные формы, являются Земля Короля Георга из архипелага Южно-Шетландских островов (62° ю.ш.) и альпийские луга Тасмании (39 – 42° ю.ш.) [21] в Южном полушарии. На полуострове Филдс на Земле Короля Георга китайскими исследователями были описаны мерзлые торфяные бугры пучения с ледяным ядром высотой от 2 до 3 м и диаметром 6 м [32].

Говоря о границах ареала пальза в Азии, следует упомянуть их южное местоположение на острове Хоккайдо ($43^{\circ}37'$ с.ш., $142^{\circ}00'$ в.д.), где описаны бугры пучения, расположенные на торфянике в горах Дайсетцю, в интервале высот от 1700 до 1750 м (рис. 1).

Из северных находок можно вспомнить, что в долине реки Турумакит ($68^{\circ}20'$ с.ш.) на Норильском плато в 2007 г. Т.Ю. Репкиной были описаны



Рис. 1. Миграционный бугор пучения — пальза, о. Хоккайдо, Япония. Фото Го Ивахана, 2006

восемь бугров пучения высотой 5–7 м (рис. 2, а). Тем же автором даже на полуострове Таймыр в 2004 г. были описаны бугры пучения в 15 км севернее озера Лама (абсолютная высота местности там составляет около 110 м, а среднегодовая температура воздуха равна $-9,5^{\circ}\text{C}$) (рис. 2, б). Укажем еще и на то, что Х. Александерсон с коллегами [18] в семи районах Таймыра (близ озер Астрономическое, Белое, Барометрическое — $75\text{--}76^{\circ}$ с.ш., $96\text{--}102^{\circ}$ в.д.) описала пальза высотой до 1,5–2,0 м и диаметром около 5 м, которые растут в условиях арктической тундры при среднегодовой температуре $-14,5^{\circ}\text{C}$.

Также весьма любопытно, что признаки бывшего существования бугров пучения обнаружены в пермских каменноугольных отложениях Антарктиды, в которых палеоботанические остатки сходны по составу с содержащимися в торфе истинных пальза, а состав изотопов углерода указывает на возможное существование многолетнемерзлых толщ [23].

Исследования последних десятилетий зафиксировали существенные и относительно быстрые изменения в распределении многолетнемерзлых толщ и пальза в течение второй половины XX и в начале XXI столетия в Северной Америке и Европе. Эти изменения проявились в сокращении площади поверхности, занятой площадями и буграми пучения в арктических и субарктических торфяниках, что принято связывать с глобальными климатическими изменениями. Во многих случаях оценка сокращения площадей, занятых буграми пучения, и контуров самих бугров основана на данных аэрофотосъемки. В некоторых случаях это подтверждено и длительными полевыми исследованиями. В результате было установлено, что достаточно большое количество участков с буграми на многолетнемерзлых торфяниках протаяло и частично или полностью деградировало за последние 100–200 лет (особенно те, которые расположены вблизи южной границы распространения многолетнемерзлых пород).



Рис. 2. Миграционный бугор пучения – пальза, высотой 5 м, перекрытый торфом, в долине р. Турумакит ($68^{\circ}20'$ с.ш.) на Норильском плато (слева) и на плато Путорана (около 70° с.ш.) в 15 км севернее оз. Лама (справа), север Средней Сибири. Фото Т.Ю. Репкиной, 2008



Вместе с тем есть и данные, свидетельствующие о росте и динамике отдельных бугров, связанных с локальными факторами, такими как миграции русел рек, изменения конфигурации озер, или даже с такими экзотическими причинами, как деятельность бобров, влияющая на гидрологию участка. Есть данные о современном росте бугров и увеличении площади их распространения как на юге, так и на севере криолитозоны. В связи с этим представляется, что эти аспекты требуют углубленного анализа.

Определение понятия и возможный механизм формирования миграционных бугров пучения (пальза)

Дадим еще раз более точное определение понятия «пальза». *Миграционные бугры пучения на торфяных массивах (пальза)* — это выпуклая мезоформа рельефа, возникающая при восходящем развитии многолетнемерзлых пород в результате совместного протекания инъекционного, миграционного и сегрегационного процессов. Такие бугры даже логичнее было бы назвать инъекционно-сегрегационно-миграционными, т.к. все эти три процесса (сегрегация влаги, т.е. выделение из водонасыщенного грунта чистого льда при промерзании, ее миграция из окружающих и подстилающих водонасыщенных грунтов и инъекция из замкнутых объемов при расширении в результате промерзания), несомненно, присутствуют почти в каждом случае образования пальза.

Термин «миграционные бугры пучения» наиболее последовательно использовал А.И. Попов. Он считал: «...Выпуклобугристые торфяники в современной лесотундровой и таежной зонах могли возникнуть только при условии первоначального отсутствия вечной мерзлоты на большую глубину (более 20 м) в горных породах, подстилающих торф. Доказательством этого положения служит высокая степень льдистости подстилающих торф пород, простирающаяся до глубины 15–20 м. Высокая льдистость обусловлена миграцией влаги при медленном приращении вечной мерзлоты снизу, при постепенном охвате ею все более глубоких горизонтов» ([14], с. 199).

Пальза имеет многолетнемерзлое ядро, которое начинается в торфяном слое и достигает нижележащего минерального грунта или захватывает его. Основной характеристикой бугров пучения является наличие мерзлого торфяного ядра с тонкими ледяными линзами обычно толщиной 2–4 см (хотя в некоторых случаях они могут быть значительно толще) [5].

Формы типа пальза включают бугры, площади пучения, относительно прямые гряды и извилистые гряды. В Исландии описаны горбовидные, дайковидные, платообразные, кольцевые и куполовидные пальза, в Норвегии — платообразные, эскерные, вытянутые, конические или куполовидные пальза, а также пальза-комплексы. Ширина пальза обычно равна 10–30 м, длина — 15–150 м. Однако известны эскеровидные пальза-гряды дли-

ной до 500 м, располагающиеся параллельно наклону поверхности болота.

Диапазон высот пальза составляет обычно от менее 1 до 7–8 м, максимум до 10 м. Крупные бугры обычно менее близки по форме к конусу, чем мелкие. Местами пальза образуют комплексы, тянущиеся на несколько сотен метров. Поверхность таких бугров нередко бывает пересечена открытыми трещинами, созданными куполовидным поднятием, морозобойным растрескиванием или иссушением.

Обязательной составляющей пальза является торф, включающий многолетнемерзлое ядро с ледяными шлирами, толщина которых, как правило, не превышает 2–3 см, хотя встречаются шлиры толщиной 10–15 и даже 40 см (а авторам статьи встречались и линзы мощностью более 1 м). Лед мощностью до 3 м изучен авторами в бугре на пойме реки Танловаяха (правого притока реки Щучья на Южном Ямале) [5].

Строение разреза периферийной части бугра простое: торф подстилается глиной и песком. В осевой же части оно сложное: здесь наблюдается циклическая смена пачек торфа, суглинка и глины. Обращает на себя внимание характер залегания мощных ледяных шлиров — они располагаются практически на уровне поверхности бугра, что служит определенным подтверждением их сегрегационного происхождения.

При промерзании аласов и хасыреев в условиях суровых зим, когда активно происходит интенсивное морозобойное растрескивание, на расположении бугров пучения сказывается полигональность, образованная морозобойными трещинами. Бугры в этом случае также естественно располагаются по сетке, образуя в плане шахматный или полигональный рисунок (рис. 3).

Сочетание низких температур и медленного осушения приводит к формированию бугров смешанного типа (пинго-пальза), к концентрическому промерзанию, а также к формированию полигонально-жильных льдов.

По мере образования бугров на их поверхности сохраняется прежняя и/или формируется новая полигональная сеть трещин. В их разрезе можно обнаружить сегрегационные или сегрегационно-инъекционные линзы льда, рассеченные ледяной жилой. Такую комбинацию авторы наблюдали в разрезе молодого (современного) бугра пучения, расположенного в пределах молодой озерной котловины недалеко от озера Коолень на Чукотке.

Интересно, что около бугра преобладают молодые вогнутые полигональные формы, в то время как на некотором расстоянии они сменяются эрозионным выпукло-полигональным рельефом.

Повторно-жильные льды являются узкими в более молодых полигональных осадках и становятся шире и старше по направлению к более отдаленным территориям.

В условиях относительно высоких температур медленное осушение озера вызывает столь же медленное промерзание и формирование бугров пучения с их концентрическим расположением на

дне осушающегося аласа или хасырея (см. рис. 3, б). В условиях относительно высоких температур быстрое осушение (например, в результате спуска озера) вызывает медленное промерзание и формирование палза с их случайным расположением на дне озерной котловины (см. рис. 3, в).

Очевидно, что некоторая часть бугров пучения могла в ходе своей эволюции частично или полностью протаивать, судя по строению разрезов ряда из них, где наблюдается переслаивание торфа и горизонтов минеральных отложений или неоднократное переслаивание верхового и низинного торфа. Оба типа такого переслаивания авторы наблюдали в разрезах бугров пучения у села Азовы в низовьях реки Обь [3].

Важно подчеркнуть, что после протаивания как торфа, так и суглинков они не осушаются и содержат большое количество влаги. Это свойство протаявших бугров является важным фактором для их регенерации даже при незначительном изменении гидрологического режима или некотором похолодании. На месте таких бугров, даже если они протаяли полностью и образовалось по-

нижение, наполненное водой, происходит повторное интенсивное пучение именно вследствие повышенной влажности. Это может происходить и неоднократно.

Заметим, что образование термокарстовых озер на поверхности палза отнюдь не всегда свидетельствует об их деградации. Это скорее естественный ход развития бугра, когда при незначительном увеличении глубины сезонного протаивания оттаивают верхние слои его сильнольдистого ядра, в результате чего образуется озеро, часто правильной округлой формы (подобно тому, что наблюдали авторы на буграх в районе поселка Абезь) (рис. 4). Нередко в таких термокарстовых озерах начинают формироваться новые палза (рис. 5).

Любопытно было бы указать еще на одну дилемму, почти всегда возникающую при оценке современных тенденций развития бугров пучения: аргументы в пользу как их роста, так и деградации обычно почти одинаково убедительны. Так, бугор, сведения о котором были опубликованы в издании Исследовательского центра Европейской

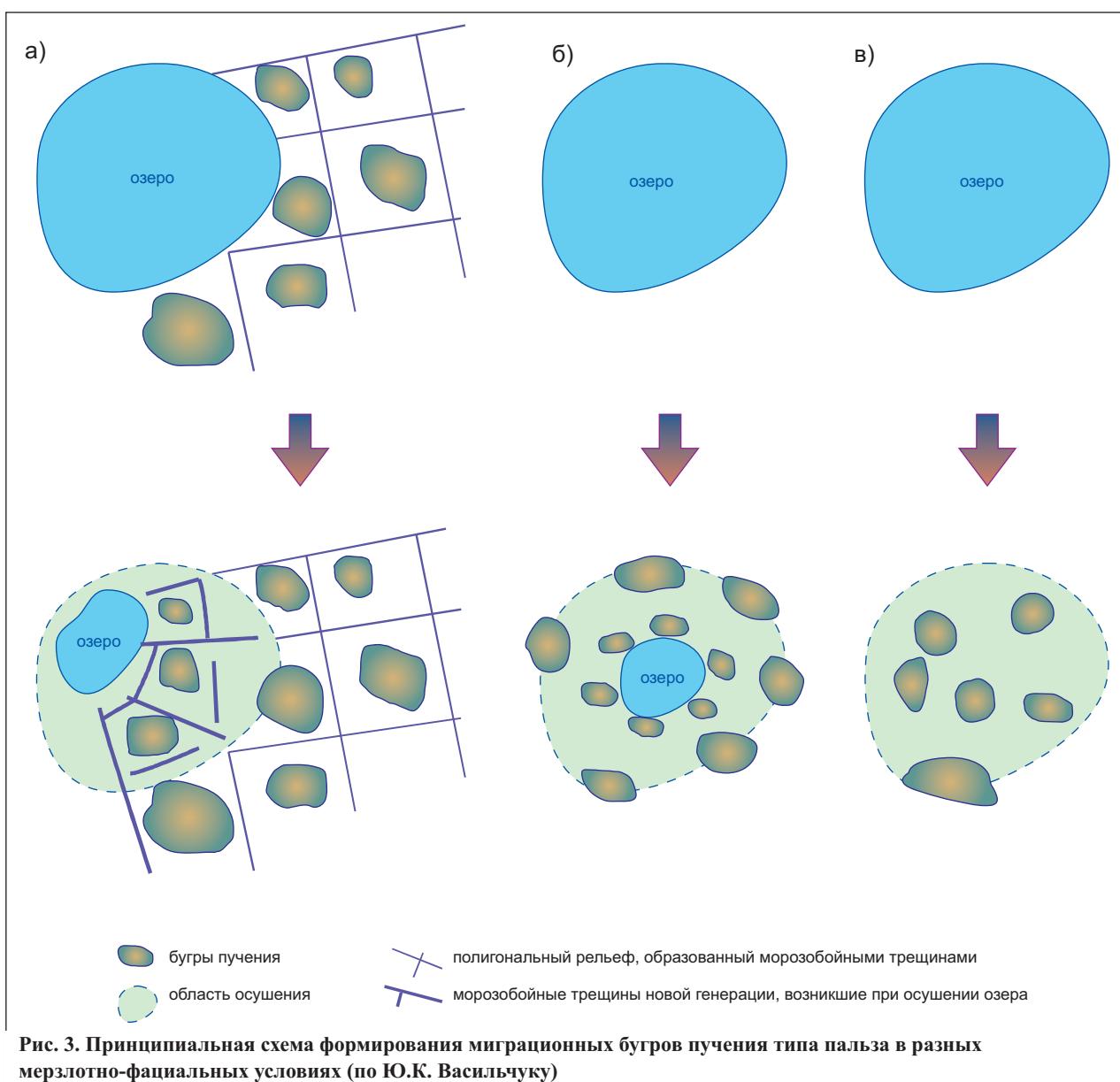


Рис. 3. Принципиальная схема формирования миграционных бугров пучения типа палза в разных мерзлотно-фациальных условиях (по Ю.К. Васильчуку)



Рис. 4. Зарастающее округлое термокарстовое озеро на поверхности палъза, близ пос. Абезь.
Фото Ю.К. Васильчука



Рис. 5. Округлое термокарстовое озеро, в пределах которого формируется зарождающийся миграционный бугор пучения, Европейский север России близ г. Воркуты в 2008 г. Из материалов Joint Research Centre of the European Commission, Crysoils

комиссии «Криосойлз» в начале 2008 года (см. рис. 5), был определен как деградирующий. Между тем его положение среди холодно- и мелководного термокарстового водоема, обеспечивающего интенсивную подпитку водой ледяного ядра, позволяет считать его скорее потенциально быстрорастущим (хотя саблевидная его форма в плане и указывает на возможную деградацию). Во всяком случае, при самом незначительном снижении позднесенних температур и уменьшении количества снега можно ожидать бурного роста этого палъза благодаря подтоку большого количества воды к растущим шлирам в его ледяном ядре.

Надо отметить, что молодые растущие бугры имеют весьма характерную правильную (симметричную) слабовыпуклую поверхность. Как правило, они отличаются тем, что многолетнемерзлые породы вокруг них отсутствуют или расположены на глубине в несколько метров. Такие палъза описал Р. Браун [20] на территории низменности Гудзонова залива на юге Канады. Совершенно аналогичные бугры исследовал и М. Сеппала [28]. Они погружались на несколько сантиметров в болото даже при надавливании на них ногами (рис. 6). Именно такие бугры на Кольском полуострове М.И. Сумгин [15] называл «мерзлыми айсбергами». Авторам же настоящей статьи более удачным представляется термин «плавающий бугор» или, точнее, «плавающий палъза». Действительно, бугры такого типа немного всплывают под действием архимедовых сил. То, что они являются молодыми и обязаны своим происхождением сегрегационным и миграционным процессам при промерзании в условиях открытой системы, не вызывает сомнений. И тем более удивительно, что именно в разрезе такого молодого плавающего бугра Р. Браун [20] описал линзу чистого льда мощностью почти 1 м.

Механизм формирования миграционных бугров типа палъза согласно работам Ю.К. Васильчука может быть очень различным (рис. 7). Для некоторых бугров он может представляться следующим. В процессе поселения растительности на болотах формируется кочкарник. При промерзании происходит подток влаги к кочкам-буграм со всех сторон. Постепенно промерзание охватывает все более глубокие горизонты торфа, суглинка, глин. В процессе промерзания происходит усадка объе-



Рис. 6. Молодой зарождающийся миграционный бугор пучения — палъза на юге Лапландии. Фото О.Рут

ма окружающих кочку пород за счет иссушения. Кочка, напротив, испытывает пучение в результате добавления новых объемов воды и подтягивания влаги к фронту промерзания в условиях высоких отрицательных температур и небольших длительно действующих градиентов, что приводит к формированию шлиров сегрегационного льда. Однако это только один из возможных сценариев развития палъза. Не менее распространено и образование бугров на месте сильновлажных понижений с активным торфонакоплением (см. рис. 7, а). Сочетание механизмов формирования палъза на месте кочки и на месте понижения может отмечаться и в пределах одного выпуклобугристого массива. Причем льдистость бугра, сформировавшегося на месте сильновлажного понижения, может быть существенно выше, чем у образовавшегося на месте первичной кочки (см. рис. 7, б).

Анализ показывает, что криогенные текстуры по периферии бугров пучения являются преимущественно сетчатыми, с отчетливо выраженными вертикальными шлирами. В осевых частях вертикально ориентированные шлиры встречаются редко. Текстуры здесь, как правило, слоистые, разрывающиеся с глубиной. Это объясняется тем, что в процессе пучения в бугре создаются напряжения, растягивающие грунт в горизонтальном направлении. Участки сосредоточения напряжений направлены вертикально и наклонно. В них создаются условия для образования сегрегационных шлиров

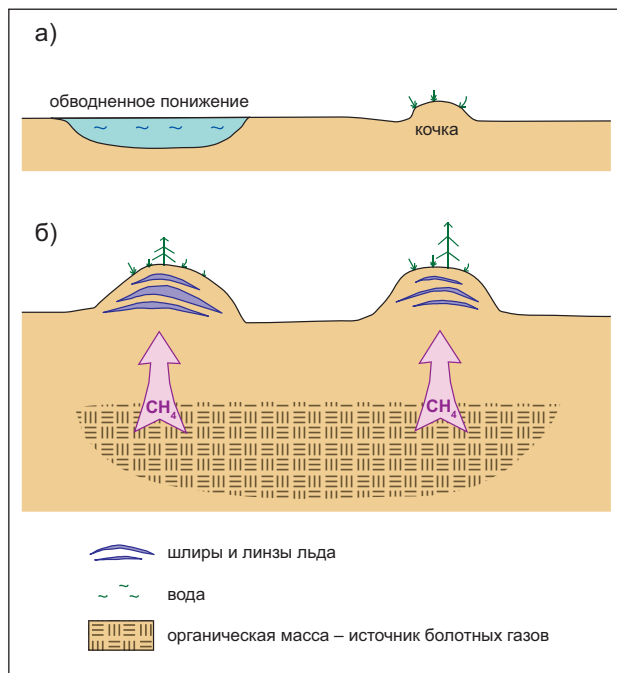


Рис. 7. Механизм формирования миграционных бугров пучения типа пальза при пучении обводненного понижения и эмбриональной кочки и последующее поступление метана снизу, способствующее всплыванию бугров.

По Ю.К. Васильчуку

льда и миграции влаги. Реализация этих условий наилучшим образом осуществляется в периферийных частях бугров вследствие близкого расположения источника питания — талой зоны [3].

Ю.К. Васильчуком [3] на основании детального изучения льдистости и криогенного строения пальза на севере Западной Сибири близ поселка Азовы было замечено, что суммарная мощность ледяных прослоев нередко на 3–4 м меньше превышения бугра над впадинами.

Кроме того, в разрезах сильнольдистых пальза было отмечено большое количество пустот и полостей общим объемом до 20% от объема мерзлой породы. Ранее такие же пустоты и полости наблюдал Н.Г. Бобов [2] в миграционных буграх пучения Центральной Якутии. Весьма ценно и наблюдение А.П. Горбунова [8], отметившего, что при бурении одного из таких промерзших бугров на Тянь-Шане в скважину начал интенсивно (с шипением) втягиваться воздух (и даже листки бумаги), что однозначно указывало на наличие полостей с вакуумом.

Одной из самых распространенных является точка зрения (скорее всего неточная) об исключительной приуроченности выпуклых миграционных бугров пучения на торфяниках к южным районам криолитозоны, где многолетнемерзлые породы распространены прерывисто или спорадически. Между тем пальза нередко встречаются и в районах сплошного распространения многолетнемерзлых пород [5, 7, 16, 30, 31]. Они практически всегда обнаруживаются в тех северных регионах, где есть торфяники, и обычно распространены в местах с продолжительными зимами и маломощным снежным покровом.

Интересно рассмотреть условия развития бугров пучения на южной и северной окраинах их ареала на Европейском Севере России с учетом новых материалов, полученных в последние полтора-два десятилетия.

Южный предел распространения пальза

Кольский полуостров

Крупные пальза на Кольском полуострове по описаниям Н.Я. Каца [12] встречаются в тундре, лесотундре и северной части тайги. Они широко распространены на востоке и не встречаются лишь в юго-западной части полуострова. По описаниям О. Кильмана [22], побывавшего в этом регионе в 1887 и 1889 гг., в его восточной части крупные торфяные бугры часто встречаются между Качковкой и Пономем. Их высота достигает здесь 3–4 м, а диаметр — 30 м. М.А. Лаврова [13] описала пальза высотой от 1 до 4 м в районе Волчьих тундр и Мончетундры.

В это же время М.И. Сумгин [15] наблюдал бугры пучения на берегах озер Нюдозеро и Щучье в 3–4 км к югу от станции Пудозеро. Высота самого высокого из них на берегу Нюдозера достигала 2 м, мощность торфа — около 0,8–0,9 м. Его минеральное ядро с линзочками льда имело выпуклую кровлю, повторяющую форму поверхности бугра. При помощи длинного железного щупа М.И. Сумгину удалось определить, что мерзлое тело этого пальза не достигает дна болота, а плавает в жидкой торфяно-водяной массе, т.к. щуп свободно проходил от края бугра под его мерзлую линзу. М.И. Сумгин предположил, что если бы очистить плотную торфяную массу вокруг бугра, то он бы поплыл по болоту. По словам данного автора, это был «торфяно-ледяной айсберг, стоящий на одном месте» (стр. 111 [15]).

Мерзлые бугры были описаны Г.С. Константиновой в котловине площадью около 4 км² в 30 км к юго-востоку от поселка Иоканьга.

Г.А. Елина с соавторами [11] исследовала крупную болотную систему площадью более 3 тыс. га, простирающуюся вдоль северо-западного побережья Ловозера (68° с.ш., 35° в.д.), с буграми пучения высотой 0,7–1,2 м (реже 2 м), занимающими до 60–70% изученной территории [11].

Работа по повторному исследованию пальза, выполненная В. Барканом [19] близ южной границы их распространения на Кольском полуострове (вплоть до 67°55' с.ш. на Нюдозере и 67°57' с.ш. на Мончеозере, Лумболкаозере, озере Имандра и др.), показала, что большая часть бугров не оттаяла в течение последних 80 лет, несмотря на положительную среднегодовую температуру воздуха в отдельные годы, варьировавшую от –3,0 до +2,8°С.

Консервации и современному росту пальза в районе Нюдозера способствуют особенности рельефа. Поверхность болотного массива с буграми пучения открыта сильному ветру, проникающему в долину озера между горными массивами Нюд и Сопчел. Зимой этот ветер, сдуваю-



щий снежный покров с пальза, является важным фактором, способствующим развитию бугров в данном районе. Подобные климатические условия характерны и для других массивов, например находящихся в районе г. Мончегорска и на территориях севернее Ньюозера, которые расположены вдоль линии «север—северо-восток — юг—юго-запад», совпадающей с основным направлением ветра.

В. Баркан отмечает, что более древние пальза частично разрушены термоэрозионными процессами, обусловленными увеличением глубины сезонного протаивания в течение последних 70–80 лет. Однако в целом болотные массивы с буграми пучения сохранились в силу инерционности мерзлого ядра, которое сохраняется в течение десятков и сотен лет даже в условиях нарушения целостности поверхности пальза трещинами, полостями и пр. При этом важнейшую роль играют теплоизоляционные свойства торфа [19].

Полуостров Канин

Согласно результатам исследований Р. Поле, выполненных в начале XX века, крупнобугристые болота играют на полуострове Канин важнейшую роль. Пальза здесь имеют вид или изолированных холмов с крутыми склонами, или валов. Их высота достигает 2–3 м, длина — 15–20 м. Деревья на этих буграх отсутствуют — преобладают тундровые виды растительности. Н.Я. Кац [12] отмечал, что по берегам Чешской губы и Мезенского залива торфяники с буграми 2–3-метровой высоты занимают 80–90% всей площади.

В.Н. Андреев и др. [1], описывая олени пастища полуострова Канин, встретили на берегу Чешской губы как крупные округлые бугры с крутыми стенками и выпуклыми вершинами, перекрытые торфом, высотой до 3 м и диаметром до 10–15 м, так и небольшие торфяные бугры высотой до 0,7 м. Интересно, что в средней части полуострова, у мыса Конушина (67,2° с.ш.), в нижней части крупнобугристого торфяника были встречены стволы, ветви, корни и кора белокорой березы, северная граница ареала которой сейчас проходит значительно южнее. В узкой полосе лесотундры по зимнему берегу Белого моря А. Леонтьевым в начале 1930-х гг. были обследованы обширные сфагновые болота с буграми или гря-

дами высотой 0,5–1,5 м и обширными топками мочажинами, а иногда и озерками. Несколько южнее Ц. Минкина описала участки крупнобугристых комплексов площадью до 4 тыс. га с буграми высотой до 3 м.

Большеземельская тундра

Р. Поле описал крупнобугристый торфяник в верховьях р. Уса, где пальза достигали высоты 4–5 м. Б. Городков [9] описал торфяники вдоль р. Адзья, притока р. Уса, с крупными буграми высотой от 1,5 до 3–4 м, вершины некоторых из них имели явные признаки разрушения (расплавившийся, как бы вылившийся и потом застывший торф, размываемый дождями и водой и развеиваемый ветром).

В 1999–2003 гг. Ю.К. Васильчук с соавторами [4, 6] исследовали выпуклые бугры пучения на многолетнемерзлых торфяных массивах близ поселка Хановой и в долине р. Уса.

Самыми южными из изученных авторами являются пальза у станции Бугры и у поселка Уса, которые находятся вблизи южного предела их ареала на Европейском Севере.

Один из самых южных обширных бугристых массивов расположен на 2070-м километре железнодорожной трассы Москва — Воркута у станции Бугры севернее города Инта (66°23' с.ш., 61°24' в.д.). Это массив размером 300×500 м, в пределах которого отмечено не менее 15 бугров. Их высота достигает 3 м и более (рис. 8, а). По периферии крупных бугров отмечены раздувы (рис. 8, б), свидетельствующие об их частичном разрушении с поверхности.

В пределах озерно-болотного массива у поселка Уса (66°31' с.ш., 61°40' в.д.) имеются и высокие (до 4 м) (рис. 9, а), и низкие (менее 1 м) (рис. 9, б) бугры пучения (отметим, что среднегодовая температура грунтов меняется в Усе от –0,2 до –1,0°С). Пальза высотой 3–4 м изучены также в районе поселка Абезь (66°31' с.ш., 61°46' в.д.) — центральной части области их распространения в Большеземельской тундре. В 160 км северо-восточнее был исследован бугристый массив в районе поселка Никита (67°02' с.ш., 63°48' в.д.). Здесь распространены как крупные пальза высотой до 5 и даже 8 м, так и невысокие бугры высотой до 0,5–2,0 м.



Рис. 8. Миграционные бугры пучения типа пальза близ южной границы ареала у станции Бугры. Фото Ю.К. Васильчука



Рис. 9. Крупные (слева) и малые (справа) миграционные бугры пучения типа пальза близ южной границы ареала у станции Уса. Фото Ю.К. Васильчука

Долины рек Большая Роговая и Большая Пьятомбью

П. Оксанен и П. Курри с соавторами [25, 26] также исследовали бугры и площади пучения в Большеземельской тундре — между реками Большая Роговая и Большая Пьятомбью в Ненецком автономном округе (в Архангельской области, в нескольких километрах от границы с Республикой Коми). Изучаемая область занимает приблизительно 35 км² (67°15′–67°16′ с.ш., 62°04′–62°08′ в.д.). Высота поверхности составляет 60–80 м над уровнем моря. Район исследований принадлежит бассейну реки Уса и находится в области прерывистого распространения многолетнемерзлых пород с мощностью 10–200 м.

В пос. Усть-Уса, расположенном около южной границы области спорадического распространения многолетнемерзлых пород, среднегодовая температура составляет –3,2°C, а средняя температура июля — +14,1°C. В городе Печора, который расположен южнее этой области, среднегодовая температура равна –2,7°C, а средняя температура июля — +16°C. Зимний период в районе исследований продолжительный (октябрь–апрель), влажный и холодный. Снежный покров лежит в среднем 230 дней, его мощность в апреле составляет около 65 см. Количество осадков приблизительно равно 500 мм в год. Региональная растительность главным образом мохово-лишайниковая и кустарниковая тундровая, с отдельными рощицами из ели вдоль рек, где многолетнемерзлые породы отсутствуют. Ближайшие леса расположены приблизительно в 50 км южнее по долине реки Уса.

Средняя мощность торфа в пределах пальза составляет 1–2 м. Многолетнемерзлые породы лежат в основании бугров (кроме некоторых заболоченных участков и термокарстовых озер). В результате морозного пучения торфяные участки располагаются приблизительно на 1–2 м выше уровня термокарстовых озер. Активный слой в торфе в июле–августе 1995 г. располагался на глубине 20–40 см. Было отмечено несколько полигональных трещин, но они здесь мало распространены.

В первой публикации П. Оксанен с соавторами [26] писали, что в междуречье рек Большая Роговая и Большая Пьятомбью они исследовали площадь пучения, расчлененную эрозионными процессами, но позднее они пришли к выводу, что это типичные пальза [25].

Северный предел распространения пальза

Наиболее северными из детально изученных пальза являются бугры у станции Елецкая и вблизи г. Воркута.

Авторами статьи были детально исследованы два бугра пучения высотой 3,5 и 4 м (рис. 10, а) в пределах бугристого торфяника в 1,5 км к северо-востоку от поселка Елецкая (67°16′ с.ш., 63°39′ в.д.).

Одним из самых северных местонахождений пальза в Большеземельской тундре является изученный авторами статьи массив бугров высотой до 3,5 м близ поселка Хановей [6] и бугры, исследованные сотрудниками «Фундаментпроекта» примерно в 20 км восточнее г. Воркута (рис. 10, б).

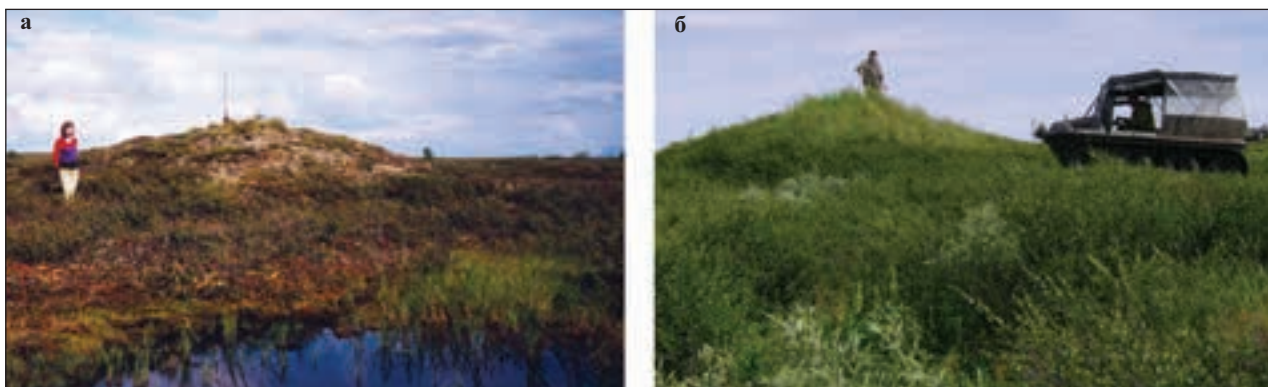


Рис. 10. Миграционные бугры пучения типа пальза близ северной границы ареала у станции Елецкая (слева) и севернее г. Воркуты. Фото Ю.К. Васильчука и Е. Ворониной



Отметим, что среднегодовая температура воздуха в районе исследований составляет $-6,3^{\circ}\text{C}$, средняя температура января равна $-20,4^{\circ}\text{C}$, июля — $+11,7^{\circ}\text{C}$.

В июле 2007 г. примерно в 20 км восточнее г. Воркута ($67^{\circ}30'$ с.ш.) сотрудниками института «Фундаментпроект» были разбурены 2 крупных выпуклых бугра высотой 5 и 9 м. Первый из них располагается отдельно и перекрыт с поверхности торфом мощностью около 1 м. В его ядре вскрыты сильнольдистые породы. Второй бугор, более высокий, является самым крупным из трех палъза, образующих гряду. С поверхности он сложен минеральным грунтом.

Особенности расположения этих палъза, характер растительного покрова, и, главное, высокая льдистость позволяют с большой долей уверен-

ности отнести их к выпуклым буграм миграционного типа.

Ранее палъза вблизи г. Воркута были изучены в середине XX-го века в процессе исследований гео-криологических условий района. Был составлен гео-криологический профиль, проходящий через миграционный бугор пучения высотой около 6 м в устье реки Воркута [10], перекрытый с поверхности торфом мощностью около 2 м и подстилаемый сулинком мощностью немногим более 5 м. Температура грунта, измеренная в скважине на вершине бугра, на глубине 7 м составляла $-2,0^{\circ}\text{C}$ (рис. 11). Многолетнемерзлые породы приурочены непосредственно к бугру, причем максимальная их мощность (около 25 м) отмечается под его вершиной [10]. В.П. Евсеев также привел криолитологический разрез невысокого (менее 2 м) миграцион-

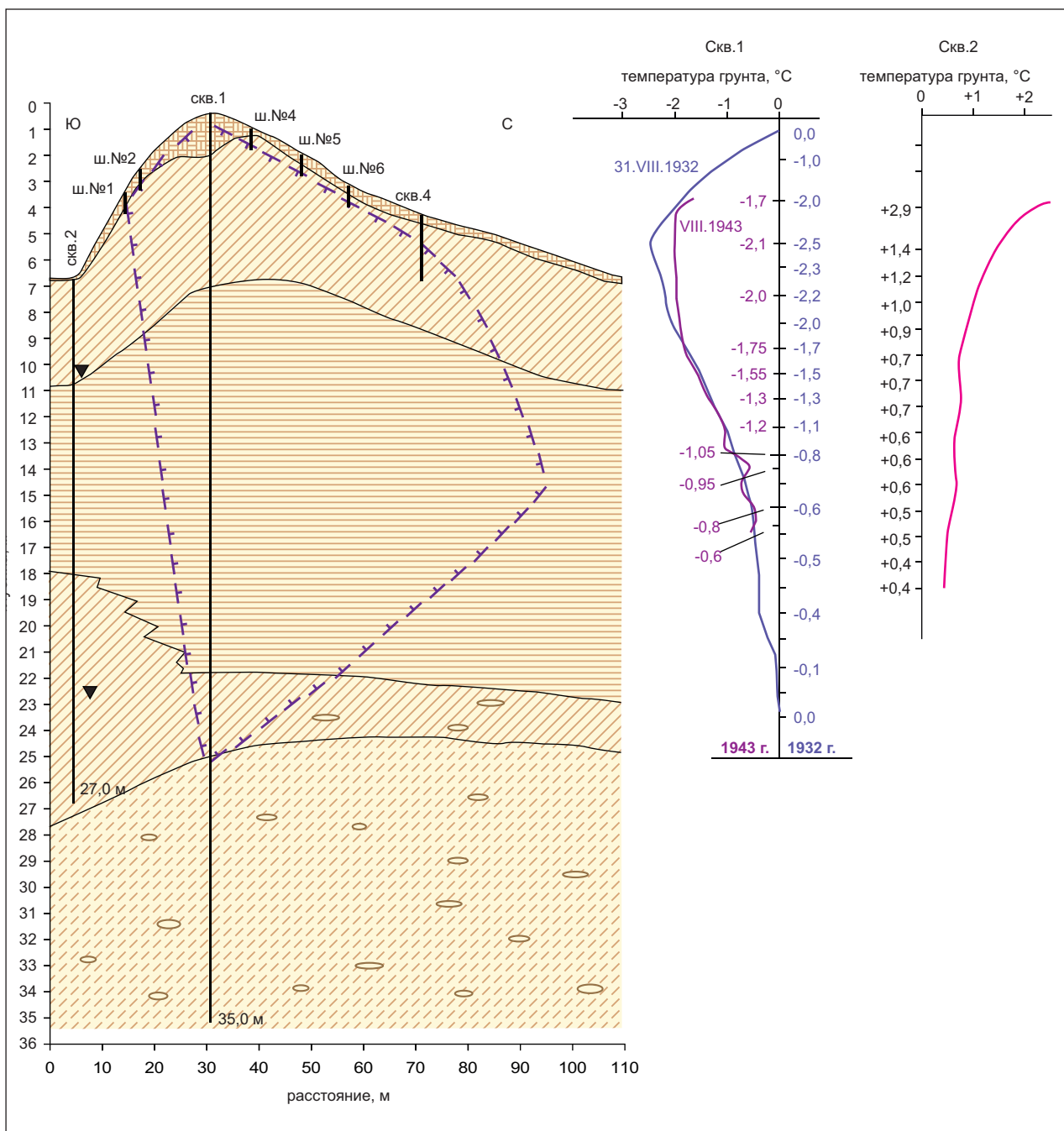


Рис. 11. Гео-криологический разрез сегрегационного (миграционного) бугра пучения вблизи устья р. Воркута. Составил В.П. Евсеев [10] по материалам Н.Г. Датского и Д.В. Редозубова

ного бугра пучения в районе распространения ленточных глин в бассейне реки Лек-Воркута, в котором до глубины 2,5–4,0 м было отмечено переслаивание горизонтов торфа, песка и суглинка, а с 2,5–4,0 до 16 м под тонким слоем валунного суглинка залегает мощная толща ленточных глин. Криотекстура этих глин линзовидно-слоистая в интервале глубин от 4 до 12,5 м, мощность шпиров достигает 30 см. В нижней части криотекстура слоистая, мощность шпиров снижается до 3–10 см. Суммарная мощность ледяных прослоев в интервале 3,3–15,9 м составляет 2,45 м [10].

Экспедицией ПНИИИС были исследованы бугры пучения на северо-западной окраине Большеземельской тундры — в районе Южно-Хыльчеюсского нефтегазового месторождения (в Ненецком автономном округе Архангельской области — в 120 км к северо-востоку от города Нарьян-Мар и в 80 км к северо-западу от поселка Харьягинский). Это весьма северное ($68^{\circ}10'14''$ с.ш., $55^{\circ}21'56''$ в.д.) местонахождение палеозоя. Они находятся в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород (занимающих более 80% территории). В среднем мощность мерзлой толщи составляет здесь 100–200 м. Ее сплошность нарушается небольшим количеством сквозных и несквозных таликов. Среднегодовая температура грунтов варьирует от $+0,5$ до $-2,5^{\circ}\text{C}$. Бугры пучения (как торфяные, так и минеральные) распространены на сильно заболоченной и заозеренной поверхности III аллювиально-морской террасы с абсолютными отметками 30–45 м.

Бугры здесь, как правило, невысокие, выпуклые и плосковершинные, высотой 1,0–1,5 м, диаметром от 5–10 до 20 м (по описанию Е.А. Шапошниковой). Растительность на них представлена карликовой березой, багульником, мхом, лишайником. Сверху мохово-лишайниковый покров рассечен трещинами. Бугры часто находятся на полигональном торфянике (диаметром 25–30 м) в центре полигонально-валикового болота. Торф в верхней части их разреза имеет мощность около 1 м. Он мерзлый с глубины 0,3–0,4 м, при этом его льдистость в верхней части разреза высокая, что обусловлено его атакситовой криотекстурой. Под торфом залегают льдистые пески или переслаивающиеся тонкодисперсные грунты. Криотекстура песков массивная. На глубине 2–4 м прослеживаются горизонты ледогрунта.

Таким образом, южный предел распространения миграционных бугров пучения на Европейском Севере совпадает с южной границей распространения многолетнемерзлых грунтов: на Кольском полуострове это примерно $67^{\circ}50'$ с.ш., на полуострове Канин — около $67^{\circ}00'$ с.ш., в Ненецком округе — южнее $67^{\circ}10'$ с.ш., в Большеземельской тундре — южнее $66^{\circ}20'$ с.ш.

Ареал миграционных бугров пучения в северной части Европейского Севера далеко заходит в зону низкотемпературных многолетнемерзлых пород со сплошным распространением с поверхности и достигает $68^{\circ}10'$ с.ш. в Ненецком округе и $67^{\circ}30'–68^{\circ}00'$ с.ш. в Большеземельской тундре.

Вполне вероятно, что их можно встретить и севернее и даже на арктических островах.

Радиоуглеродное определение возраста бугров

По торфяным отложениям, перекрывающим бугры в долине реки Уса в Большеземельской тундре, авторами было получено 75 новых радиоуглеродных датировок.

Поселок Бугры

У поселка Бугры для датирования был выбран бугор пучения высотой 3,2 м (рис. 12А). Торф здесь начал накапливаться 8,6 тыс. лет назад. 2,3–2,1 тыс. лет назад началось промерзание и сформировался бугор.

Поселок Уса

У поселка Уса было детально исследовано и датировано несколько разновысотных бугров пучения. Невысокий бугор (0,8 м) (рис. 12 Б, а) оказался самым молодым: гипновый торф в его разрезе с глубины 0,1 м имеет возраст 140 лет. В разрезе бугра высотой около 4 м вахтовый низинный торф с глубины 0,8 м датирован 6,65 тыс. лет, а с глубины 0,3 м — 5,2 тыс. лет (рис. 12 Б, з). Этот бугор самый древний.

Поселок Абезь

Радиоуглеродное датирование палеозоя у поселка Абезь, выполненное по 8 образцам, отобранным из осевой части бугра пучения высотой 3 м, показало, что торф здесь начал накапливаться 5,6 тыс. лет назад. Завершение торфонакопления было датировано по переходному мохово-травяному торфу с глубины 0,1 м — оно произошло 2,7 тыс. лет назад (рис. 12 В). Ранее две близкие радиоуглеродные датировки были получены В.П. Евсеевым [10] для основания торфяника одного из бугров близ того же поселка (5,7 и 5,5 тыс. лет).

Поселок Никита

В разрезе бугра высотой 4,7 м у поселка Никита прослеживается переход от торфа, сформировавшегося 8,2–7,5 тыс. лет назад в условиях лесного хвощового болота (в интервале глубин 0,80–0,65 м) к торфу с высоким содержанием остатков деревьев (что, возможно, указывает на частичное осушение участка) на глубине 0,65 м, сформировавшемуся около 5,3 тыс. лет назад (рис. 12 Г, б).

В 1,5 км южнее данного поселка был исследован бугор высотой 3,5 м (рис. 12 Г, в). Древесина и остатки крупных кустарников с глубины 0,4–0,5 м указывают на субэральные условия развития торфяника и датированы возрастом 6,3–6,1 тыс. лет.

Небольшой бугор высотой 0,7 м сложен низинным торфом (рис. 12 Г, а). Его пучение имеет возраст 1,5 тыс. лет.

Поселок Елецкая

Бугор высотой 4 м у поселка Елецкая перекрыт торфом мощностью 1,15 м (рис. 12 Д, а). Этот древесно-осоковый торф с глубины 0,3 м датиро-



ван возрастом 4,8 тыс. лет (начало пучения). Второй бугор высотой 3,5 м перекрыт торфом мощностью около 1 м (рис. 12 Д, б). По датировке 7,42–7,12 тыс. лет назад фиксируется осушение массива в результате начавшегося пучения.

Поселок Хановей

У поселка Хановей был датирован бугор пучения высотой 2,5 м (рис. 12 Е). Торф в основании торфяного слоя начал накапливаться 8,8 тыс. лет назад. Судя по остаткам водных растений, торфо-накопление шло здесь в эвтрофном режиме.

Торф с глубин 0,6 и 0,5 м датирован возрастом 8,5 и 7,5 тыс. лет соответственно.

Торф в интервале глубин 0,3–0,1 м намного моложе — его возраст составляет 3,75–3,85 тыс. лет. Для вершины бугра получена современная дата.

Радиоуглеродное датирование, выполненное по 3 образцам, отобранным на склоне этого бугра, продемонстрировало, что возраст торфа здесь существенно меньше, чем в его осевой части, и составляет 2,9–2,8 тыс. лет. Мощность торфа тут не превышает 0,25 м, и, кроме того, здесь отмечена инверсия датировок (3,5 тыс. лет между 2,9 и 2,8 тыс. лет), связанная с оползанием торфа вниз с поверхности сформировавшегося ранее бугра или с заполнением пустот, образовавшихся во время пучения. Еще более молодой возраст — современ-

ный и 480 лет — был получен для основания бугра и для обводненного понижения вокруг него.

Радиоуглеродные датировки позволили установить, что формирование бугров могло происходить в разные периоды голоцена (в т.ч. и в настоящее время) как в разных геоэкриологических зонах, так и в пределах единого бугристого массива [4–6]. На это указывают смена состава торфа и изменение скорости его накопления, что позволило реконструировать моменты начала пучения и формирования бугров в разных массивах (см. рис. 12).

Междуречье рек Большая Роговая и Большая Пьятомбью

П. Оксанен с соавторами [25, 26] датировала бугры пучения, расположенные в междуречье рек Большая Роговая и Большая Пьятомбью в Ненецком автономном округе. Было выполнено радиоуглеродное датирование торфа и древесных остатков из 6 точек выпуклобугристого торфяного массива (верхней части разрезов). Четко выраженные стратиграфические переходы от темного увлажненного травяного к светлому сухому сфагновому торфу в верхних частях четырех разрезов в долине реки Роговая были датированы периодом от 2210 до 162 лет назад. П. Оксанен интерпретирует эти переходы как максимальный возраст образования пазы в данном месте [25].

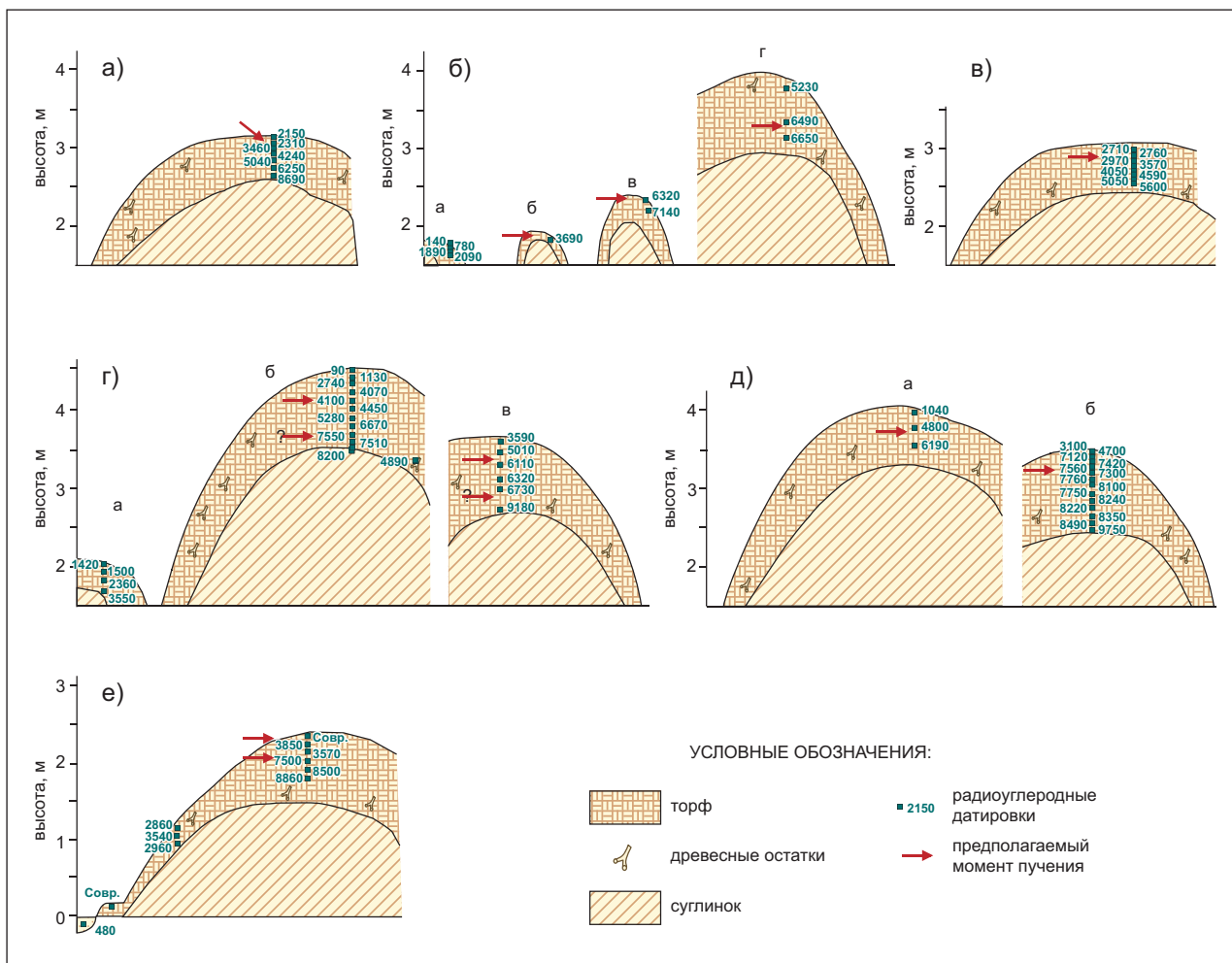


Рис. 12. Радиоуглеродное датирование бугров пучения в Большеземельской тундре (из Ю.К. Васильчука и др. [5, 6]): А — пос. Бугры, Б — пос. Уса, В — пос. Абезь, Г — пос. Никита, Д — пос. Елецкая, Е — пос. Хановей

В разрезах 2 других бугров отмеченные изменения поверхностных условий возрастом до 3,1 тыс. лет могли быть самыми ранними признаками динамики развития многолетнемерзлых пород в районе торфяника.

Наиболее вероятно, что многолетнемерзлые породы в этих буграх появились около 2,8 и 2,2 тыс. лет назад. В других профилях максимальные даты развития многолетнемерзлых пород *in situ* варьируют между 2210 и 160 лет назад.

Радиоуглеродные датировки по этому району Большеземельской тундры характеризуют достаточно молодой голоценовый массив пучения, в котором имеются разновозрастные бугры: наиболее древние бугры не старше 2,2 тыс. лет, а самые молодые — не старше 160 лет [25, 26].

Ловозеро

Датирование бугров в районе Ловозера на Кольском полуострове [11] позволило определить хронологию развития этого массива пучения. Торфообразование началось здесь примерно 7,5 тыс. лет назад и продолжается с некоторыми перерывами до настоящего времени. Скорость торфонакопления, судя по радиоуглеродным (^{14}C) датам, была неравномерной, причем значительно меньшей, чем в более южных таежных широтах [11].

Торф подстилается песком, залегающим на глубинах от 130 до 185 см. Озерные пески откладывались 8,6–7,5 тыс. лет назад [11]. В разрезе топи слой древесного торфа на глубине 120–130 см датирован возрастом 5930 ± 110 лет. Заращение озер территории водно-болотными растениями началось 7,5 тыс. лет назад.

7,5–5,3 тыс. лет назад накопление торфа происходило со скоростью 0,010 см/год. 5,3–3,4 тыс. лет назад скорость накопления торфа снизилась до 0,005 см/год. Однако состав растений-торфообразователей не дает оснований определить, возникали ли в данной точке многолетнемерзлые породы или же снижение скорости торфонакопления было вызвано иными факторами.

В последующие полторы тысячи лет (3,40–1,96 тыс. лет назад) торф накапливался с высокой скоростью (0,21 см/год), что означает благоприятные условия для растений-торфообразователей, в частности *Sphagnum fuscum*. По всей вероятности, бугор как форма рельефа образовывался здесь в момент завершения накопления фускум-торфа 1960–90 лет назад.

Предположительно возраст молодых бугров пучения на Кольском полуострове варьирует от 1960 лет до современного. Скорость торфонакопления на многих пальза в этот период значительно снизилась, что может быть вызвано поднятием бугров над поверхностью [11].

Динамика развития пальза в голоцене

Принято считать, что период голоценового оптимума, охватывающий около двух третей первой части голоцена, был этапом повсеместной деградации многолетнемерзлых толщ и разрушения

большинства бугров пучения. Но исследованиями авторов настоящей статьи было установлено, что это не совсем так.

Х. Сеппа и его сотрудники [27, 29] исследовали изменения древесной растительности в голоцене на бугристых массивах Большеземельской тундры в бассейне реки Печора. Они полагают, что в течение периода голоценового оптимума на данной территории (которая в настоящее время расположена на границе леса и за ее пределами) происходило расширение ареалов древесной растительности (ели, березы), которая в виде отдельных редколесий произрастала здесь с начала голоцена [29].

В течение голоценового оптимума, который здесь датирован возрастом 8,0–3,5 тыс. лет [27], среднелетняя температура в тундре была на 3°C выше современной. В то время вокруг озера Хариней, расположенного в 150 км севернее современной границы леса, произрастали еловые леса. Около 3,5–2,5 тыс. лет назад температура понизилась, что привело к активному формированию здесь многолетнемерзлых пород и интенсивному росту пальза, а также к отмиранию древесной растительности, наиболее древние остатки которой датированы возрастом 2,5 тыс. лет [27].

Радиоуглеродное датирование, проведенное авторами, позволило определить начало пучения и динамику развития пальза в голоцене на участках их развития у станции Бугры и поселков Уса, Абезь, Никита, Елецкая и Хановой.

Проведенные расчеты показывают, что процессы пучения на рассмотренных территориях обусловлены как общеклиматическими изменениями, так и локальными факторами. И даже в пределах одного и того же массива скорости накопления торфа, моменты пучения и длительности субэаральной и субаквальной фаз могут не совпадать. Но при рассмотрении большого массива данных можно выделить этапы интенсификации и относительного затухания процессов пучения. Даже в пределах южной части криолитозоны в оптимум голоцена многолетнемерзлые породы не деградировали, а напротив, могли начать формироваться новые бугры пучения. Основным фактором такого на первый взгляд геокриологического парадокса было интенсивное накопление торфа вследствие высоких летних температур и сохранение, а местами и ужесточение суровости зим в период оптимума голоцена.

Рассмотрим подробнее динамику развития исследованных бугров пучения.

Станция Бугры

Установлено, что рост небольшого пальза высотой 0,8 м у станции Бугры на начальной стадии неоднократно прекращался. Очевидно, он сформировался только в последнее столетие (датирование пробы с глубины 0,1 м и осоково-гипнового торфа, залегающего на поверхности бугра, дало возраст, равный примерно 140 годам) (см. рис. 12А).

Другой бугор высотой около 2 м начал формироваться не ранее чем 3,7 тыс. лет назад. Поскольку с поверхности залегают осоково-гипновый



торф, можно сказать, что пучение произошло довольно быстро, т.к. верховой торф не успел сформироваться. Поскольку на бугре отсутствует лишайниковое покрытие, можно сказать, что пучение произошло совсем недавно (в пределах последних 100 лет).

В строении палыза высотой 2,5 м снизу вверх по разрезу отмечена смена осокового низинного торфа возрастом 7,10 тыс. лет (на глубине 0,5 м) низинным вахтовым торфом возрастом 6,32 тыс. лет, что указывает на начавшийся процесс изменения режима водно-минерального питания в интервале 7,1–6,3 тыс. лет назад. Пучение, судя по характеру распределения радиоуглеродных датировок и составу торфа, произошло здесь не ранее чем 6 тыс. лет назад.

Бугор высотой 4 м начал формироваться не ранее 6,5–6,0 тыс. лет назад. При этом вахтовый низинный торф сменился древесным с участием остатков сосны, ивы и березы. Скорость накопления торфа в течение субаквальной фазы была весьма велика — 0,06 см/год. Судя по соотношению толщины торфяного слоя и датировок, переход в субаэральную фазу завершился около 5 тыс. лет назад, когда накопление торфа и рост бугра полностью прекратились.

Поселок Уса

Особенно интенсивно процесс пучения у поселка Уса происходил после 6,5–6,0 тыс. лет назад. Палыза поднялись над поверхностью на 2–3 м. Некоторые из сформировавшихся тогда бугров к настоящему времени стали разрушаться. Однако активный процесс пучения возобновился вновь 3,7–2,1 тыс. лет назад и продолжается до настоящего времени. При этом поднятие поверхности более молодых бугров составило 0,35–1,60 м (рис. 13А).

Поселок Абезь

Бугор пучения у поселка Абезь начал формироваться около 2,7 тыс. лет назад, что зафиксировано переходом к слаборазложившемуся, т.е. быстро промерзшему, переходному торфу — моховому и мохово-травяному с остатками шейхцерии, злаков и сабельника (рис. 13 Б).

Поселок Никита

Бугор пучения высотой 4,7 м у поселка Никита начал формироваться около 7,5 тыс. лет назад, судя по смене низинного болотного торфа торфом с высоким содержанием остатков деревьев (что, возможно, указывает на частичное осушение участка) (рис. 13В). Судя по интенсивности накопления торфа, пучение продолжалось длительное время. Переходная фаза завершилась около 2,7 тыс. лет назад. На глубине 0,25–0,35 м отмечены остатки вахты (*Menyanthes trifoliata*), осок (*Carex chordorrhiza*, *C. diandra*), хвоща (*Equisetum*). Это, видимо, может служить свидетельством частичного протаивания и проседания бугра, которое произошло около 4,5 тыс. лет назад. Впоследствии он вновь восстановился и вырос до современных размеров.

Бугор высотой 3,5 м начал формироваться около 6,7 тыс. лет назад, что фиксируется сменой черного древесно-хвощового придонного торфа (в основании слоя) торфом с древесиной и остатками крупных кустарников. Возможно, что примерно 5 тыс. лет назад произошло частичное протаивание бугра, судя по остаткам хвощей в торфе на глубине 0,2–0,3 м. Затем бугор вновь восстановился (не ранее 3,6 тыс. лет назад). Небольшой бугор пучения высотой 0,7 м, сложенный торфом, накапливавшимся в условиях повышенной обводненности участка, начал расти около 2,3 тыс. лет назад, что было определено по смене осокового низинного

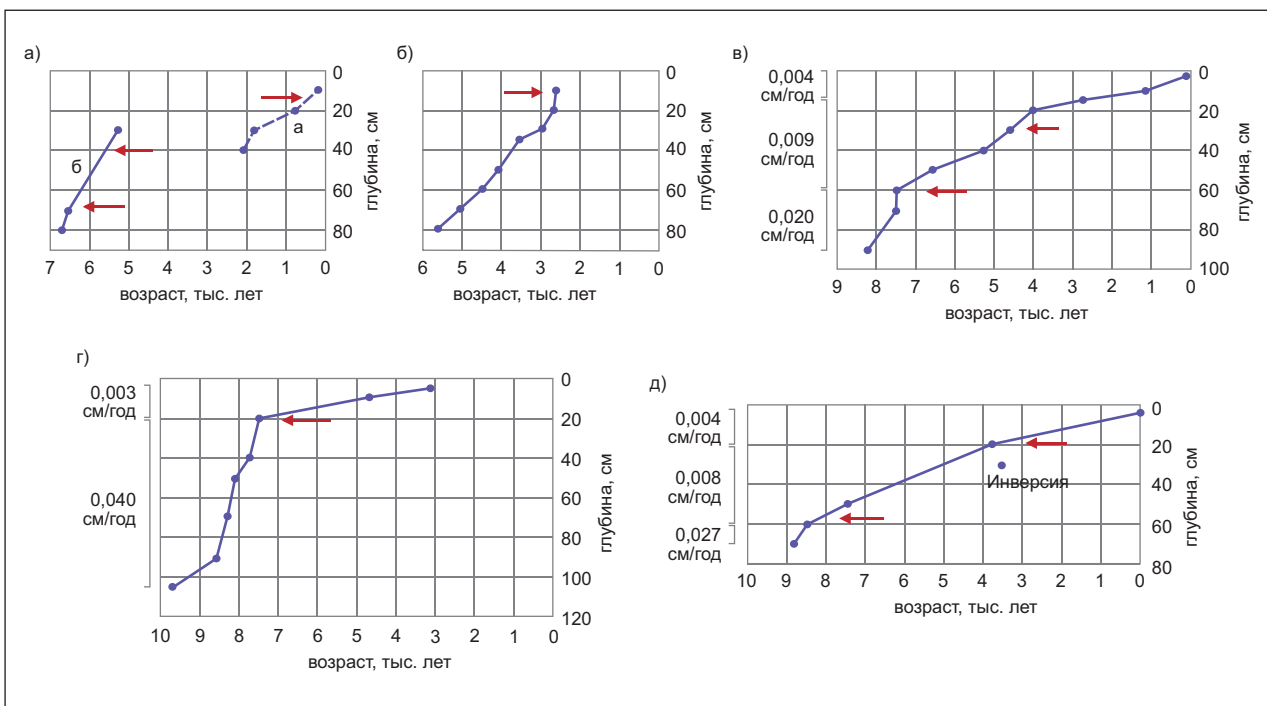


Рис. 13. Предполагаемые моменты пучения (показаны стрелками) и скорость торфонакопления в буграх пучения в Большеземельской тундре: А — пос. Уса, Б — пос. Абезь, В — пос. Никита, Г — пос. Елецкая, Д — пос. Хановой

торфа осоково-гипновым с участием вахты и злаков. Он был весьма неустойчив: по-видимому, неоднократно протаивал и проседал (и тогда на его месте, вероятнее всего, оставалось лишь невысокое возвышение или кочка), а затем вновь промерзал и вспучивался. Но позже чем 1,5–1,4 тыс. лет назад это пульсирующее состояние преобразовалось в более стабильное.

Поселок Елецкая

В разрезе палъза высотой 4 м у поселка Елецкая начало пучения и завершение субаквальной фазы развития бугра было выделено на глубине 0,3 м и датировано возрастом 4,8 тыс. лет. Последующая субаэральная фаза длилась около 5 тыс. лет.

Формирование бугра пучения высотой 3,5 м, вероятно, произошло 7,5 тыс. лет назад. Скорость накопления торфа субаквальной фазы составила 0,27 м/тыс. лет (рис. 13Г). В течение последующей субаэральной фазы скорость накопления торфа составила 0,08 м/тыс. лет. На вершине палъза также отмечен осоковый торф низинного типа, что может быть свидетельством частичного протаивания бугра 4,7–3,1 тыс. лет назад.

Можно предполагать, что особенно интенсивно процесс пучения вблизи поселка Елецкая происходил около 7,7 тыс. лет назад, когда бугры вспучились на 3,0–3,4 м.

Поселок Хановой

Датирование торфа из палъза у поселка Хановой показало длительный перерыв в торфонакоплении или резкое замедление торфообразовательного процесса 7,5–3,5 тыс. лет назад, что указывает на промерзание массива и образование сравнительно небольшого бугра пучения. Торфонакопление возобновилось здесь ненадолго около 3,5 тыс. лет назад. Поскольку для вершины бугра была получена современная дата (рост торфа продолжался до настоящего времени), очевидно, что бугор поднялся над поверхностью недавно (рис. 13Д).

Распределение радиоуглеродных датировок (более древних в осевой части бугра и более молодых на склоне) продемонстрировало два важнейших момента. Во-первых, этот бугор является именно бугром пучения, а не остаточной формой, возникшей в результате эрозии первоначально плоского торфяника (как считали не только сторонники гипотезы эрозионного происхождения бугров на этой территории, но и те исследователи, которые в принципе признавали пучение в качестве основного механизма формирования выпуклобугристых форм, но полагали, что в Большеземельской тундре это проявляется в более южных районах, а бугристые формы рельефа на севере, вблизи г. Воркута, в условиях более низких температур грунта, они относили к остаточным крупноблочным формам, образовавшимся в результате эрозии по морозобойным трещинам). Во-вторых, здесь очень явно зафиксированы как первоначальный момент пучения 7,5 тыс. лет назад, когда сформировался небольшой бугор диаметром в первые метры и высотой, возможно, не более 1,0–1,5 м, так и вторич-

ный момент дополнительного пучения примерно 3,5–2,8 тыс. лет назад, когда из первично небольшого бугра образовался палъз высотой более 3 м и диаметром более 45 м, охвативший окружавшее его ранее обводненное понижение, в котором еще 2,8 тыс. лет назад шло накопление торфа, приостановившееся после пучения.

Бугристые торфяники в долине реки Уса развивались в несколько этапов. Бугры высотой 3,5–5,0 м сформировались 7–6 тыс. лет назад. Высота, на которую поднялась в то время поверхность торфяников, составила 2,25–4,00 м.

Бугры меньших размеров образовались 3,5–2,0 тыс. лет назад. Высота, на которую вспучилась поверхность бугров, составила 0,35 м.

Исследования стабильных изотопов углерода в верхней части молодых бугров пучения для изучения их динамики

Совсем недавно для изучения динамики молодых бугров пучения стали использовать исследования стабильных изотопов углерода в самой верхней их части [17]. Эти исследования основаны на том, что значения $\delta^{13}\text{C}$ в бугристых массивах Северной Швеции варьируют в тундровых растениях в основном от -20% в олиготрофных мхах до -29% в эвтрофных осоках.

На изотопный состав углерода оказывают влияние анаэробные или аэробные условия в пределах палъза, что связано с обводненностью массива и с состоянием торфа (мерзлым или талым). Распределение в торфе значений $\delta^{13}\text{C}$ по глубине в пределах исследованных палъза и понижений между ними отразило нарушение режима болотного массива 670–150 лет назад, обводнение территории и частичное разрушение бугров пучения, что может быть связано с изменениями не столько климата, сколько локальных гидрологических условий [17].

Распределение значений $\delta^{13}\text{C}$ в торфе на болотах Сторфлакет и Стордален в Северной Швеции

Распределение значений $\delta^{13}\text{C}$ в торфе на двух болотах в Северной Швеции было использовано для того, чтобы выявить изменения условий в процессе развития этих болот.

Профиль $\delta^{13}\text{C}$ в торфе ненарушенного болота в Сторфлакет показал очень низкую степень деградации торфа или ее отсутствие в обводненных понижениях и повышенные скорости анаэробного разложения торфа на участке Стордален. Последний факт К. Алевель с соавторами [17] объясняют разрушением мерзлого ядра бугров пучения и последовательным оползанием и погружением торфа в понижения в результате потепления климата.

Распределение изотопных значений в пределах бугров показывает переход от аэробной минерализации к анаэробной деградации торфа на глубине от 4 до 25 см. Радиоуглеродный (^{14}C) возраст этого перехода составляет 150–670 лет, и он не связан с антропогенным потеплением климата. Наиболее вероятным объяснением здесь является



пучение и формирование бугров. Различия в распределении значений $\delta^{13}\text{C}$ торфа в понижениях могут быть связаны с потеплением климата или с изменением гидрологического режима, а в пределах бугров — с микро-геоморфологическими изменениями в результате пучения [17].

В 6 из 8 исследованных бугров пучения было выявлено схожее распределение значений $\delta^{13}\text{C}$: их повышение лишь до определенной отметки (например, от -29% в приповерхностном торфе до $-25,5\%$ в торфе на глубине 5–25 см), а затем облегчение изотопного состава с дальнейшим увеличением глубины. Величина пика составляет в целом 3,2–4,0%. Подобный эффект наблюдается в профиле сухих почв, в которых аэробное разложение способствует избирательной потере ^{12}C . Значения $\delta^{13}\text{C}$ в более глубоких горизонтах бугров пучения больше соответствуют значениям для обводненных понижений. Таким образом, полученный изотопный пик фиксирует переход от анаэробных условий развития бугров к аэробным, т.е. поднятие поверхности над уровнем грунтовых вод в результате пучения. Датирование этого перехода дало возраст от 155 лет на глубине 4 см в болоте Стордален до 670 лет на глубине 25 см в болоте Сторфлаклет. Это говорит о том, что эти события имеют не региональный, а локальный масштаб в различные отрезки времени при равномерной скорости накопления торфа 0,3 и 0,6 мм/год соответственно [17].

Если учитывать изменение растительного покрова при этом переходе, то это объясняет все изменения изотопного состава в профилях бугров пучения, т.к. вариации значений $\delta^{13}\text{C}$ растительности на буграх и в понижениях составляют от $-24,6$ до $-29,2\%$ соответственно. Поэтому повышение значений $\delta^{13}\text{C}$ в профиле бугров может отражать смену растительного покрова [17].

Изменения значений $\delta^{13}\text{C}$ в торфе бугров могут указывать также на смену гидрологических условий. Высокий уровень воды приводит к обогащению растений $\delta^{13}\text{C}$. Было подсчитано, что влажный торф может характеризоваться значениями $\delta^{13}\text{C}$ на 4‰ более высокими, чем сухой [17].

Распределение значений $\delta^{13}\text{C}$ в понижениях близко к ранее полученным профилям для обводненных почв. В болоте Сторфлаклет это распределение более однородно (значения $\delta^{13}\text{C}$ варьируют от $-25,5$ до -27%), что указывает на очень низкую скорость разложения торфа. Уровень воды здесь ближе к поверхности торфа на буграх, чем на болоте Стордален, что подразумевает анаэробные условия и метаногенез.

Также здесь не отмечено существенного протаивания многолетнемерзлых пород и деградации бугров. Распределение значений $\delta^{13}\text{C}$ в понижениях в Стордален показывает облегчение изотопного состава торфа с глубиной (например, $\delta^{13}\text{C}$ изменяется от -24 до -28%), что типично для разложения в анаэробных условиях. Как полагают К. Алефель с соавторами [17], это связано с протаиванием бугров пучения и оползанием с них торфа в межбугровые понижения. Поступление торфа в пониже-

ния усиливает процессы деградации. Кроме того, дополнительным фактором является большая обводненность понижений, что еще более ограничивает поступление кислорода на этих участках [17].

Рассмотренные работы позволили с высокой степенью детальности зафиксировать различия во времени формирования бугров и еще раз подчеркнули значение локальных факторов в динамике палъза.

Циклическое развитие палъза

Некоторые бугры развиваются циклически: поверхностная термокарстовая переработка ранее сформировавшихся бугров приводит к абразии и проседанию части из них, а последующий дренаж массива завершается формированием молодых бугров (новообразований), которые наредко наблюдались, например, на севере Канады [24] и Скандинавии [28].

Выводы

1. Выпуклые миграционные бугры пучения на торфяниках (палъза) встречаются на Европейском Севере как в районах сплошного распространения многолетнемерзлых пород, так и в южных районах криолитозоны, где многолетнемерзлые породы распространены прерывисто или спорадически.
2. Южный предел распространения миграционных бугров пучения на Европейском Севере совпадает с южной границей распространения многолетнемерзлых грунтов: на Кольском п-ове, это примерно $67^{\circ}50'$ с.ш., на полуострове Канин — около 67° с.ш., в Ненецком округе — южнее $67^{\circ}10'$ с.ш., в Большеземельской тундре — южнее $66^{\circ}20'$ с.ш.
3. Ареал миграционных бугров пучения в северной части Европейского Севера далеко заходит в зону низкотемпературных многолетнемерзлых пород со сплошным распространением с поверхности и достигает $68^{\circ}10'$ с.ш. в Ненецком автономном округе и $67^{\circ}30'$ – $68^{\circ}00'$ с.ш. в Большеземельской тундре.
4. В оптимум голоцена даже в пределах южной части криолитозоны многолетнемерзлые породы не всегда деградировали, а напротив, могли начать формироваться новые бугры пучения. Основным фактором такого на первый взгляд геокриологического парадокса было интенсивное накопление торфа вследствие высоких летних температур и сохранение, а местами и ужесточение суровости зим в период оптимума голоцена.
5. Некоторые бугры развиваются циклически: поверхностная термокарстовая переработка ранее сформировавшихся бугров приводит к абразии и проседанию части из них, а последующий дренаж массива завершается формированием новых бугров. ❄

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 10-05-00986 и 11-05-01141) и Федерального агентства по науке и инновациям (госконтракт 02.740.11.0337).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев В.Н., Дедов А.А., Самбук Ф.В. Оленьи пастбища северного края. Архангельск: Изд-во Севкрайгосторга, 1931. С. 50–63.
2. Бобов Н.Г. Современное образование многолетнемерзлых бугров пучения на Лено-Вилноискм междуречье // Известия АН СССР. Сер. Географическая. 1960. № 5. С. 64–68.
3. Васильчук Ю.К. Об особенностях формирования бугров пучения на севере Западной Сибири в голоцене // Природные условия Западной Сибири. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983. С. 88–103.
4. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А. и др. Радиоуглеродные датировки и голоценовая динамика бугров пучения в долине р. Усы // Доклады Российской академии наук. 2002. Т. 384. № 3. С. 395–401.
5. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Чижова Ю.Н. Выпуклые бугры пучения многолетнемерзлых торфяных массивов / под ред. действительного члена РАЕН, профессора Ю.К. Васильчука. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. 571 с.
6. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Сулержицкий Л.Д. и др. Радиоуглеродная хронология бугров пучения Большеземельской тундры // Доклады Российской академии наук. 2003. Т. 393. № 1. С. 101–105.
7. 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.
8. Горбунов А.П. Вечная мерзлота Тянь-Шаня. Фрунзе: Илим, 1967. 166 с.
9. Городков Б.Н. Вечная мерзлота в северном крае // Труды Совета по изучению производительных сил. Сер. Северная. Вып. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1932. 108 с.
10. Евсеев В.П. Закономерности распределения миграционных бугров пучения в Европейской части СССР и Западной Сибири // Проблемы криолитологии. 1976. № 5. С. 95–159.
11. Елина Г.А., Арсланов Х.А., Климанов В.А., Усова Л.И. Растительность и климатохронология голоцена Ловозерской равнины Кольского полуострова (по спорово-пыльцевым диаграммам бугристо-топяного болота) // Ботанический журнал. 1995. Т. 80. № 3. С. 1–16.
12. Кац Н.Я. Типы болот СССР и Западной Европы и их географическое распространение. М.: Гос. изд-во географической литературы, 1948. 318 с.
13. Лаврова М.А. О нахождении вечной мерзлоты в районе Волчьей и Монгоче тундр на Кольском полуострове // Труды комиссии по изучению вечной мерзлоты АН СССР. Л.: Изд-во АН СССР, 1934. Т. 3. С. 117–120.
14. Попов А.И. Вечная мерзлота в Западной Сибири. М.: Изд-во АН СССР, 1953. 230 с.
15. Сумгин М.И. К вопросу о вечной мерзлоте в торфяных буграх на Кольском полуострове // Труды комиссии по изучению вечной мерзлоты АН СССР. Л.: Изд-во АН СССР, 1934. Т. 3. С. 107–115.
16. Åkerman H.J. Observations of palsas within the continuous permafrost zone in eastern Siberia and in Svalbard // Geografisk Tidsskrift. 1982. № 82. P. 45–51.
17. Alewell C., Giesler R., Klaminder J. et al. Stable carbon isotopes as indicators for micro-geomorphic changes in palsa peats // Biogeosciences Discussions. 2011. V. 8. P. 527–548.
18. Alexanderson H., Adrielsson L., Hjort C, et al. Depositional history of the North Taymyr ice-marginal zone. Syberia — a landsystem approach // Journal of Quaternary Science. 2002. V. 17. № 4. P. 361–382.
19. Barcan V.Sh. Stability of palsa at the southern margin of its distribution on the Kola Peninsula // Polar Science. 2010. V. 4. Iss. 3. P. 489–495.
20. Brown R.J.E. Permafrost — distribution and relation to environmental factors in the Hudson Bay Lowland analyzed // Proceedings of the Symposium on the physical environment of the Hudson Bay Lowland, Ontario, 30–31 Marth 1973. Ontario: University of Guelph, 1973. P. 35–68.
21. Collhoun E.A. Periglacial landforms and deposits of Tasmania // South African Journal of Science. 2002. V. 98. P. 55–63.
22. Kihlman A.O. Pflanzenbiologische studien aus Russich Lappland. Ein beitrag zur kenntniss der regionalen gliederung an der polaren waldgrenze // Acta Societatis pro Fauna et Flora Fennica. 1890. V. 6. № 3. 264 s.
23. Krull E.S. Permian palsa mires as paleoenvironmental proxies // PALAIOS. 1999. V. 14. P. 530–544.
24. Lewkowicz A.G., Coultish T.L. Beaver damming and palsa dynamics in a subarctic mountainous environment. Wolf Creek, Yukon Territory, Canada // Arctic, Antarctic, and Alpine Research. 2004. V. 36. № 2. P. 208–218.
25. Oksanen P.O. Development of the palsa mires on the Northern European Continent in relation to Holocene climatic and environmental changes / Academic Dissertation to be presented with the assent of the Faculty of Science of University of Oulu for public discussion in Keckmaninsali, Linnanmaa, on November 19th, 2005. Oulu: the Department of Biology of the Faculty of Science of University of Oulu, 2005. 50 p.
26. Oksanen P.O., Kuhry P., Alekseeva R.N., Kanev V.V. Permafrost dynamics at the Rogovaya River peat plateau, subarctic Russia / Proceedings of the Seventh International Conference on Permafrost. Yellowknife, Canada, 1998. Collection Nordicana № 55. P. 847–854.
27. Salonen J.S., Seppa H., Valiranta M., et al. The Holocene thermal maximum and late-Holocene cooling in the tundra of NE European Russia // Quaternary Research. 2011. V. 75. Iss. 4. P. 100–111.
28. Seppälä M. Synthesis of studies of palsa formation underlining the importance of local environmental and physical characteristics // Quaternary Research. 2011. V. 75. P. 366–370.
29. Välliranta M., Kaakinen A., Kuhry P. et al. Scattered late-glacial and early Holocene tree populations as dispersal nuclei for forest development in north-eastern European Russia // Journal of Biogeography. 2010. V. 38. Iss. 5. P. 922–932.
30. Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C. The ¹⁴C age of palsas in Northern Eurasia // Radiocarbon. 1998. V. 40. № 2. P. 895–904.
31. Washburn A.L. Palsas and continuous permafrost / Proceedings of the Fourth International Conference on Permafrost, Fairbanks, Alaska, United States, July 17–22, 1983; ed. by Pewe T.L., Brown J. Fairbanks, 1983. Washington, D.C.: National Academy Press, 1983. P. 1372–1377.
32. Zhu C., Cui Z., Xiong H. An analysis of periglacio-geomorphic processes on Fildes Peninsula, King George Island, Antarctica // Antarctic Research (Chinese ed.). 1991. V. 3. № 3. P. 25–37.