

МИГРАЦИОННЫЕ БУГРЫ ПУЧЕНИЯ НА СЕВЕРЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ: ЮЖНЫЙ И СЕВЕРНЫЙ ПРЕДЕЛЫ АРЕАЛА И СОВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА PALSAS IN THE NORTH OF WESTERN SIBERIA: THE SOUTHERN AND NORTHERN LIMITS OF THE AREAL AND THE MODERN DYNAMICS

ВАСИЛЬЧУК Ю.К.

Профессор географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, д.г.-м.н., действительный член Российской академии естественных наук, vasilch@geol.msu.ru

ВАСИЛЬЧУК А.К.

Старший научный сотрудник географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, д.г.н.

БУДАНЦЕВА Н.А.

Старший научный сотрудник географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, к.г.н.

ЧИЖОВА Ю.Н.

Старший научный сотрудник географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, к.г.н.

VASILCHUK Yu.K.

A professor of the Faculty of Geography of Lomonosov Moscow State University, doctor of science (Geology and Mineralogy), member of the Russian Academy of Natural Sciences, vasilch@geol.msu.ru

VASILCHUK A.K.

A senior staff scientist of the geography faculty of Lomonosov Moscow State University, doctor of science (Geography)

BUDANTSEVA N.A.

A senior staff scientist of the geography faculty of Lomonosov Moscow State University, PhD (Geography)

CHIZHOVA Ju.N.

A senior staff scientist of the geography faculty of Lomonosov Moscow State University, PhD (Geography)

Ключевые слова:

миграционные бугры пучения; Западная Сибирь; Северная Азия; Северная Америка.

Key words:

palsa; Western Siberia; Northern Asia; North America.

Аннотация

В статье показаны геокриологические опасности, проявляющиеся при проложении магистральных трубопроводов через массивы выпуклых бугров пучения (пальза). Дан обзор результатов исследования и датировки по ^{14}C миграционных бугров пучения на многолетнемерзлых торфяных массивах Западной Сибири. Рассмотрены южный и северный пределы их ареала и их современная динамика в данном регионе.

Введение

Морозное (криогенное) пучение согласно СП 11-105-97 определяется как процесс, вызванный промерзанием грунта, миграцией влаги, образованием ледяных прослоев, деформацией скелета, приводящими к увеличению объема грунта, поднятию дневной поверхности. Пучинистость — одно из наиболее широко распространенных явлений в криолитозоне и даже вне ее в пределах территорий сезонного промерзания, где она часто связана с сегрегационным льдовыделением в деятельном слое зимой. В связи с этим можно говорить о почти повсеместном в пределах России развитии сегрегационного льдообразования и, следовательно, повсеместном проявлении процесса пучения.

Интенсивность пучения связана с количеством влаги, мигрировавшей в зону промерзания, и скоростью промерзания. Особенно заметно пучение проявляется при длительном периоде медленного снижения температуры (при отрицательных температурах не ниже $-0,3\div-0,5$ °C), достаточного для формирования кристаллов льда, которые повышают объем замерзающей воды, а следовательно, и грунта на 9–11%, отрицательных температурах поверхности грунта в осенне-зимний период, присутствию влаги, особенно гравитационной, в промерзающих породах и, разумеется, при наличии пучинистых грунтов. Сочетание этих факторов характерно для северной части Западно-Сибирской низменности, поэтому распространение бугров пучения (пальза) в этом регионе является весьма широким (рис. 1, 2).

Abstract

Geocryological hazards for pipe lines in palsa areas are shown. The results of investigations and ^{14}C -dating of palsas on permafrost peat massives in the north of Western Siberia are reviewed. The southern and northern limits of their areal and their modern dynamics in this region are considered.



Сосредоточение месторождений нефти и газа в северных районах Сибири обуславливает необходимость строительства надежных трубопроводов в неблагоприятных грунтовых условиях. Большая протяженность этих линейных объектов ведет к тому, что они неизбежно пересекают участки с различными мерзлотно-грунтовыми условиями, в т.ч. и области развития бугров пучения. На севере Западной Сибири примерно 25% трубопроводов приходится на участки с палъза, а грунты с пучинистыми свойствами встречаются более чем на 60% площади, отводимой под строительство трубопроводов [7].

При образовании палъза значение неравномерности площадного пучения возрастает с 3–4 до 30–40% и более. При этом многолетние бугры пучения являются одной из самых распространенных форм мерзлотного рельефа. Поэтому при выборе трасс трубопроводов необходимо учитывать особенности процесса пучения в целом и особенности палъза в частности.

Влияние пучения на строительство и эксплуатацию трубопроводов

Строительство и эксплуатация магистральных трубопроводов в пределах криолитозоны приводят к трансформации геокриологических процессов, развивающихся как в зонах непосредственного взаимодействия с ними, так и на прилегающих к ним территориях. Возникает сложное механическое и тепловое взаимодействие собственно трубопроводов с геологической и гидрогеологической средой на многолетнемерзлых грунтах и заболоченных территориях. Часто происходит нарушение динамического равновесия, сопровождающееся активизацией опасных природных процессов с их негативным влиянием на техническое состояние трубопроводов, нередко приводящим к аварийным ситуациям.

Особенно подвержены процессам пучения газопроводы, которые относятся к теплым (со средней температурой газа $T_{cp} > 0$ °C) и холодным ($T_{cp} < 0$ °C) трубопроводам. Это, например, подтвердил крупномасштабный натурный эксперимент, поставленный совместно французскими и канадскими исследователями в Каннах (Франция). Он включал изучение промерзания грунта вокруг специально созданного холодного трубопровода, который пересекал два вида грунта, один из которых (каннская глина) был сильнопучинистым. В течение всего периода эксперимента, который длился 358 дней, происходили промерзание и пучение грунта. Уже через три месяца мощность слоя каннской глины увеличилась на 10%, а через год — на 18–27%. В результате этого в экспериментальном трубопроводе возникли опасные напряжения на границе между пучинистым и непучинистым грунтами [7].

При перекачке холодного газа промерзанию подвергаются и изначально талые, и многолетнемерзлые грунты, что также приводит к неблагоприятным воздействиям на трубопровод. Например, трубопровод Бованенково — Байдарацкая Губа — Ухта проходит по многолетнемерзлым грунтам с температурой минус 6–7 °C. Водонасыщенность грунтов доходит до 80%, льдистость составляет 15–30%. Помимо мест с буграми пучения трасса пересекает участки с пластовыми



Рис. 1. Палъза у пос. Корылькы (фото Е.Н. Оспенникова)



Рис. 2. Палъза у г. Ноябрьска (фото Ф. Танненбергер)

залежами льда и криопэгами, а также большое число рек и ручьев, впадающих в Карское море. Поскольку газ по полуострову планируется транспортировать охлажденным до отрицательных температур, большую сложность представляет обеспечение устойчивости положения «холодного» газопровода в таликах, а также при пересечении им русел рек. Очевидно, что при отрицательной температуре газа начнется процесс промерзания грунтов, который будет сопровождаться процессами пучения.

На западносибирских газопроводах, функционирующих уже десятки лет, отмечаются участки со сформировавшимися вдоль них ледяными телами, которые сдвигают трубопроводы с проектного положения, несмотря на пригрузки. Такая ситуация наблюдается, например, на газопроводе Ямбург — Ныда, где участков с образовавшимися буграми насчитывается более 600.

На газопроводе Надым — Пунга вдольтрассовое формирование бугров пучения также привело к нарушению положения трубопровода. В долине реки Пунга вблизи подножия палъза (рис. 3), где проходит газопровод, в течение 7 лет его эксплуатации образовалась чаша оттаивания глубиной около 6 м. Кровля многолетнемерзлых пород как в пределах бугра пучения, так и на окружающем его участке расположена на глубине

0,3 м. Под торфом вскрыто чередование суглинков, песков и глин. Суммарная влажность (W_c) торфа на вершине бугра — 45%, подстилающих минеральных грунтов — от 30 до 80% (максимальные значения характерны для глин, минимальные — для песков).

В грунтах у подножия бугра и на некотором расстоянии от него (см. скв. 2, 6 на рис. 3) отмечен несколько другой характер распределения влажности. Вблизи бугра ее максимальные значения (80%) отмечены в суглинке. Влажность грунтов, вскрытых скважиной 6, — не более 30%. Правильное расположение трубопровода в данном случае не привело к отклонению от проектного положения на второй год эксплуатации.

По результатам мониторинга, выполнявшегося Ю.Л. Шуром, В.Л. Невечерей, Н.Г. Москаленко [17] и О.Е. Пономаревой [19] в разные годы, установлено, что на этом же газопроводе за 24 года (с 1980 по 2004 г.) вдоль трубопровода произошел общий подъем поверх-

ности в среднем на 18 см по сравнению с положением на 1980 г.

Наблюдения по профилю «14 км» (рис. 4) показали, что в развитии поверхности можно выделить 3 этапа: (1) 1972–1974 гг. — период просадки поверхности, наступивший после строительства; (2) 1975–1991 гг. — период медленного подъема поверхности; (3) с 1992 г. — период стабилизации. В течение первого периода просадки поверхности составили в среднем 104 см. Максимальная просадка была равна 134 см, минимальная — 70 см (см. рис. 4). Медленное пучение в течение второго периода привело к подъему поверхности в среднем на 29 см, который не компенсировал произошедшую ранее осадку. В течение третьего периода подъем поверхности составил в среднем 21 см, однако компенсации первоначальной просадки так и не произошло. К настоящему времени максимальная просадка поверхности относительно ее положения в 1971 г.

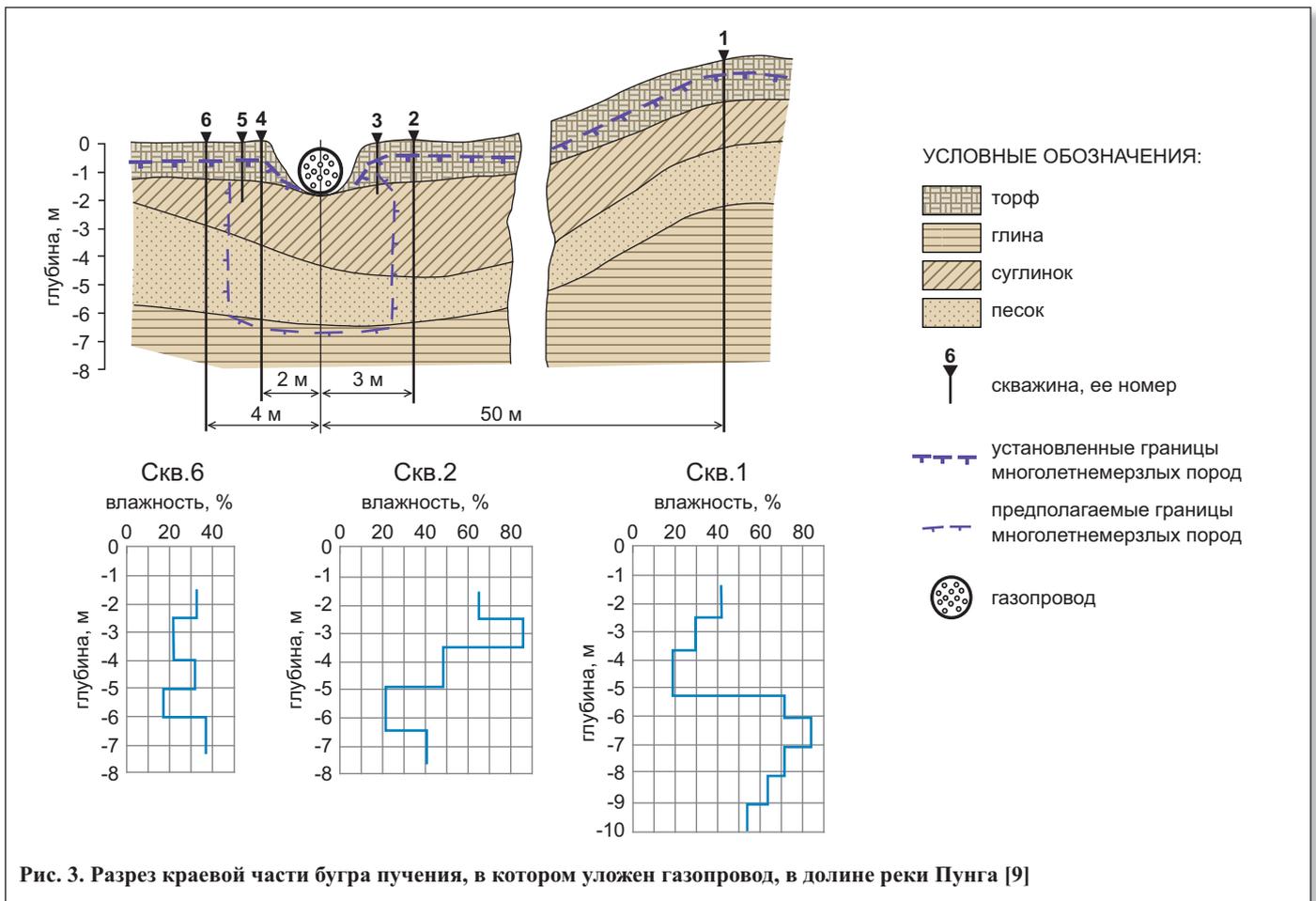


Рис. 3. Разрез краевой части бугра пучения, в котором уложен газопровод, в долине реки Пунга [9]

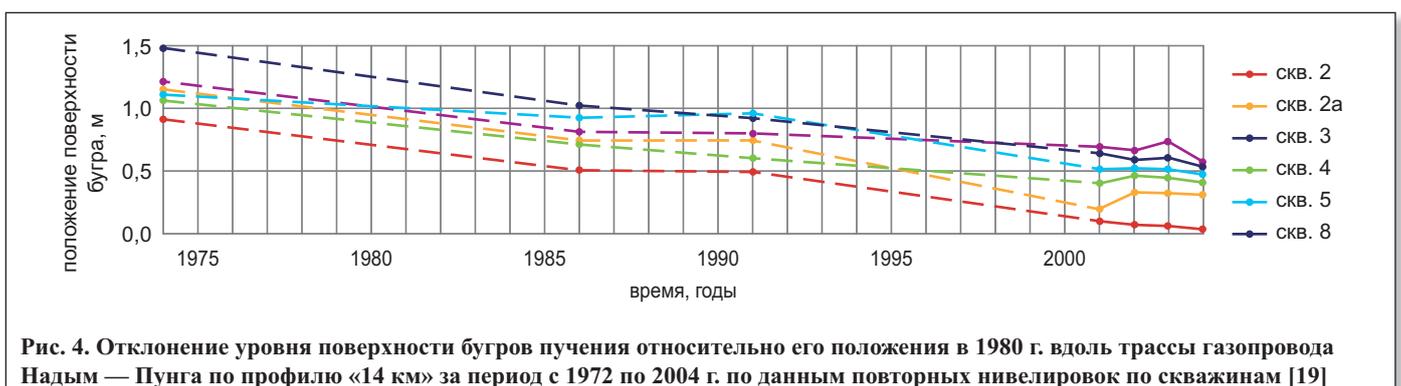


Рис. 4. Отклонение уровня поверхности бугров пучения относительно его положения в 1980 г. вдоль трассы газопровода Надым — Пунга по профилю «14 км» за период с 1972 по 2004 г. по данным повторных нивелировок по скважинам [19]



составляет 75 см у скважины 5, а минимальная — 27 см у скважины 2а [19].

За 32 года со времени укладки трубопровода поверхность испытала проседание, подъем, стабилизацию, оставаясь ниже исходного уровня в среднем на 54 см. Интенсивность просадок убывает по мере удаления от трубопровода, но не достигает нулевых значений даже на расстоянии 50 м от его оси. На ненарушенных участках близ профилей 1–1 и «14 км» наблюдается рост бугорков пучения, возникших 3 и 30 лет назад. Их максимальная высота достигла 75 см.

Мониторинг поверхности бугров пучения вдоль трассы газопровода Надым — Пунга показал, что в современных условиях северной тайги в Западной Сибири на участках с высокотемпературными многолетнемерзлыми породами, несмотря на потепление климата и снятие растительного покрова, продолжается рост уже существующих бугров пучения на участках, окруженных обводненными ложбинами стока. Зафиксировано образование новых бугров на ненарушенных территориях.

В этом же районе в условиях отсутствия обводненных ложбин происходит частичная деградация бугров пучения, на которых растительный покров был уничтожен в процессе строительства газопровода. Максимальная осадка на деградирующих буграх происходила в течение первых двух лет после строительства и составила более 1 м. По мере зарастания поверхности просевшие участки постепенно начали подниматься, но за 32 года их отметки так и не достигли прежних значений. В 2005 г. после замены трубы и отсыпки новой насыпи профиль приобрел иной характер и в дальнейшем, по прогнозу Н.Г. Москаленко и др. [17], здесь

можно ожидать активизации просадок, которые вскоре вновь сменятся пучением.

В этом районе были проведены исследования изменений бугристого рельефа на основании повторного картографирования его форм по аэрофотоснимкам разных лет и данным наземных маршрутных работ, проводимых с интервалом 3–5 лет. Сравнение двух разновременных карт, 1970 и 2005 гг., по Надымскому стационару с использованием аэроснимков разных лет показало лишь незначительное изменение общей площади массивов пальза с кедрово-лиственничными багульниково-лишайниковыми рединами на торфяно-подзолистых почвах. Сравнение контуров участков, занятых пальза, не дало оснований говорить о сокращении их площади даже в приконтактной с газопроводом зоне. При этом здесь же, на нарушенных болотных массивах, к 1988 г., через 18 лет после сооружения газопровода, кое-где появились небольшие бугры и участки пучения высотой до 1 м [17, 19].

Укажем и на такой потенциально опасный процесс, как образование бугров пучения на дне морей при охлаждающем влиянии газопроводов. Необходимо особо подчеркнуть, что промерзающие под действием охлаждающей газовой трубы первоначально талые донные отложения, например, на Балтике, практически по всем показателям идентичны современным мерзлым донным грунтам Баренцева и Печорского морей. Известно, что на Печорском шельфе на глубинах до 50–70 м обнаруживаются гидроакколиты с ледяными ядрами вблизи донной поверхности. На сейсмо- и эхogramмах они похожи на конусообразные холмы высотой от 3–5 до 12 м и шириной в основании до 120–140 м. Расстояние между ними — 300–400 м. В Карском море (на Русановской площади) такие же холмы встречены



Рис. 5. Подтопление трассы «горячего» трубопровода при ее прохождении через массив многолетнемерзлых выпуклых бугров пучения (пальза) в лесотундровой зоне Западной Сибири (Пур-Тазовское междуречье, близ р. Туймылькы (фото из архива ОАО «ВНИИСТ»))



Рис. 6. Подтопление трассы «горячего» трубопровода при прохождении массива многолетнемерзлых выпуклых бугров пучения в лесотундровой зоне Западной Сибири (Пур-Тазовское междуречье, близ р. Айваседа-Пур). Вдоль трассы наблюдаются как непротаявшие, так и протаявшие бугры (фото из архива ОАО «ВНИИСТ»)

на глубинах 80–150 м. По мнению В.П. Мельникова и В.И. Спесивцева [16], эти холмы — следствие современных криогенных процессов пучения водонасыщенного грунта, промерзающего в субквальных условиях. Такие же холмы высотой до 30 м на дне моря Бофорта,

приуроченные к глубинам не более 70 м, по мнению исследовавших их Дж. Шерера с соавторами [26], также являются результатом пучения.

«Горячие» трубопроводы при их прокладке через области развития пальза таже подвергаются трансфор-

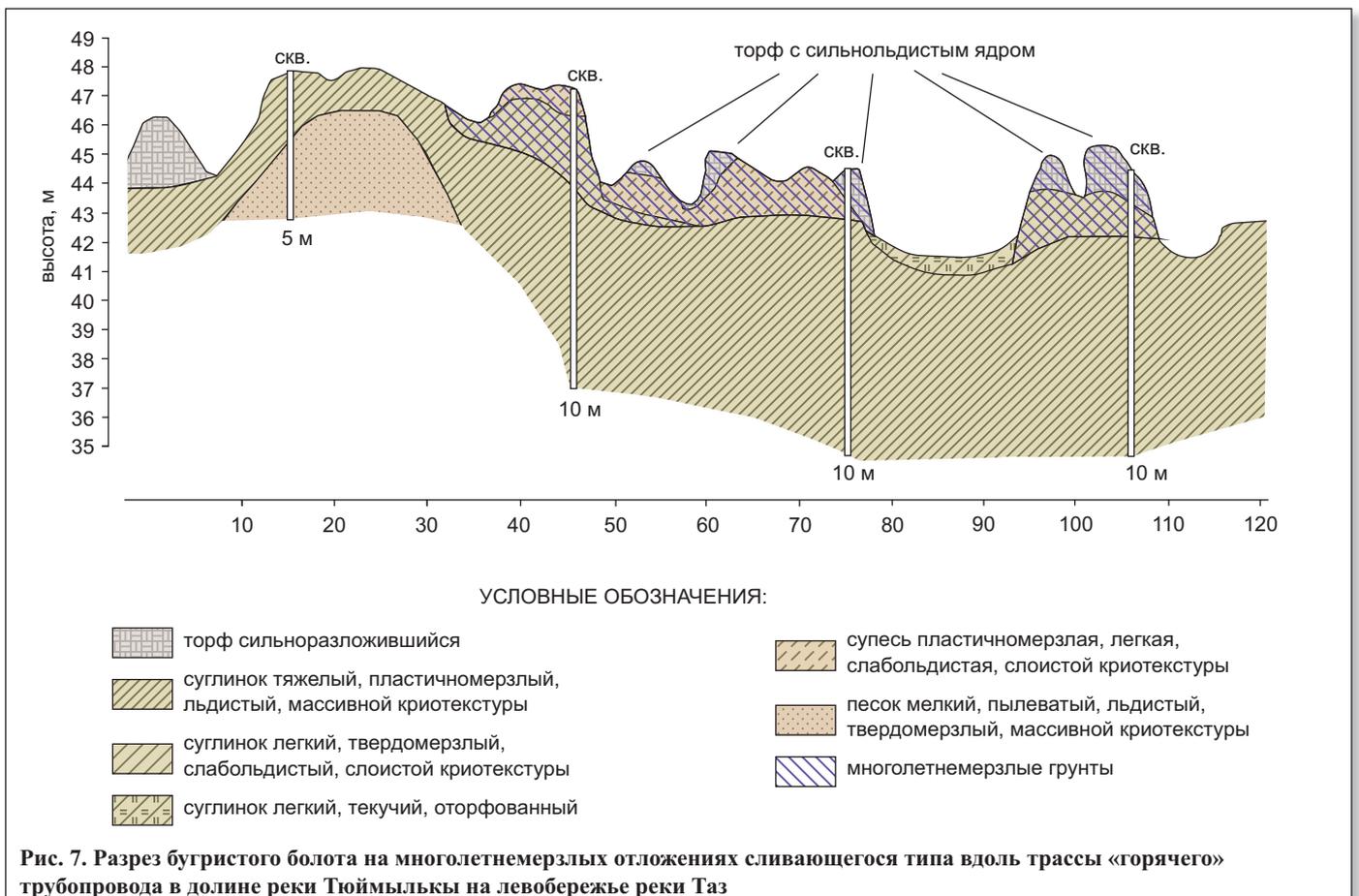


Рис. 7. Разрез бугристого болота на многолетнемерзлых отложениях сливающегося типа вдоль трассы «горячего» трубопровода в долине реки Туймылькы на левобережье реки Таз



мациям под воздействием изменений, связанных с протаиванием бугров и площадей пучения (рис. 5–9). В данном случае основная проблема состоит не в росте бугров и пучении, а в их неравномерном протаивании.

Процессы пучения сказываются на состоянии «горячего» нефтепровода в нескольких аспектах. Поскольку сам трубопровод имеет высокую температуру, процесс пучения в непосредственной близости от него практически не проявляется (он проявляется только в исключительных случаях, зимой, если грунты обратной засыпки являются сильнопучинистыми). Однако по мере удаления от нефтепровода сначала наблюдается протаивание отдельных бугров пучения, а далее — формирование новых (см. рис. 5, 6).

При протаивании сильнольдистых ядер бугров и площадей пучения образовавшаяся вода стекает к нефтепроводу и приводит к подтоплению его трассы. Неравномерность изменения земной поверхности в результате сезонного пучения грунтов с выраженными пучинистыми свойствами, а также формирование сезонных и многолетних бугров пучения ведут к перераспределению стока талых вод во время снеготаяния. Это также приводит к подтоплению трассы, несмотря на меры по регулировке стока, поскольку его направление изменяется.

Типичный участок перехода нефтепровода через область развития бугров пучения характеризуется активизацией деструктурирующих мерзлотных процессов (термокарста, солифлюкции, термоэрозии). Их следствием являются просадка протаивающих грунтов, всплывание отдельных участков трубопроводов, обводнение и заболачивание трассы трубопровода (см. рис. 7).



Рис. 8. Проявления термокарста вдоль трассы «горячего» нефтепровода. Термокарстовые воронки, отмеченные на месте протаявших бугров пучения, маркируют боковую границу ореола протаивания вдоль трассы (лесотундровая зона Западной Сибири, Пур-Тазовское междуречье близ реки Айваседа-Пур) (фото из архива ОАО «ВНИИСТ»)

Особенно важно, что в зонах прерывистого распространения многолетнемерзлых пород бугры и площади пучения чередуются с понижениями, сложенными тальными грунтами. Так, в пределах массивов единичных бугров или групп бугров, имеющих линейный размер от 25 до 150 м (см. рис. 8), возникает опасность неконтролируемого изменения изгиба трубопровода: при протаивании льдистых участков небольшого размера вдоль «горячего» трубопровода возникает его неравномерное провисание, которое приводит к его переходу

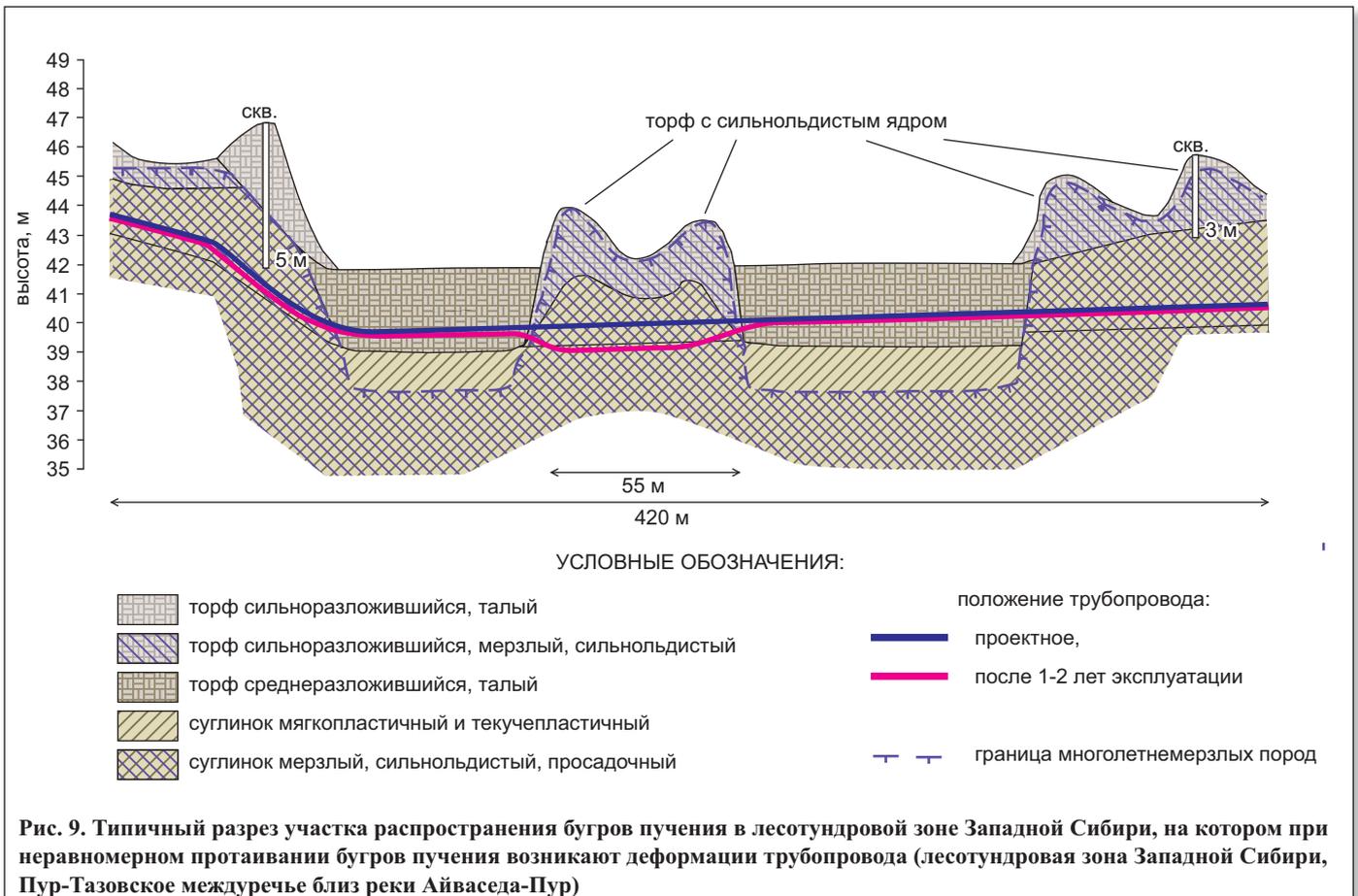


Рис. 9. Типичный разрез участка распространения бугров пучения в лесотундровой зоне Западной Сибири, на котором при неравномерном протаивании бугров пучения возникают деформации трубопровода (лесотундровая зона Западной Сибири, Пур-Тазовское междуречье близ реки Айваседа-Пур)

в напряженное состояние (см. рис. 9). Это связано с тем, что грунты мерзлого массива играют роль несущего основания, в то время как талые грунты пониженный обладают слабыми несущими свойствами.

При недостаточной термоизоляции и в отсутствие сезонных охлаждающих устройств «горячий» нефтепровод с температурой нефти от 20–50 °С вызывает растепление сильнольдистых грунтов и просадку согласно натурным наблюдениям на подземных участках трубопроводов, проложенных для перекачки нефти с Ванкорского месторождения, которые пересекают участки развития бугров пучения в пределах зоны островного распространения многолетнемерзлых пород. Показательно, что именно на участках развития палея происходит наибольшее снижение температуры перекачиваемого продукта, что свидетельствует о значительных теплопотерях. Преобладающая температура многолетнемерзлых грунтов здесь составляет от 0 до минус 0,5 °С. Многолетнемерзлые породы (ММП) приурочены почти исключительно к торфяникам и водонасыщенным песчано-глинистым грунтам. Криогенное строение ММП характеризуется в основном массивной криогенной текстурой. Супеси и суглинки в ядрах бугров пучения имеют слоистую и слоисто-сетчатую криогенную текстуру. Суммарная влажность пылеватых и мелких песков составляет 11–30%. Суммарная влажность песков средней крупности равна 18–25%. Лыдистость суглинков и супесей составляет от 0,09–0,14 д.ед. для слабольдистых до 0,20–0,35 д.ед. для лыдистых в ядрах бугров пучения. Торф здесь сильнольдистый и очень сильнольдистый (имеет лыдистость более 0,4). Суммарная влажность торфа колеблется в пределах 100–600%. Преобладают атакситовые, порфириовидные и массивные криогенные текстуры. По температурному режиму в соответствии с таблицей Б30 ГОСТ 25100-95 песчаные грунты относятся к твердомерзлым, глинистые — к пластичномерзлым.

При инженерных изысканиях под магистральные трубопроводы бугристые болота часто изучаются недостаточно, хотя и в рамках нормативных документов. Для того чтобы адекватно оценить, как будут взаимодействовать ландшафты бугристых болот с «горячим» трубопроводом, и определить его опти-

мальное расположение, необходимы опережающие геофизические изыскания, которые позволят проанализировать локализацию сильнольдистых ядер бугров пучения и провести последующие инженерно-геологические изыскания с подробным изучением многолетнемерзлых участков.

Важно, что при деградации мерзлых пород пучиноопасность грунтов усиливается. Так, по данным Д.Д. Шестернева [24], на 60% территории Читино-Ингодинской впадины грунты из категории пучинистых перешли в категорию сильнопучинистых и чрезмернопучинистых, если сравнивать свойства грунтов в периоды до начала потепления климата (1890–1960 гг.) и во время него (1960–2002 гг.). Максимальные изменения пучиноопасности грунтов произошли там, где суглинистые породы сезонного оттаивания перешли в сезонномерзлые породы в связи с формированием мерзлых толщ несливающегося типа или полным оттаиванием многолетнемерзлых пород.

Среди характеристик бугров пучения для строительства линейных объектов особенно значимы: (1) распространение (южный и северный пределы ареала); (2) лыдистость; (3) динамика роста; (4) цикличность роста и протаивания.

Южный предел распространения палея

Приобье

В южных районах криолитозоны с температурой грунта до минус 0,5 °С бугры пучения были исследованы Ю.К. Васильчуком в июле 1976 г. в районе поселка Азовы (64°53' с.ш., 65°03' в.д.) — на поверхности первой надпойменной террасы в низовьях реки Обь. Было пробурено более десятка 10-метровых скважин с отбором кернов и температурными измерениями [5, 6]. Здесь были описаны весьма крупные бугры высотой до 7–8 м, покрытые мощным слоем торфа, с поверхности поросшие редкостойным лесом (березово-кедровым, с полярной ивой и карликовой березой в кустарниковом ярусе) с почти повсеместно развитой мощной, более 10 см, подушкой из сфагнового мха.

Климатические особенности данного района характеризуются довольно холодными зимами (в среднем

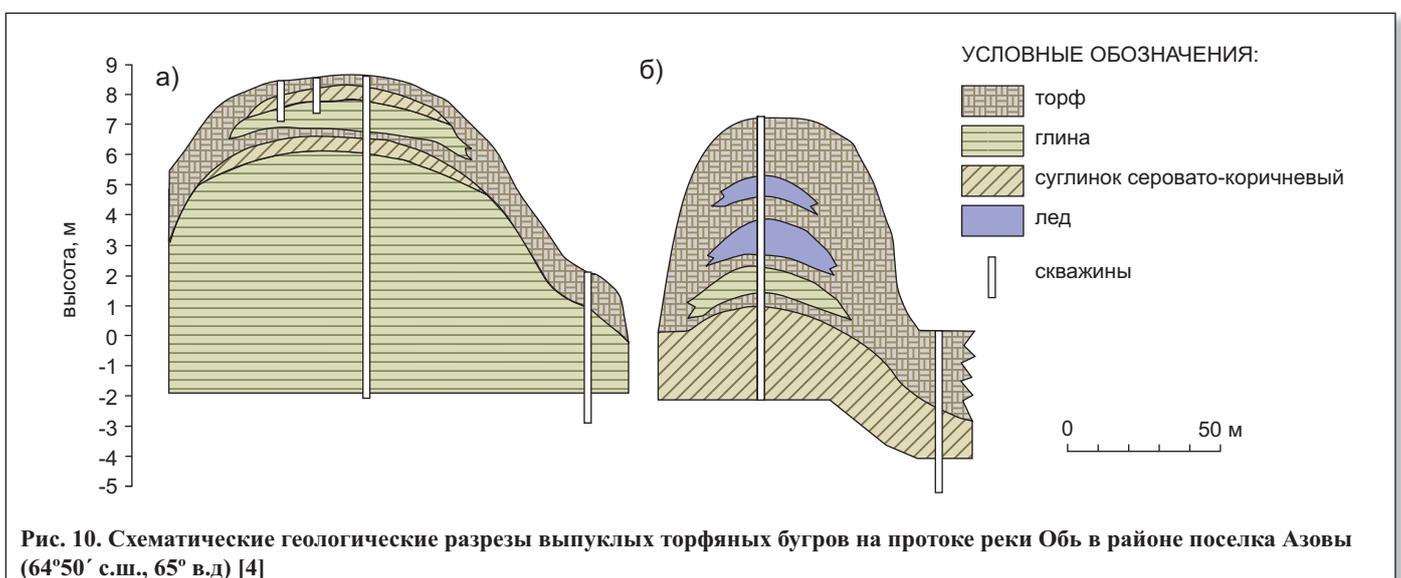


Рис. 10. Схематические геологические разрезы выпуклых торфяных бугров на протоке реки Обь в районе поселка Азовы (64°50' с.ш., 65° в.д.) [4]



ниже минус 22 °С в январе) и сравнительно теплым летом (выше 14 °С в июле). Среднегодовая температура воздуха, по данным метеостанции поселка Мужы, составляет минус 5,1 °С.

Все изученные в этом районе бугры пучения перекрыты с поверхности торфом разной мощности — от 1,4 до 4,4 м, при этом максимальная мощность превышает 5,5 м. Мощность торфа в межбугровых понижениях обычно превышает 3,5 м. В некоторых скважинах и обнажениях в нижней части толщи торфа встречены стволы деревьев и шишки. В интервале 5,50–5,84 м встречен древесно-торфяной горизонт со стволами деревьев диаметром до 12 см, которые иногда расколоты льдом на щепки (в древесине имеются ледяные шлиры).

В подстилающих глинах и суглинках встречаются слои погребенного торфа. В разрезе бугра пучения высотой 7 м и диаметром 100 м (рис. 10, а) сверху вниз вскрываются: до глубины 0,38 м — торф темно-коричневый талый; ниже — мерзлые породы. Торф подстилается суглинком коричневато-серым и глиной светло-серой. Ниже в разрезе отмечается погребенный слой торфа черного, хорошо разложившегося, который подстилается суглинком темно-коричневым, сильно оторфованным. В основании разреза — глина светло-серая, тяжелая, толщина ледяных шлиров в которой достигает 10–13 см (расстояние между ними изменяется от 4–5 до 11–13 см).

В разрезе рядом расположенного бугра с поверхности вскрыт относительно мощный слой темно-коричневого торфа, мерзлого, начиная с глубины 0,25 м, ниже которого скважиной вскрыт слой чистого крупнокристаллического льда мощностью 0,6 м (рис. 10, б). Лед располагается на контакте вышеописанного торфа и глины светло-серой с сетчатой криотекстурой [5].

В разрезе детально исследованного крупного бугра пучения в урочище Пугор-4 на глубине 1,8–2,0 м обнаружен погребенный торф в пределах суглинистого горизонта, представленного чередованием легких и тяжелых суглинков. Это указывает скорее всего на протаивание и проседание бугра и последующее возобновление роста. Его высота составляет 4,5 м, размеры в плане — 80×100 м. На вершине бугра мощность торфа не превышает 0,5 м. Льдистость как поверхностного, так и погребенного торфа невысока (20%), криотекстура массивная. Льдистость суглинков варьирует от 20 до 50%, при этом ее наибольшая величина отмечена в горизонтах тяжелых суглинков, для которых характерны линзовидная и среднешлировая криотекстуры. В нижней части суглинистого горизонта отмечена сетчатая криотекстура с мощностью шлиров 2–3 см и размером ячеек сетки 6×8 см. Более низкие значения льдистости (20–30%) получены для горизонтов легких опесчаненных суглинков, несмотря на то что они нередко имеют базальную криотекстуру (рис. 11). Льдистое ядро бугра находится в горизонте глины, вскрытого с глубины 3 м. Льдистость здесь возрастает до 60–80%, криотекстура крупносетчатая, крупношлировая, слоистая и крупнослоистая, мощность шлиров льда увеличивается сверху вниз от 4 до 13 см, расстояние между ними — 6–7 см.

В интервалах глубин 4,0–4,1, 6,2–6,6 и 9,0–9,3 м встречены прослой ледогрунта, представленные льдом с прослоями глины. В 60 м к юго-востоку на склоне этого бугра, имеющего вид плоской террасы, бурение показало несколько иное строение разреза. Мощность торфа здесь достигла 1,4 м, что скорее всего свидетель-

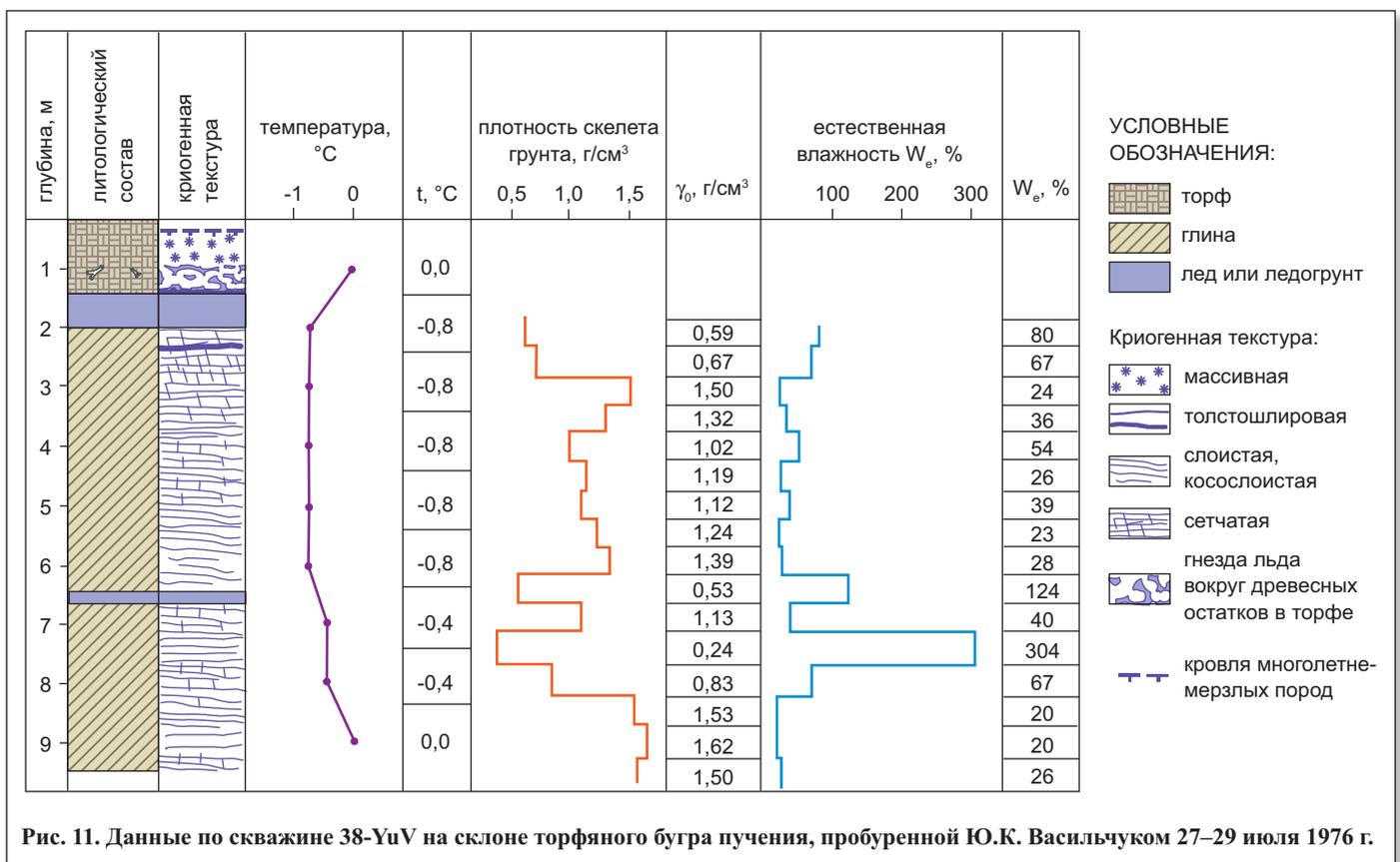


Рис. 11. Данные по скважине 38-YuV на склоне торфяного бугра пучения, пробуренной Ю.К. Васильчуком 27–29 июля 1976 г.

ствуется о сносе торфа с вершины в краевые части бугра. Льдистость торфа в этой части бугра оказалась более высокой, чем в вершинной. Лед в виде гнезд располагался вокруг древесных остатков. Кроме того, в придонной части был вскрыт слой льда мощностью 12 см.

Слой льда мощностью 60 см встречен и на контакте торфа с подстилающей его глиной. Криогенное строение глины отличалось преобладанием сетчатой и неполносетчатой криотекстур в отличие от глины в вершинной части бугра, для которой были характерны слоистая и шлировая криотекстуры. Толщина слоев льда варьировала от 0,5 до 5 см, размер ячеек сетки — от 2 до 10–12 см. При этом с увеличением мощности слоев льда отмечалось увеличение размера ячеек сетки.

Льдистость глины с сетчатой криотекстурой без учета слоев льда не превышала 40%. С учетом шлиров льда она достигала 60–70%.

В интервале глубин 6,0–8,3 м встречена толстошлировая криотекстура, представленная шлирами льда мощностью 10–12 см, разделенными прослоями грунта такой же мощности. Здесь также встречен горизонт ледогрунта мощностью 17 см. Льдистость глины в этом интервале возрастает до 80%.

Сравнение криогенного строения бугра пучения в его вершинной и краевой частях демонстрирует неравномерное распределение льдистости по разрезу, особенно в краевой части (рис. 12). Также можно отметить более глубокое залегание льдонасыщенного слоя, представляющего собой ядро бугра пучения.

Отметим, что в ядре бугра пучения температура наиболее низкая ($-1\text{ }^{\circ}\text{C}$), мерзлые породы распространены до глубины 7 м, а ниже залегают талые грунты.

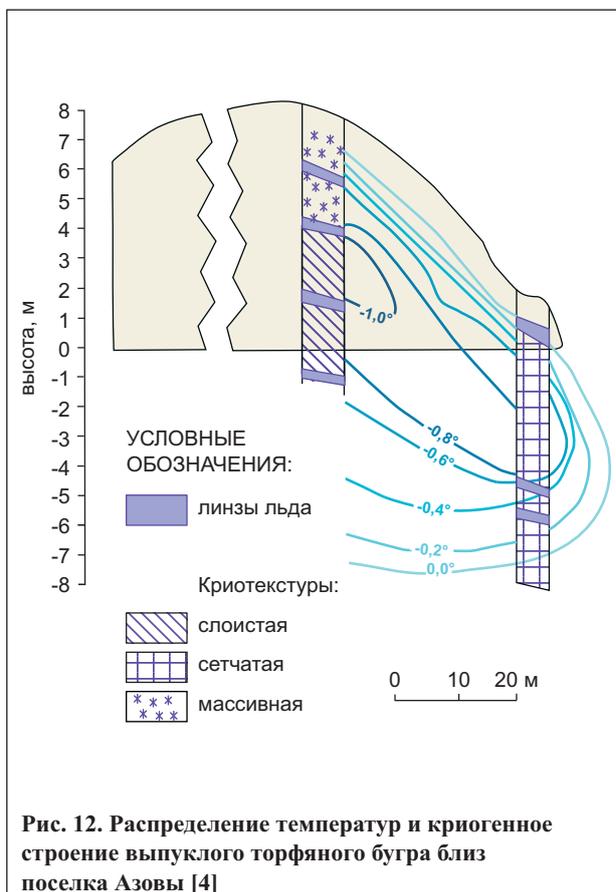


Рис. 12. Распределение температур и криогенное строение выпуклого торфяного бугра близ поселка Азовы [4]

Бугристые торфяники здесь находятся в состоянии динамического равновесия, при этом в одних местах идет частичная деградация палыза, в других бугры развиваются, причем даже незначительное похолодание может вызвать их быстрый рост.

На многолетнемерзлые породы в долине р. Обь существенно влияет водный режим, особенно в зоне затопления в пойме и на первой террасе, поэтому южная граница распространения бугров пучения на низких элементах рельефа здесь располагается несколько севернее, чем на высоких террасах и водораздельных равнинах.

Юг Западной Сибири: **широтное течение р. Оби и Приуралье**

Миграционные бугры пучения в южной тайге Западной Сибири описывали Ю.А. Львов [15] (в 150 км южнее поселка Средний Васюган), А.Е. Березин [2] (в долине реки Ягыл-Ях на Васюганской равнине), Е.Я. Мульдьяров [18], Т.А. Бляхарчук [25] (у поселка Ягодное южнее реки Кеть). Р.С. Ильин [11] отмечал криогенные формы рельефа в северной части Васюганской равнины, А.Г. Дюкарев и Н.Н. Пологова [10] — в долине правого притока реки Костиha в Томской области.

Самый южный из известных миграционных бугор пучения изучен А.Г. Дюкаревым и Н.Н. Пологовой [10] в Бакчарском районе Томской области ($57^{\circ}04'$ с.ш., $82^{\circ}26'$ в. д.) — в нижней части склона к долине правого притока р. Костиha. Повышение овальной формы с двумя вершинами высотой до 2 м, вытянутое вдоль склона, отличается по наземному покрову и микро-рельефу от окружающего леса (рис. 13). Поверхность этого бугра пучения неровная, в центральной части формируется воронкообразное понижение. По краю палыза сохранились крупные (до 36 см в диаметре) деревья кедра и ели 200–240-летнего возраста, наклоненные в сторону от бугра (эффект «пьяного леса»). В его середине взрослых деревьев нет, отмечаются только отдельные молодые кедры высотой до 6 м, возраст которых составляет 40–60 лет. С поверхности палыза залегает торф мощностью 40–45 см, подстилаемый органико-аккумулятивно-гумусовой почвой с хорошо развитым гумусовым горизонтом мощностью до 50 см. Почвы здесь, как и почвы окружающего леса, легкие глинистые, развитые на карбонатных глинах. Этот миграционный бугор пучения, вероятно, находится в фазе распада, признаком чего являются воронкообразное понижение на его вершине и мочажины в краевой части. Его возраст оценивается в 300–400 лет, активная деградация началась 30–40 лет назад.

Похожие торфяные бугры исследовали Т.А. Бляхарчук и Л.Д. Сулержицкий [25] на болоте Бугристое ($58^{\circ}15'$ с.ш., $85^{\circ}20'$ в.д., абс. высота 130 м) в междуречье рек Кеть и Чулым в Томской области на юго-востоке Западно-Сибирской равнины. Среднегодовая температура воздуха по данным расположенной рядом метеостанции Колпашево ($58^{\circ}20'$ с.ш., $82^{\circ}59'$ в.д.) составляет минус $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Болото расположено около заполненной песком ложбины стока послеледникового озера. Здесь на песчаных почвах произрастает лес. Бугор пучения овальной формы расположен на участке преимущественно олиготрофной растительности. Он сложен мерзлым торфом и образует выпуклый остров в



немерзлом торфе болота. Поверхность бугра покрыта высоким сосновым лесом с карликовыми кустарниками, среди которых развиты круглые термокарстовые впадины с влажными сфагновыми сообществами. В результате термокарстовых процессов стволы сосен наклонены в разных направлениях (рис. 14).

Датирование торфяных прослоев и изучение разреза показали, что промерзание болота и начало роста палза началось 4300 лет назад, о чем свидетельствует смена типа торфа на глубине 160–90 см. Данный болотный массив является экстразональным, т.к. болота такого типа распространены на 400 км севернее. Поскольку он расположен на южном пределе распространения многолетнемерзлых пород, климатические изменения заметно отражаются на состоянии палза. В настоящее время здесь активизировались термокарстовые процессы, которые приводят к протаиванию бугров пучения, образованию округлых понижений на поверхности болота и формированию «пьяного леса».

Южное местонахождение бугров пучения на болоте Бугристое близ поселка Белый Яр и в Бакчарском районе западнее поселка Асино дает основание для существенного смещения границы многолетнемерзлых пород на юг по сравнению с проводившейся ранее [1, 8, 20]. Эта граница, по представлению авторов, пересекает долину р. Обь южнее поселка Колпашево, а долину реки Чулым — севернее поселка Асино. Далее на восток она выходит на Чулымскую равнину южнее поселка Белый Яр.

В Приуралье примерно на тех же широтах (но все же чуть севернее) Г.И. Дубиков и Л.М. Шмелев [9] в начале 70-х гг. XX в. провели детальные мерзлотные исследования в бассейнах рек Малая Сосьва, Пунга, Сыскосынья, Пелым. Основными причинами развития бугров пучения в этих районах, по мнению Г.И. Дубикова и Л.М. Шмелева [9], является сочетание природных условий, главными из которых являются:

- отрицательная многолетняя среднегодовая температура воздуха (–2,6; –3,2; –2,7; –2,4; –1,8 °С в поселках Игрим, Октябрьское, Сартынья, Хонгокурт и Шухтуркурт соответственно);
- глинистый и торфяной состав и большая увлажненность грунтов верхнего горизонта;
- темнохвойные густые леса, затеняющие поверхность грунта и снижающие (примерно на 2–4 °С) температуру поверхности до температуры приземного слоя воздуха;

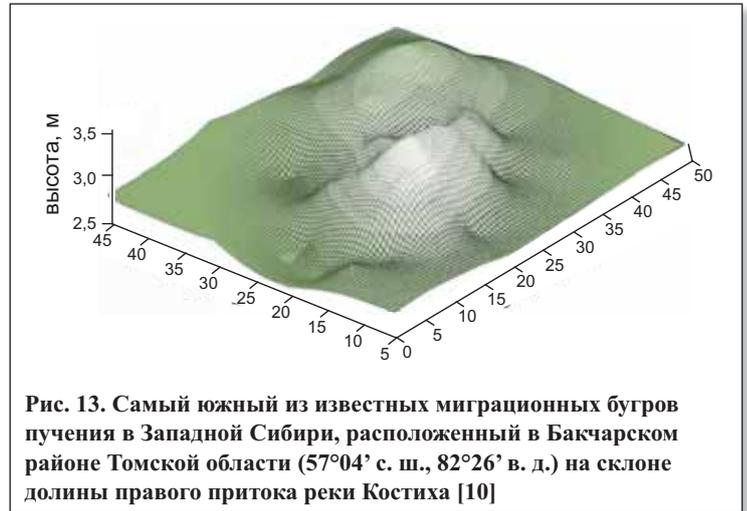


Рис. 13. Самый южный из известных миграционных бугров пучения в Западной Сибири, расположенный в Бакчарском районе Томской области (57°04' с. ш., 82°26' в. д.) на склоне долины правого притока реки Костиха [10]

- мохово-лишайниковый напочвенный покров мощностью до 30 см, охлаждающий грунт в темнохвойном лесу на 2 °С.

Бугры пучения в пределах высокой поймы рек Колы-Хулом и Малая Сосьва в районе их слияния (рис. 15, а), характеризовались высотой от 1,5 до 3,0 м. Они сложены влажным (с суммарной влажностью 50–60%) торфом мощностью от 1,5 до 4,5 м, подстилаемым глинами и суглинками.

Высота бугров, исследованных на первой надпойменной террасе реки Пунга (рис. 15, б), варьировала от 1,0 до 2,5 м. Мощность перекрывающего их торфа, как правило, составляла около 1,0 м. Подстилающие его породы — суглинки с линзами песков. Некоторые бугры полностью сложены минеральным грунтом. Суммарная влажность торфа — около 65%, суглинка — 45–50%.

На высокой пойме реки Пелым (60°29' с.ш., 62°40' в.д.) встречены как крупные бугры пучения, так и площадь пучения диаметром 300 м (рис. 15, в). Высота пучинистых форм здесь составляет 1,0–1,5 м, мощность торфа достигает 4–5 м, его суммарная влажность варьирует от 50 до 120%. Многолетнемерзлые породы встречены только в пределах исследуемых бугров, их температура не ниже минус 0,5°С.

Полученные Г.И. Дубиковым и Л.М. Шмелевым [9] сведения позволили провести южную границу распространения бугров пучения в этом районе значительно южнее, чем она ранее проводилась другими исследователями — Л.Ф. Куницыным [14], Е.Б. Белопуховой

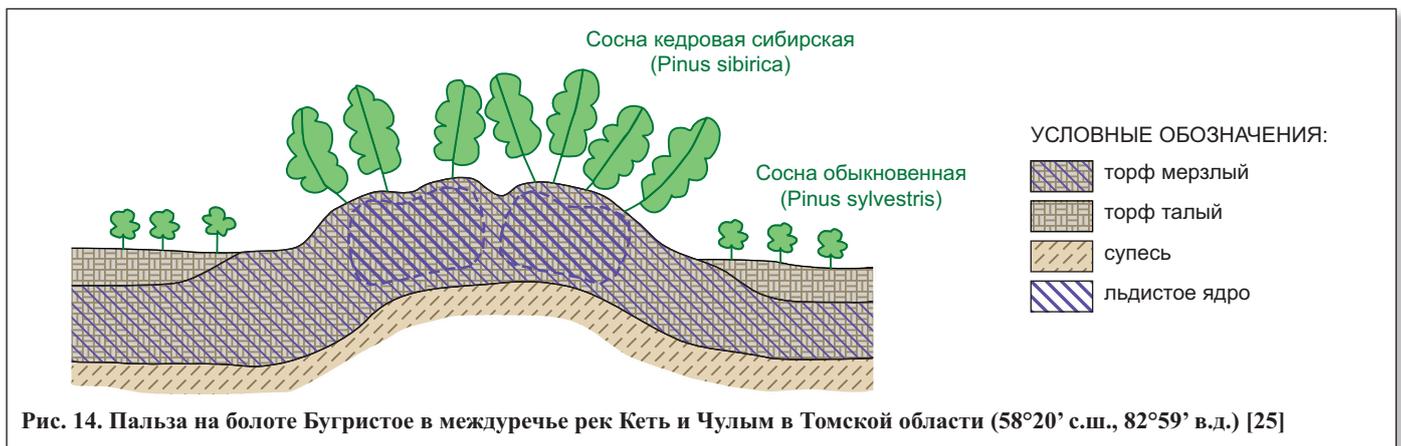


Рис. 14. Палза на болоте Бугристое в междуречье рек Кеть и Чулым в Томской области (58°20' с.ш., 82°59' в.д.) [25]

[1], А.И. Поповым [20]. Она проведена от района поселка Полуночное, пересекает верховья реки Пелым, истоки рек Конда и Малая Сосьва и выходит к р. Обь немного севернее поселка Октябрьское.

Таким образом, выявились две крупные области со спорадическим и редкоостровным распространением многолетнемерзлых пород на широте 57–60° с.ш., которые ранее [8, 20] считались тальми. Индикаторами

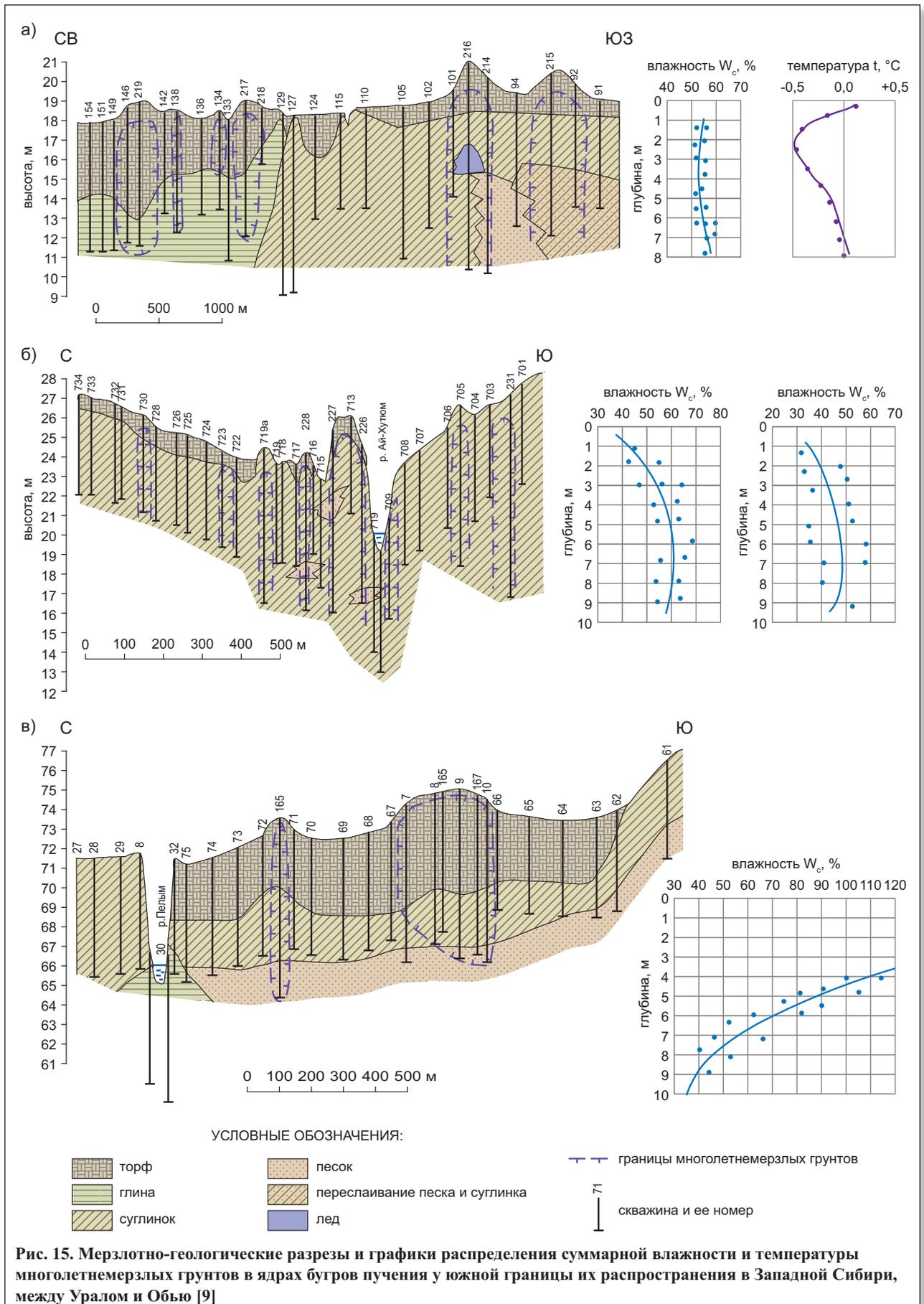


Рис. 15. Мерзлотно-геологические разрезы и графики распределения суммарной влажности и температуры многолетнемерзлых грунтов в ядрах бугров пучения у южной границы их распространения в Западной Сибири, между Уралом и Обью [9]



многолетнемерзлых пород в этих областях являются миграционные бугры пучения, существующие 2–5 и более лет.

Северный предел распространения пальза

Полуостров Ямал

Считалось [1, 20], что в Западной Сибири миграционные бугры пучения в основном распространены в диапазоне среднегодовых температур грунта от 0 — минус 0,5 °С до минус 3 °С. Однако авторами настоящей статьи и другими исследователями на Ямале, на Тазовском полуострове и в низовьях р. Енисея встречены бугры типа пальза, имеющие температуру ниже минус 3–4 °С.

Бугры пучения (предположительно сегрегационные) в парагенезе с повторно-жильными льдами изучались В.Ф. Болиховским [3] в верховьях бассейна реки Сабьяха на северо-восточном склоне возвышенности Хой (на Манорском участке). По данным ближайшей метеостанции в поселке Мыс Каменный среднегодовая температура воздуха здесь составляет минус 9,4 °С, средняя температура января — минус 24,4 °С, июля — плюс 8,1 °С. Обнаженный бугор пучения высотой 5 м располагается в термокарстовой котловине — хасырее, на перемычке между двумя остаточными озерами. Среднегодовая температура отложений бугра пучения на глубине 8–9 м равна минус 5,2 °С. Термический минимум массива составляет минус 7,4 °С на глубине 7 м [3].

Грунты, слагающие бугор пучения, рассечены повторно-жильными льдами. Корни ледяных жил достигают уровня озерных вод или проникают несколько ниже его. Расстояние между жилами колеблется от 1,5 до 5,0 м. Различна также ширина жил. Наиболее широкие жилы (до 0,6 м) отмечены у поверхности центральной части бугра пучения и на его периферии, в промежутке между ними ширина повторно-жильных льдов в 2–3 раза меньше (рис. 16). Сходство химического и изотопного составов льда бугра пучения и вод окружающего его озера указывает на то, что источниками воды для льда бугра и для жил являются атмосферные осадки и воды озера и болота.

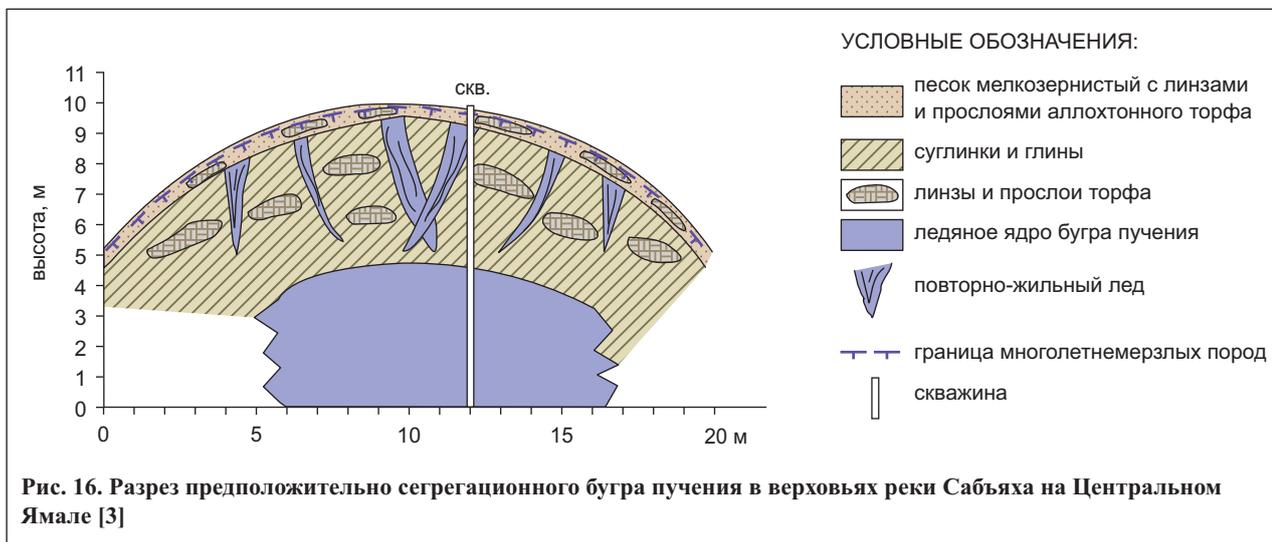
Второй бугор пучения находится в заболоченной термокарстовой котловине. Его относительная высота составляет 7–8 м, форма в плане — эллипсовидная. Наблюдаются как плавные, так и весьма крутые сопряжения торфяного покрова бугра пучения и заторфованного днища хасырея.

Бурение показало, что тело этого бугра состоит из ледяных и торфяных прослоев, которые чередуются следующим образом: 0,0–0,5 м — торф (сезонноталый слой); 0,5–3,4 м — лед; 3,4–3,8 м — торф; 3,8–4,8 м — лед; 4,8–5,0 м — торф; 5,0–7,5 м — лед; 7,5–8,0 м — торф. В интервале глубин 8,0–9,0 м — суглинок серый с небольшими прослоями песка и растительного детрита, находящийся в многолетнемерзлом состоянии. Торф — среднеразложившийся, высокольдистый, слоисто-сетчатой (реже линзовидной и атакситовой) криотекстурой. Лед в промежутке между торфяными прослоями прозрачный, содержит небольшое количество газовых пузырьков. Общая мощность торфяных прослоев в данном бугре пучения составляет 1,6 м, а чисто ледяных — 6,4 м. С учетом того что ниже сезонноталого слоя торфяные прослои находятся в многолетнемерзлом состоянии и распучены льдом, суммарная мощность этого торфа в талом виде должна быть меньше 1,6 м [3].

Расслоенность торфом ледяной линзы второго бугра пучения и малая прочность полуметрового слоя торфа над первым сверху пластом льда не позволяют, по мнению В.Ф. Болиховского [3], предполагать инъекционный механизм льдообразования для объяснения происхождения данного бугра, который скорее следует считать миграционным торфяным.

Принято считать, что в ядрах миграционных бугров пучения лед присутствует лишь в виде шпиль и линз. Результаты полевых исследований авторов настоящей статьи и обзора всех имеющихся криолитологических материалов свидетельствуют о том, что при сегрегационном типе льдообразования в ядрах пальза могут формироваться линзы и пласты льда мощностью до 1–3 м. Это заставляет по-иному оценивать торфяные бугры с ледяным ядром по генезису не как пинго, а как пальза.

Одним из таких пальза является тщательно разбуренный Ю.К. Васильчуком бугор в пойме реки Танловаяха (правого притока реки Щучья) на Южном Ямале



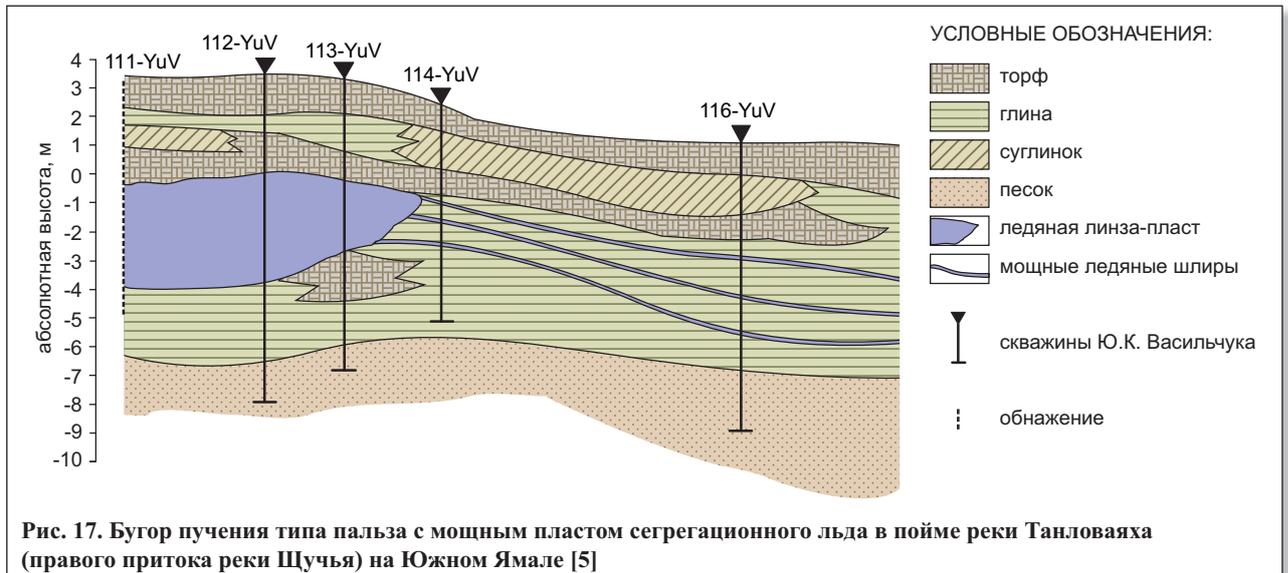


Рис. 17. Бугор пучения типа пальца с мощным пластом сегрегационного льда в пойме реки Танловаяха (правого притока реки Щучья) на Южном Ямале [5]

(рис. 17). В его теле наряду со шлирами отмечается линза чистого льда мощностью более 3 м. Сложение разреза периферийной части бугра простое: торф подстилается глиной и песком. Строение осевой части сложное: здесь наблюдается циклическая смена в разрезе пачек торфа, суглинка и глины. Обращает на себя внимание характер залегания мощных ледяных шлиров: они располагаются практически согласно поверхности бугра, что служит определенным подтверждением их сегрегационного происхождения. Наличие прослоев торфа в разрезе бугра указывает на возможность его неоднократного пучения и проседания в прошлом, а торфяной покров на поверхности говорит о его родственности с типичными пальца. Это позволяет полагать, что, несмотря на столь мощную ледяную линзу, исследованный бугор является пальца, хотя и несколько нетипичного сложения — с мощной ледяной линзой.

О распространении бугров пучения на территории, расположенной между городами Дудинка и Игарка и вдоль реки Хантайка, сообщали многие исследователи — Д.А. Драницын, Н.И. Кузнецов [13], Н.С. Шевелева и Л.С. Хомичевская [23], хотя некоторые ошибочно относили их к остаточным формам расчленения плоских торфяников.

Г.С. Константинова [13] исследовала бугры пучения в районе Большого Хантайского порога (рис. 18).

Среди бугров пучения ею были выделены торфяные и минеральные.

В Норильском районе В.Н. Сакс [21] описал группу торфяных бугров высотой до 6–7 м. Они сложены торфом до глубины 0,8 м, ниже — мерзлыми суглинками и супесями. Иногда они вытянуты в виде гряд, иногда имеют округлую форму, но всегда встречаются значительными группами, приуроченными к озерным и речным террасам. В.Н. Сакс относит такие площади к мелкобугристым ландшафтам и считает бугры «зарождающимися булгуньяхами», которые в настоящее время уже не могут возникать в тундровых районах вследствие небольшой мощности слоя сезонного протаивания.

Возраст бугра пучения типа пальца высотой 3 м в долине р. Енисей в окрестностях г. Игарки (67° с.ш., 86° в.д.) — между 7330 и 3900 лет (рис. 19, а). Две серии дат получены по двум буграм типа пальца высотой по 3 м [22], исследованным около г. Дудинки в низовьях р. Енисей (70° с.ш., 86° в.д.) — от 6800 до 5410 и от 7940 до 6170 лет (рис. 19, б, в).

Крупнобугристые болота Игарки и Дудинки относятся к одному географическому варианту, для которого характерно преобладание в растительном покрове бореальных и отчасти гипоарктических видов. Отличие игарских, более южных, болот от бугристых болот Дудинки — это их более бореальный характер: нали-

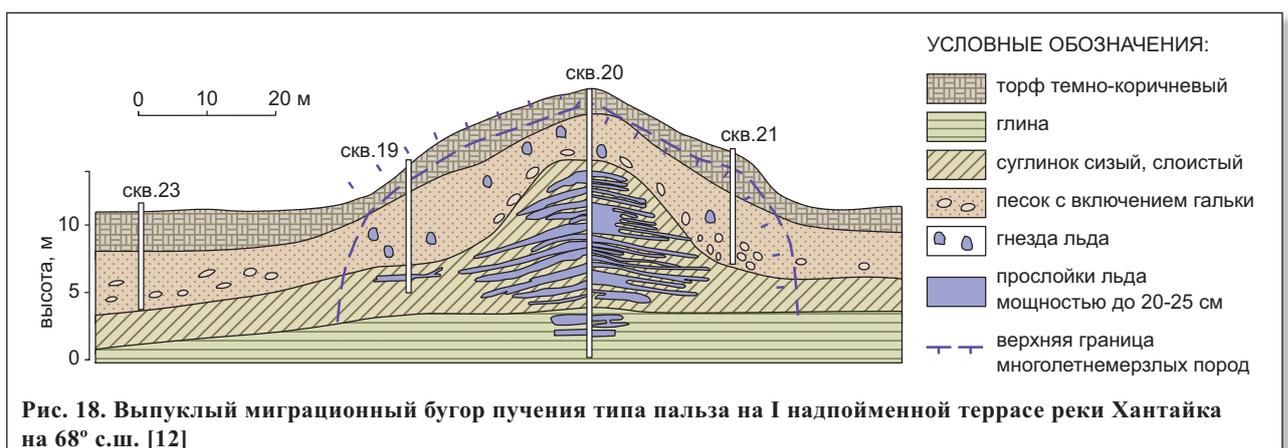
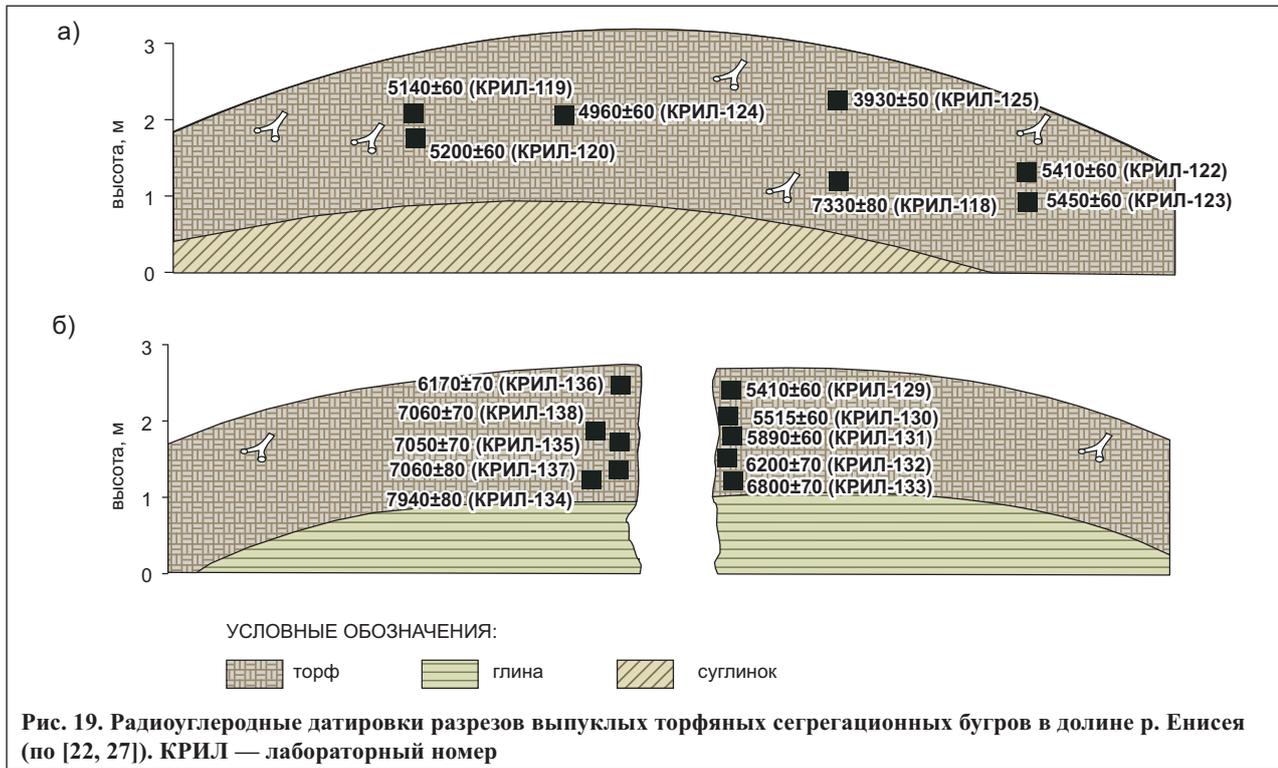


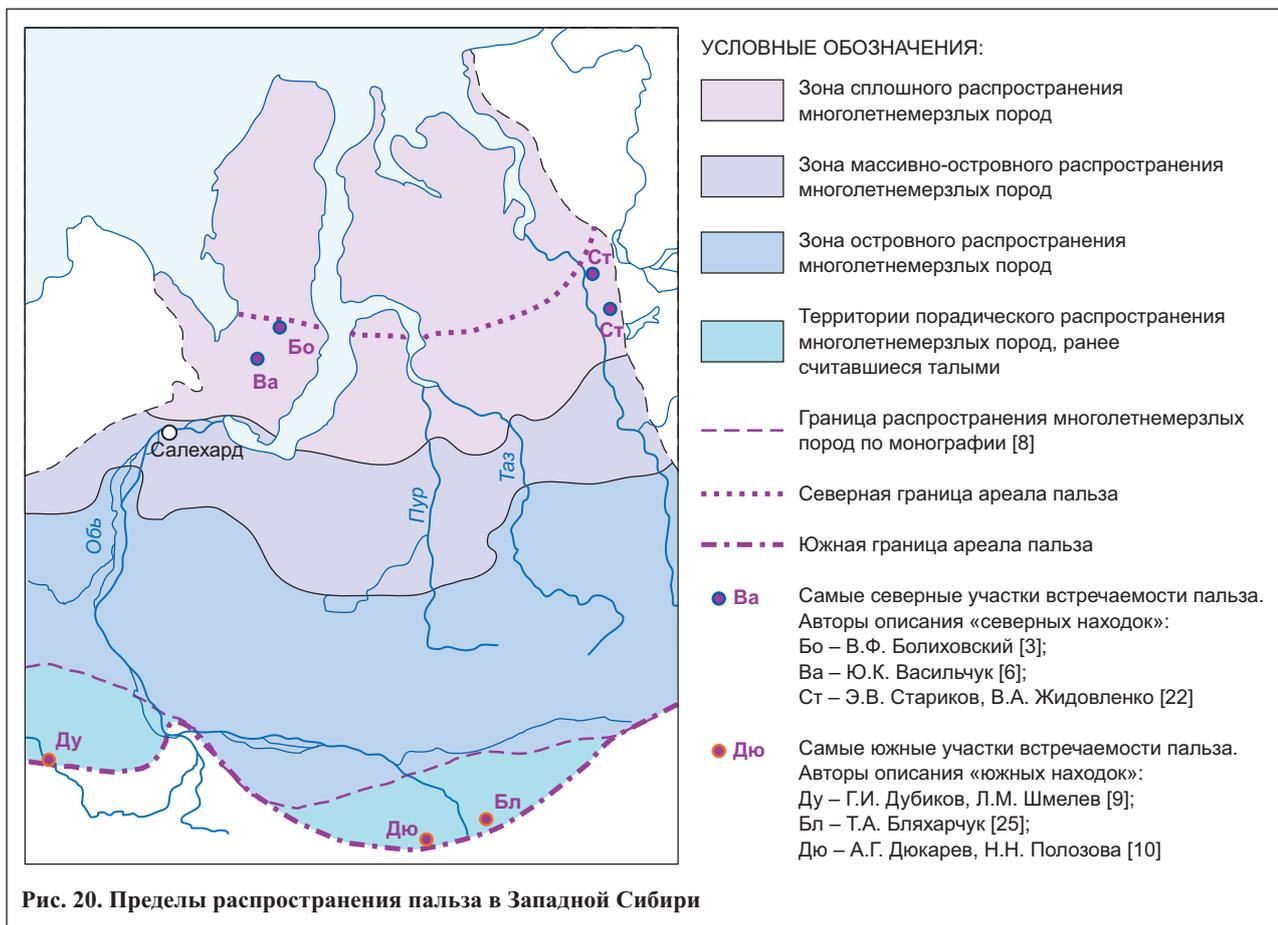
Рис. 18. Выпуклый миграционный бугор пучения типа пальца на I надпойменной террасе реки Хантайка на 68° с.ш. [12]



чие на буграх деревьев (бугры у Дудинки безлесны) и меньшая роль тундровых лишайников.

Наиболее часто встречается точка зрения об исключительной приуроченности палъза к южным районам криолитозоны, где многолетнемерзлые породы распространены прерывисто или спорадически. Между тем они нередко встречаются и в районах сплошного рас-

пространения многолетнемерзлых пород, практически всегда обнаруживаются в тех северных регионах, где есть торфяники, и обычно распространены в районах с продолжительными зимами и маломощным снежным покровом. Ареал палъза в северной части далеко заходит в зону низкотемпературных многолетнемерзлых пород со сплошным распространением с поверхности



и достигает 68° с.ш. на Ямале и Гыданском полуострове и 70° с.ш. в низовьях Енисея (рис. 20).

Выводы

1. Бугры пучения — одно из самых распространенных криогенных явлений в Западной Сибири благодаря климатическим и гидрологическим особенностям данной территории.

2. Южный предел ареала бугров пучения в Западной Сибири совпадает с южной границей распространения многолетнемерзлых грунтов и проходит на западе региона примерно по 60° с.ш., южнее широтного течения Оби — примерно по 60° с.ш., на востоке — примерно по 57° с.ш.

3. Ареал миграционных бугров пучения в северной части далеко заходит в зону низкотемпературных многолетнемерзлых пород со сплошным распространением с поверхности и достигает 68° с.ш. на Ямале и Гыданском полуострове и 70° с.ш. в низовьях Енисея.

4. Современное состояние палъза даже в пределах одного массива может быть как деградационным, так и стабильным, аградационным, пульсирующим. ❄

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 10-05-00986 и 11-05-01141) и федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2012–2013 годы (лот 2012-1.1-12-000-1008).

Список литературы

1. Белоухова Е.Б. Особенности распространения многолетнемерзлых пород Западной Сибири // Труды ПНИИИС. М.: Изд-во ПНИИИС, 1972. Т. 18. С. 94–99.
2. Березин А.Е. Болота бассейна Среднего и Верхнего Васюгана // Чтения памяти Ю.А. Львова: сб. статей / под ред. Г.Ф. Плеханова. Томск: Изд-во НИИББ при ТГУ, 1995. С. 56–59.
3. Болиховский В.Ф. Парагенетические комплексы подземных льдов в буграх пучения Центрального Ямала // Криогенные физико-геологические процессы и методы изучения их развития. М.: Изд-во ВСЕГИНГЕО, 1987. С. 135–141.
4. Васильчук Ю.К. Некоторые особенности строения и условий образования выпуклобугристых торфяников севера Западной Сибири // Материалы VI Научной конференции молодых ученых. М.: Деп. в ВИНТИ, 1979. № 3901-79. 16 с.
5. Васильчук Ю.К. Об особенностях формирования бугров пучения на севере Западной Сибири в голоцене // Природные условия Западной Сибири. М.: Изд-во Московского ун-та, 1983. С. 88–103.
6. 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 Московского ун-та, 2008. 571 с.
7. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Чижова Ю.Н. Миграционные бугры пучения на Европейском Севере России — южный и северный пределы ареала и современная динамика // Инженерная геология. 2011. № 2. С. 56–72.
8. Геокриология СССР. Том 2. Западная Сибирь / под ред. Е.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 454 с.
9. Дубиков Г.И., Шмелев Л.М. Многолетнемерзлые грунты у южной границы их распространения между Уралом и р. Обью // Труды ПНИИИС. М.: ПНИИИС, 1976. Вып. 49. С. 86–110.
10. Дюкарев А.Г., Пологова Н.Н. Современные криоморфозы в ландшафтах южной тайги Западной Сибири // География и природные ресурсы. 2007. № 1. С. 96–100.
11. Ильин Р.С. Природа Нарымского края // Материалы по изучению Сибири. Том II. Томск: Изд-во Томского отделения общества изучения Сибири и ее производительных сил, 1930. 346 с.
12. Константинова Г.С. О криогенных образованиях в районе Большого Хантайского порога // Многолетнемерзлые горные породы различных районов СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 112–120.
13. Кузнецов Н.И. «Лайды» в низовьях р. Енисея, их строение, образование и место в классификационной схеме болотно-лесных образований // Труды полярной комиссии АН СССР. Вып. 12. Л.: Изд-во АН СССР, 1932. С. 5–40.
14. Куницын Л.Ф. Многолетняя мерзлота и связанные с ней формы рельефа на северо-западе Западно-Сибирской низменности / Вопросы физической географии. М.: Изд-во АН СССР, 1958. С. 313–337.
15. Львов Ю.А. Болота Тым-Вахского междуречья // Природа и экономика севера Томской области: материалы комплексной экспедиции по изучению природных условий, естественных ресурсов и экономики нефтегазоносных районов Томской области. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1977. С. 118–133.
16. Мельников В.П., Спесивцев В.И. Криогенные образования в литосфере Земли: монография. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 344 с.
17. Москаленко Н., Пономарева О., Устинова Е. Мониторинг экзогенных геологических процессов на трассе газопровода Надым — Пунга // Инженерные изыскания. 2007. № 1. С. 34–36.
18. Мульдьяров Е.Я. Мерзлотный торфяник на междуречье Кети и Чулыма // Ледники и климат Сибири. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1987. С. 84–85.
19. Пономарева О.Е. Мониторинг динамики поверхности бугров пучения вдоль трассы газопровода Надым — Пунга (северная тайга Западной Сибири) // Материалы третьей конференции геокриологов России, г. Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, 1–3 июня 2005 г. Том 2. Часть 3. Динамическая геокриология; Часть 4. Геоэкология криолитозоны. М.: Изд-во Моск. ун-та. 2005. С. 141–146.
20. Попов А.И. Вечная мерзлота в Западной Сибири. М.: Изд-во АН СССР, 1953. 230 с.
21. Сакс В.Н. Некоторые данные о вечной мерзлоте в низовьях Енисея // Проблемы Арктики. 1940. № 1. С. 62–79.
22. Стариков Э.В., Жидовленко В.А. Радиоуглеродные датировки института леса и древесины им. В.Н. Сукачева СО АН СССР. Сообщение 2 // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. 1981. Вып. 51. С. 62, 182–184, 191, 192.
23. Шевелева Н.С., Хомичевская Л.С. Геокриологические условия Енисейского севера. М.: Наука, 1967.
24. Шестернев Д.Д. Оценка пучиноопасности сезоннопромерзающих и сезоннооттаивающих грунтов в условиях деградации многолетнемерзлых пород (на примере Читино-Ингодинской впадины): автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. М.: Изд-во МГУ, 2008. 24 с.
25. Blyakharchuk T.A., Sulerzhitsky L.D. Holocene vegetational and climatic changes in the forest zone of Western Siberia according to pollen records from the extrazonal palsa bog Bugristoye // The Holocene. 1999. V. 9. № 5. P. 622–627.
26. Shearer J.M., Macnab R.F., Pelletier B.R., Smith T.B. Submarine pingos in the Beaufort Sea // Science. 1971. V. 174. № 4011. P. 816–818.
27. Vasilchuk Yu.K., Vasilchuk A.C. The ¹⁴C age of palsas in Northern Eurasia // Radiocarbon. 1998. V. 40. № 2. P. 895–904.