



# МИГРАЦИОННЫЕ БУГРЫ ПУЧЕНИЯ В ЮЖНОЙ ЧАСТИ КРИОЛИТОЗОНЫ СРЕДНЕЙ СИБИРИ

## PALSAS IN THE SOUTHERN PART OF THE MIDDLE SIBERIA PERMAFROST ZONE

### ВАСИЛЬЧУК Ю.К.

Профессор географического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ), д.г.-м.н., действительный член Российской академии естественных наук, г. Москва, vasilch@geol.msu.ru, vasilch\_geo@mail.ru

### ВАСИЛЬЧУК А.К.

Старший научный сотрудник географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, д.г.н., г. Москва

### БУДАНЦЕВА Н.А.

Старший научный сотрудник географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, к.г.н., г. Москва

### ЙОШИКАВА К.

Профессор Центра исследований водного пространства и окружающей среды Института северной инженерии Университета Аляски, г. Фэрбенкс, штат Аляска, США

### ЧИЖОВА Ю.Н.

Старший научный сотрудник географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, к.г.н., г. Москва

### СТАНИЛОВСКАЯ Ю.В.

Научный сотрудник лаборатории геоэкологии Института геоэкологии РАН им. Е.М. Сергеева, г. Москва

### VASIL'CHUK YU.K.

Professor of the faculty of geography of the Lomonosov Moscow State University (MSU), doctor of science (Geology and Mineralogy), member of the Russian Academy of Natural Sciences, Moscow, vasilch@geol.msu.ru, vasilch\_geo@mail.ru

### VASIL'CHUK A.C.

Senior staff scientist of the geography faculty of the MSU, doctor of science (Geography), Moscow

### BUDANTSEVA N.A.

Senior staff scientist of the Geography Faculty of the MSU, Ph.D. (candidate of science in Geography), Moscow

### YOSHIKAWA K.

Professor of the Water and Environmental Research Center of the Institute of Northern Engineering of the University of Alaska, doctor of science, Fairbanks, Alaska, the USA

### CHIZHOVA JU.N.

Senior staff scientist of the geography faculty of the MSU, Ph.D. (candidate of science in Geography), Moscow

### STANILOVSKAYA JU.V.

Research associate of the Geocryology Laboratory of the Sergeev Environmental Geoscience Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow

#### Ключевые слова:

криолитозона; миграционные бугры пучения; крупнобугристые торфяники; Средняя Сибирь; Северный полярный круг.

#### Key words:

permafrost zone; palsa; peat bogs; Middle Siberia; Arctic circle.

#### Аннотация

В статье рассмотрены особенности развития миграционных торфяных бугров пучения в южной части криолитозоны Средней Сибири. Показано, что южный предел их ареала совпадает с южной границей распространения многолетнемерзлых грунтов в этом регионе и находится на западе южнее 55° с.ш., а на востоке — близ широты 56° с.ш. Отмечено, что миграционные бугры пучения существенно осложняют эксплуатацию трубопроводов, дорог, крупных объектов строительства, аэродромов.

#### Введение

Образование и деградация сильнольдистых бугров пучения — это весьма опасные процессы для железных и шоссейных дорог, взлетных полос аэродромов, нефте- и газопроводов, зданий и др. [3, 6–9, 14, 26, 27, 31–33, 36, 43]. В настоящее время в южной части криолитозоны Средней Сибири нет ни одного протяженно-го линейного сооружения, которое не подвергалось бы воздействию морозного пучения. Это особенно важно в условиях наблюдающейся в последние годы активизации промышленно-гражданского строительства на данной территории (рис. 1).

#### 1. Особенности инженерно-геологического освоения территории

По данным Минпромэнерго, добыча нефти в Средней Сибири вырастет на несколько десятков миллионов тонн в год за счет начала промышленной добычи на таких крупных месторождениях, как Юрубчено-Тохомское, Куюмбинское, Верхнечонское, Талаканское. (см. рис. 1). Промышленная добыча газа в Средней Сибири начинается на наиболее подготовленных к эксплуатации месторождениях.

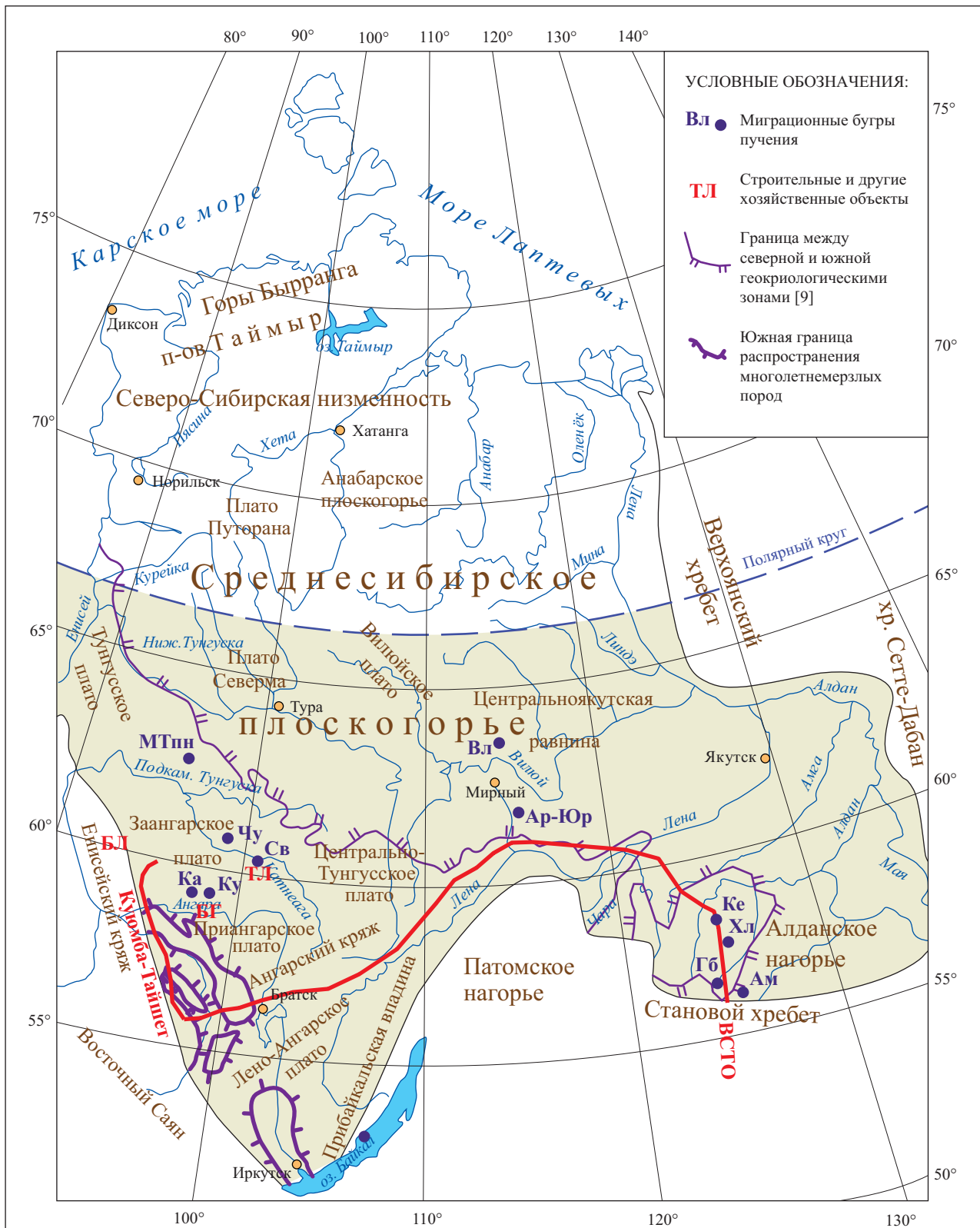
#### Abstract

The article considers the palsa development features in the southern part of the Middle Siberia permafrost zone. It is shown that the southern limit of their areal coincides with the southern boundary of the permafrost zone and is located southward of 55° N in the west of the region and near 56° N in the east. It is noted that palsa greatly complicate exploitation of pipelines, roads, major construction projects and airfields.



Начало промышленной эксплуатации Юрубчено-Тохомского и Куомбинского месторождений связано со строительством нефтепровода Юрубчен — Кучеткан протяженностью 311 км, который свяжет месторожде-

ния с железнодорожной веткой Карабула — Решоты в районе станции Кучеткан. Далее предполагается продолжение нефтепровода до места врезки в существующую систему трансибирских магистральных нефте-



**Рис. 1.** Карта-схема. Массивы многолетнемерзлых миграционных торфяных бугров: Ам — в районе озера Амутычи; Ар-Юр — в пойме реки Аргаа-Юрэх по трассе дороги Ленск — Мирный; Вл — к северу от долины реки Вилюй; Гб — в долине реки Горбыллах; Ка — в долине реки Карабула; Ке — в долине реки Керак; Ку — в долине реки Кунчет; МТпн — в междуречье рек Подкаменная Тунгуска и Нижняя Тунгуска; Св — в Суловской воронке; Хл — в долине реки Халдя; Чу — в междуречье рек Чуния и Подкаменная Тунгуска. Инженерно-геологические объекты: БГ — Богучанская ГЭС; БЛ — месторождение Благодатное; ВСТО — трубопровод Восточная Сибирь — Тихий океан; ТЛ — месторождение Тальское

проводов в районе подстанции Нижняя Пойма. На этом этапе возможно включение в разработку значительных ресурсов нефти Собинского месторождения и окружающих его перспективных участков Собинско-Тэтэринского района. Для транспортировки добываемой нефти предполагается строительство нефтепровода Собинское — Кучеткан протяженностью 380 км, синхронизированное с достройкой нефтепровода Кучеткан — Нижняя Пойма.

Освоение газоконденсатных месторождений Эвенкии планируется начать уже в 2013 году. В программу освоения газовых ресурсов предполагается вовлечь базовые Юрубчено-Тохомское и Собинско-Пайгинское месторождения, расположенные в зоне действия планируемых газопроводов, путем строительства через территорию Нижнего Приангарья газопроводов-подключений. Первоочередным объектом добычи газа может стать Нижнеангарский газодобывающий район. На этом этапе предполагается построить газопровод от Агалеевского и Берямбинского месторождений до поселка Богучаны.

В ближайшие 3–4 года будет построен газопровод от Юрубчено-Тохомского и Оморинского месторождений до поселка Богучаны. Для начала промышленной добычи газа в Собинско-Тэтэринском районе планируется через 2–3 года соединить его газопроводом с газопромислами Нижнеангарского района.

Особенностью освоения газоконденсатных месторождений Эвенкии и Нижнего Приангарья является проблема извлечения гелия. В связи с этим при любом из сценариев освоения газовых ресурсов Восточной Сибири и Дальнего Востока в Нижнем Приангарье необходимо строительство завода по переработке газа с выделением гелия, этана, а также хранилищ для хранения гелиево-азотного концентрата. В качестве базового для создания газоперерабатывающего производства выбрано Собинское месторождение — крупнейшее по разведанным запасам свободного газа. Для строительства завода по переработке газа могут быть использованы Богучанский район, территория поселка Карабула. В районах размещения газоперерабатывающего завода целесообразно строительство подземных хранилищ гелия в резервуарах в каменной соли методом подземного растворения. Помимо искусственных резервуаров для хранения гелиевого концентрата могут быть использованы и природные ловушки газа. В варианте строительства завода в районе поселка Карабула газ с месторождения будет подаваться на это предприятие по газопроводу протяженностью 400 км, другая часть будет вместе с сухим метаном закачиваться в газопровод Карабула — ЕСГ (Нижняя Пойма) протяженностью 200 км. В районе железнодорожной станции Карабула предполагается создание соответствующих резервуарных (подземных хранилищ в соляных пластах) и наливных мощностей.

Юрубчено-Тохомское нефтегазоконденсатное месторождение располагается в юго-западной части Сибирской платформы в пределах Лено-Тунгусской нефтегазоносной области на территории Эвенкийского муниципального района Красноярского края в 280 км к юго-западу от поселка Тура. Собинское нефтегазоконденсатное месторождение располагается в юго-западной части Сибирской платформы в пределах южного

района Лено-Тунгусской нефтегазоносной области. Ближайшим населенным пунктом (40 км) является поселок Ванавара — административный центр Тунгусско-Чунского района Эвенкии (Красноярский край).

В апреле 2012 года Правительством РФ подписано постановление о строительстве нового нефтепровода Куюмба — Тайшет в Красноярской и Иркутской областях, которое обеспечит прием в систему магистральных нефтепроводов ОАО «АК «Транснефть»» нефти с новых месторождений Красноярского края — Куюбинского и Юрубчено-Тохомского. Строительство этого нефтепровода предполагается начать в 2013 г., его длина составит 700 км. Таким образом, новый нефтепровод свяжет Юрубчен с трубопроводной системой Восточная Сибирь — Тихий океан-1 (ТС ВСТО-1).

Эксплуатация трубопроводной системы ВСТО-1 ведется с 2009 года. Транспортировка нефти с температурой от плюс 1 до плюс 6°C начинается с головной нефтеперекачивающей станции (ГНПС) «Тайшет» и проходит вдоль реки Лены и Алданского нагорья и заканчивается на нефтеперекачивающей станции «Сковородино» (НПС-21). Подземный нефтепровод протяженностью 2600 км проложен в зонах сплошного и островного распространения многолетнемерзлых пород (ММП), характеризующихся высоким разнообразием мерзлотных процессов и явлений, в том числе пучения.

Строительство и эксплуатация подземного трубопровода приводит к нарушению температурно-влажностного режима грунтов на заболоченных землях с бугристым рельефом. Сейчас эти процессы находятся в активной форме, и в связи с эксплуатацией трубопровода, запланированной до 2040 г., необходимо изучать развитие бугров пучения и их взаимодействия с трубопроводом и притрассовой дорогой, поскольку прогнозируется увеличение глубины и площади просядок, а также пучение грунтов.

Для подземного нефтепровода особенно опасны развивающиеся бугры пучения. Это весьма убедительно показано китайскими коллегами на 86-й станции трассы нефтепровода Голмуд — Лхаса на Тибетском нагорье. Здесь бугор пучения образовался во время зимнего промерзания [44] с декабря 2001 г. по март 2002 г. (рис. 2, а). Размеры бугра в январе 2002 г. составляли 15 м в длину, 8–11 м в ширину и 2,0–2,5 м в высоту. К февралю 2002 г. его высота уменьшилась до 1,5–2,0 м (рис. 2, б). Рост бугра вызвал изгибание подземного трубопровода наверх на высоту 1,6 м. Позднее часть нефтепровода возвышалась над поверхностью земли на высоту 1,1 м (см. рис 2, б). В этой опасной ситуации разрыв трубопровода и разлив нефти пока не зафиксированы (рис. 2, в, г), однако они весьма вероятны [44].

В южной части Среднесибирской криолитозоны находятся крупнейшие месторождения: платиноидов (Благотатное на Енисейском кряже — 60°04' с.ш., 92°56' в.д.); железных руд (Нижнеангарское, Ишимбинское, Коршуновское, Нерюндинское, Тагарское и др.); марганцевых руд (Порожихинское — 61°35' с.ш., 90°01' в.д.); полиметаллов (Горевское свинцово-цинковое — 58°07' с.ш., 93°29' в.д.); редких металлов — сурьмы (Раздолинское), магнетитов (Тальское — 60°5'055" с.ш., 101°5'057" в.д.); золота (Олимпиадинское — 59,86° с.ш., 92,91° в.д.) и др.



Для освоения месторождений, доставки леса и пр. предполагается строительство автодорог, особенно в малообжитых местах Эвенкии и соседних районах Красноярского края. Это прежде всего лесовозная автодорога от села Яркино (Богучанский район) до поселка Ванавара (Эвенкия), дороги общего пользования: поселок Ангарский — совхоз Ленина (Кежемский район), Таежный — Ванавара и др.

Запроектировано освоение Селигдарского месторождения апатитов — крупнейшего месторождения фосфорного сырья на Дальнем Востоке России. План создания Селигдарского горно-химического комплекса на территории Алданского района Якутии — одного из составляющих проекта «Комплексное развитие Южной Якутии» — включает в себя строительство на базе месторождения горно-обогатительного комбината (карьера и обогатительной фабрики для получения апатитового концентрата) и химического завода по производству комплексных фосфорно-магниевых удобрений.

Развитие таких промышленных гигантов, как Богучанский алюминиевый завод и др., требует развития всей инфраструктуры районов их расположения, включая дороги и трубопроводы, что неизбежно связано с освоением территорий развития выпуклобугристых торфяников.

Среди важнейших объектов, для которых требуется тщательный учет пучения, — Амуро-Якутская желез-

нодорожная магистраль (АЯМ) и ее новый участок Томмот — Кердем, автодорога Канск — Абан — Богучаны — Кодинск и железная дорога Карабула — Ярки в Нижнем Приангарье.

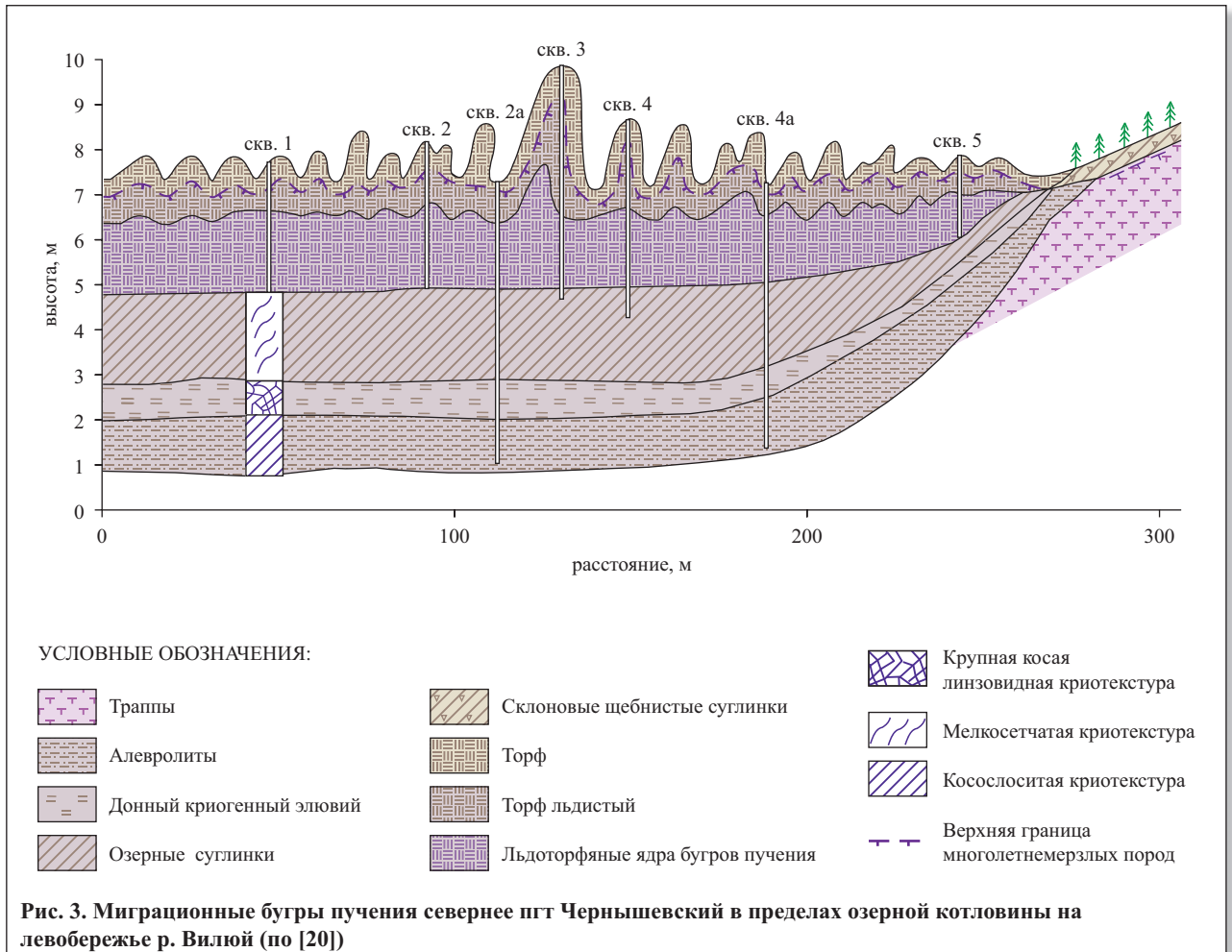
На территории криолитозоны Средней Сибири проектируется и строится ряд крупных гидроэлектростанций: Эвенкийская ГЭС на реке Нижняя Тунгуска, Мамаканская ГЭС, Богучанская ГЭС (58°41'40" с.ш., 99°8'56" в.д.) у г. Кодинска Кежемского района, Мотыгинская ГЭС. Часть сооружений Саяно-Шушенской ГЭС находится на территории островного распространения многолетнемерзлых грунтов. Наличие огромных водохранилищ площадью в тысячи и даже первые десятки тысяч квадратных километров приведет к глубокому оттаиванию подземных льдов под ними, в частности к деградации бугров пучения, а вслед за этим существенно увеличится и глубина самих этих водоемов.

## 2. Районы распространения миграционных бугров пучения южнее Северного полярного круга

Границы распространения бугристых торфяников в Средней Сибири ранее были обозначены Л.В. Шумиловой [38] и Н.Я. Кацем [13]. Детальные сведения о южном распространении миграционных бугров пучения (пальза) были получены при исследованиях места падения Тунгусского метеорита [2, 16–18, 21, 22 и др.].



Рис. 2. Пульсирующий и мигрирующий бугор пучения и изогнутый нефтепровод на 86-й станции трассы Голмуд — Лхаса на Тибетском нагорье в Китае (по [44]): а — бугор в феврале 2002 г.; б — частично протаявший бугор и нефтепровод в мае 2002 г.; в — изогнутый нефтепровод в июне 2002 г. после того, как бугор полностью растаял; г — изогнутый нефтепровод в июле 2002 г.

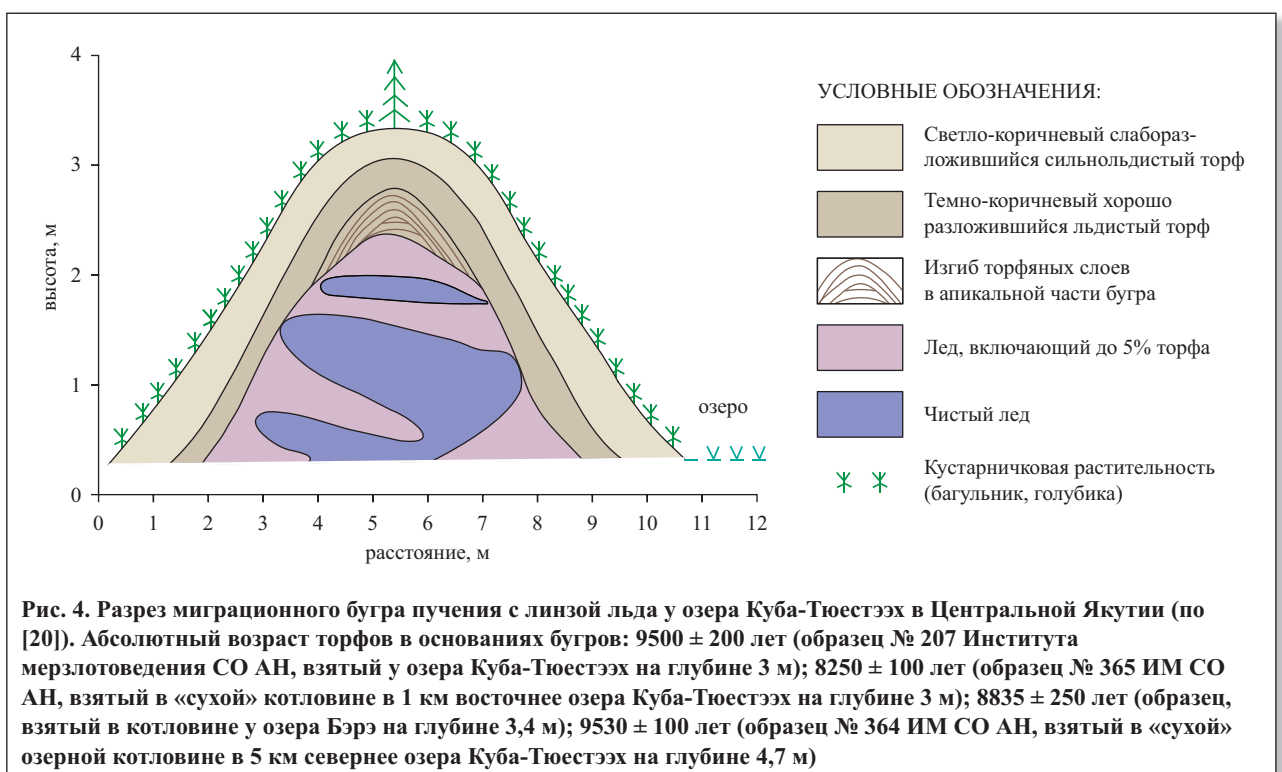


### 2.1. Миграционные бугры пучения Лено-Вилюйского междуречья

В районах, наиболее близко расположенных к Северному полярному кругу на востоке Средней Сибири, миграционные бугры пучения детально исследованы

В.И. Спесивцевым [20] и Й. Экерманом [39], немного южнее они изучены Н.Г. Бобовым [4].

В.И. Спесивцевым [20] были исследованы бугры пучения в Центральной Якутии в оторфованных озерных котловинах Куба-Тюестээх и Бэрэ (рис. 3, 4) на ле-





вобережье реки Вилюй в 60 км севернее поселка городского типа Чернышевский ( $63^{\circ}00'55,86''$  с.ш.,  $112^{\circ}27'55,68''$  в.д.). Среднегодовая температура грунтов здесь варьирует от минус  $8^{\circ}\text{C}$  (скв. 75-3) до минус  $2^{\circ}\text{C}$  (скв. 75-2, 75-4). Мощность торфа, перекрывающего бугры, варьирует от 1,4 (скв. 75-2) до 3,4 м (скв. 75-8). Торф, как правило, сфагновый, с большим количеством включений веточек и корней кустарников, сильнольдистый, с базальной и тонкошпировой слоистой криотекстурой. Он подстиляется светло-серым, зеленовато-серым и синим озерным суглинком мощностью 1,6–2,7 м с крупной линзовидной и косолинзовидной криотекстурой. Толщина линз — до 3–4 см (скв. 75-3). Суглинок подстиляется зеленовато-серым и серым с голубоватым оттенком песком мощностью 1,1–3,5 м с массивной и редкошпировой косослоистой криотекстурой [20].

В.И. Спесивцевым [20] также изучены миграционные бугры пучения с линзами льда в озерной котловине Бэре в Центральной Якутии. Мощность торфа в пределах бугров обычно не превышает 3 м. Торф, как пра-

вило, подстиляется озерными суглинками, которые, в свою очередь, перекрывают донные табериты. В ядрах пальза отмечается высокая льдистость, а иногда даже линзы чистого льда мощностью около 1 м [20].

Й. Экерман [39] исследовал пальза в области сплошного распространения многолетнемерзлых грунтов в Якутии. В некоторых западных и центральных районах Центральной Якутии в октябре 1980 г. и июне 1981 г. были изучены формы, подобные буграм пучения. Большинство наблюдений было сделано с самолета во время полетов между городами Якутск и Мирный.

В полевых условиях Й. Экерманом были изучены бугристые формы в районе города Мирного ( $62^{\circ}30'$  с.ш.,  $114^{\circ}01'$  в.д.) и к северу от поселка городского типа Чернышевский ( $63^{\circ}05'$  с.ш.,  $112^{\circ}30'$  в.д.). Согласно результатам его наблюдений в этих районах бугры очень широко распространены между указанными населенными пунктами и приблизительно в 260 км к северу от них. Этим автором было исследовано 16 болот, в которых встречены бугристые формы пучения [39].

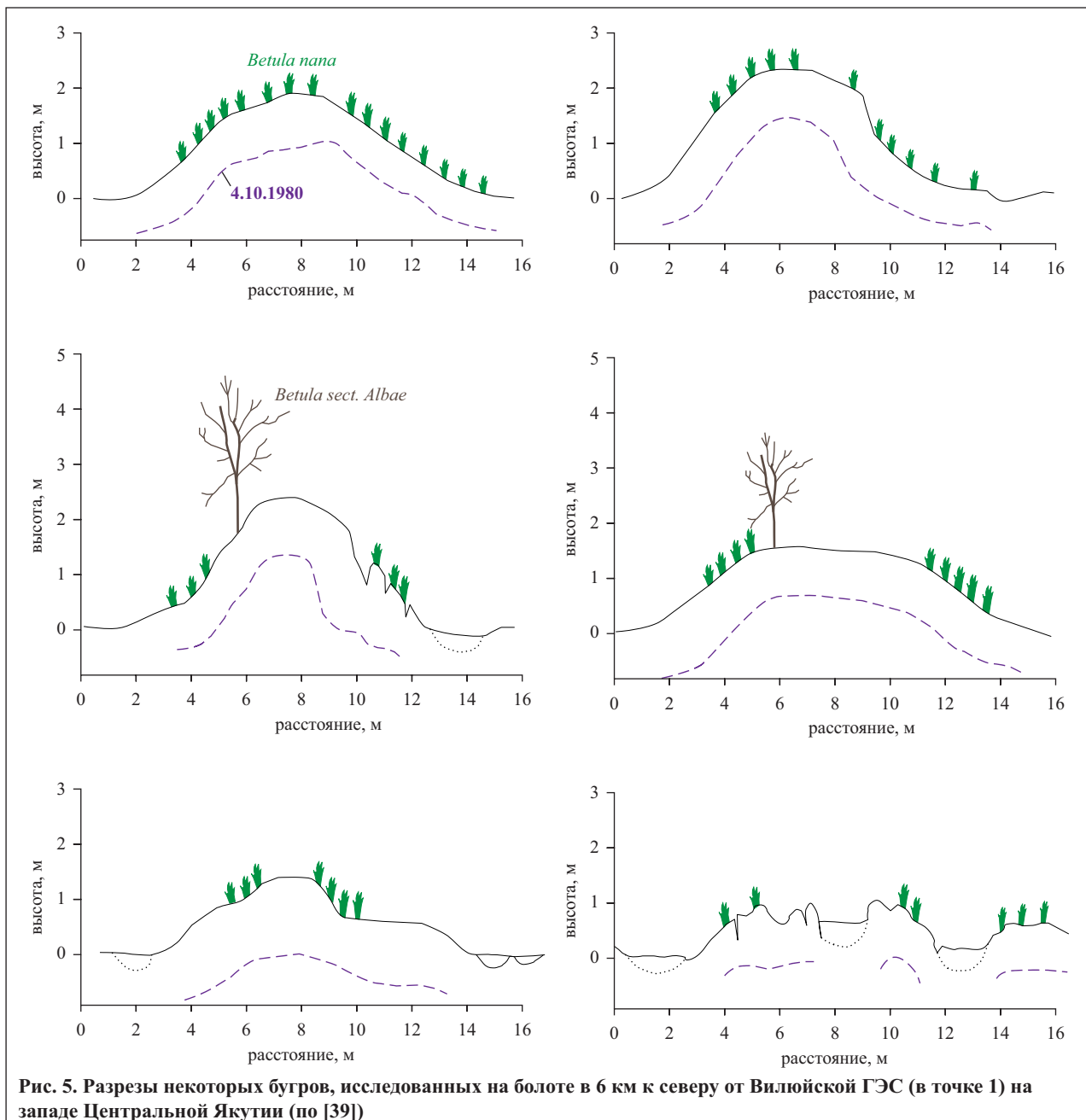


Рис. 5. Разрезы некоторых бугров, исследованных на болоте в 6 км к северу от Вилюйской ГЭС (в точке 1) на западе Центральной Якутии (по [39])

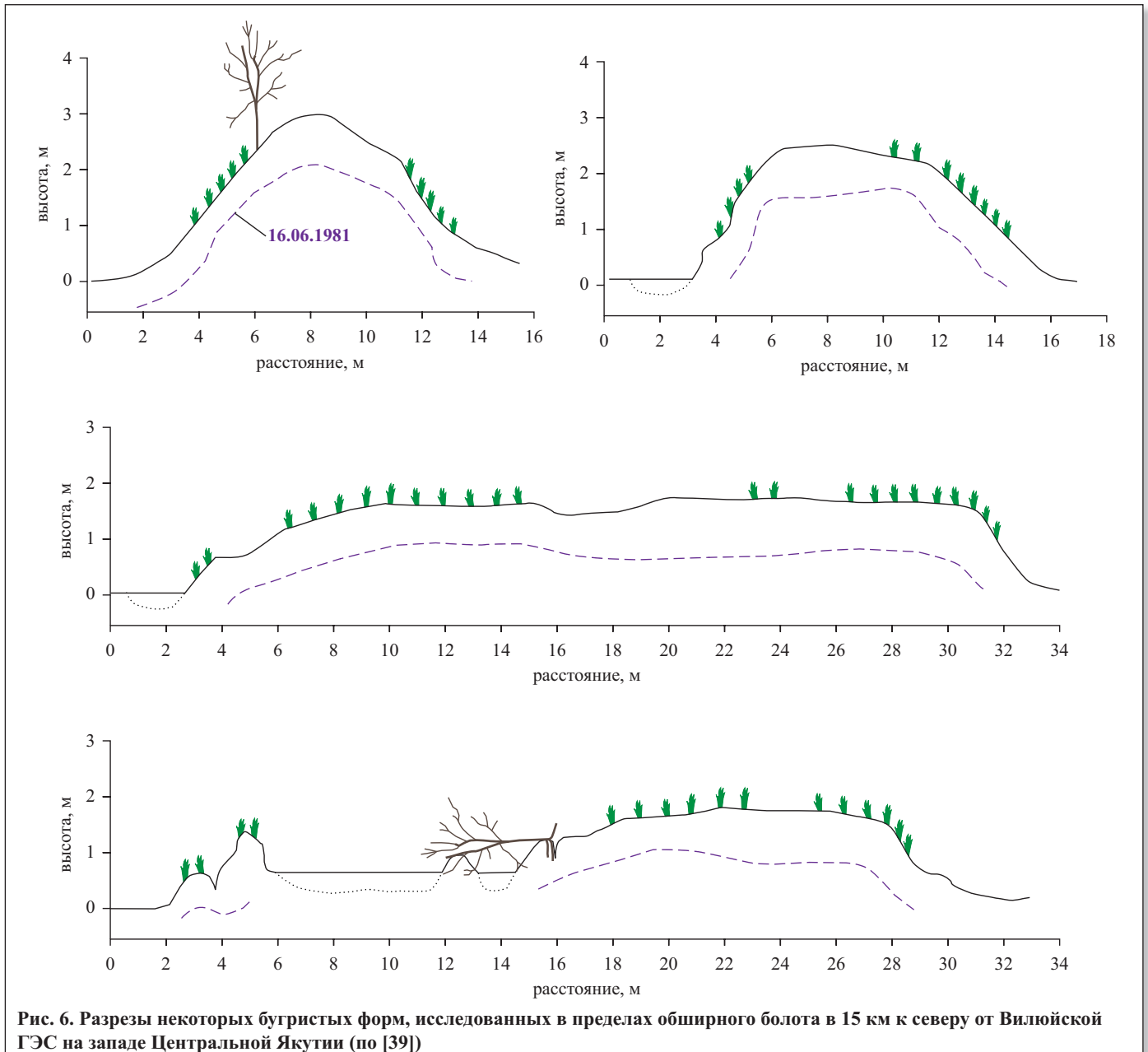


Рис. 6. Разрезы некоторых бугристых форм, исследованных в пределах обширного болота в 15 км к северу от Вилюйской ГЭС на западе Центральной Якутии (по [39])

Детально был исследован многолетнемерзлый торфяник в 6 км к северу от Вилюйской ГЭС. Ширина этого торфяного массива — около 1 км, длина — 3 км, он вытянут с севера на юг. По западному краю болота с севера на юг протекает небольшой ручей. Здесь встречено несколько бугров пучения куполообразной формы высотой от 0,5 до 2,0 м. Диаметр бугров здесь редко превышает 15 м, а их форма является более или менее округлой (рис. 5). Как правило, палыза покрыты кустарниковым покровом, состоящим из карликовой березки (*Betula nana* L.). На некоторых крупных буграх произрастают березы (*Betula sect. Albae*) с максимальным диаметром ствола 13 см. Мощность сезонноталого слоя, измеренная в октябре, — около 1 м. В верхней части бугров залегает очень мощный слой сфагнового торфа. На некоторых зрелых палыза имеются трещины, некоторые бугры находятся на стадии разрушения, расчленены крупными трещинами, блоковой эрозией, термоэрозией (имеют озера на вершинах) и термоабразией и т.д. Несколько разрушенных бугров с кольцеобразными водоемами или водоемами, окруженными торфяными кольцами, свиде-

тельствуют о типичном циклическом развитии палыза и окружающих болот [39].

В 15 км к северу от Вилюйской ГЭС (63°02' с.ш., 112°28' в.д.) было исследовано еще одно довольно обширное болото площадью более 5 км<sup>2</sup>. Его центральная часть — довольно увлажненная, в некоторых местах видна открытая вода. Здесь произрастает главным образом осока (*Carex spp.*). Бугры пучения расположены в краевой более сухой части болота. Палыза здесь самых разнообразных форм, включая как выпуклые и платообразные, так и более сложные (рис. 6). Их высота, как правило, 3,5 м и более. В целом они здесь крупнее, чем на других исследованных торфяниках. Кроме того, в пределах данного болота встречаются бугры пучения, находящиеся на разных стадиях развития — от зарождения до разрушения [39].

Образование многолетнемерзлых бугров пучения на Лено-Вилюйском междуречье было описано Н.Г. Бобовым [4]. Наблюдения производились в летние месяцы 1955–1957 гг. по трассе строившейся дороги Мухтуя (ныне Ленск, 60°43' с.ш., 114°54' в.д.) — Мирный (62°32' с.ш., 113°57' в.д.). Бугры пучения бы-



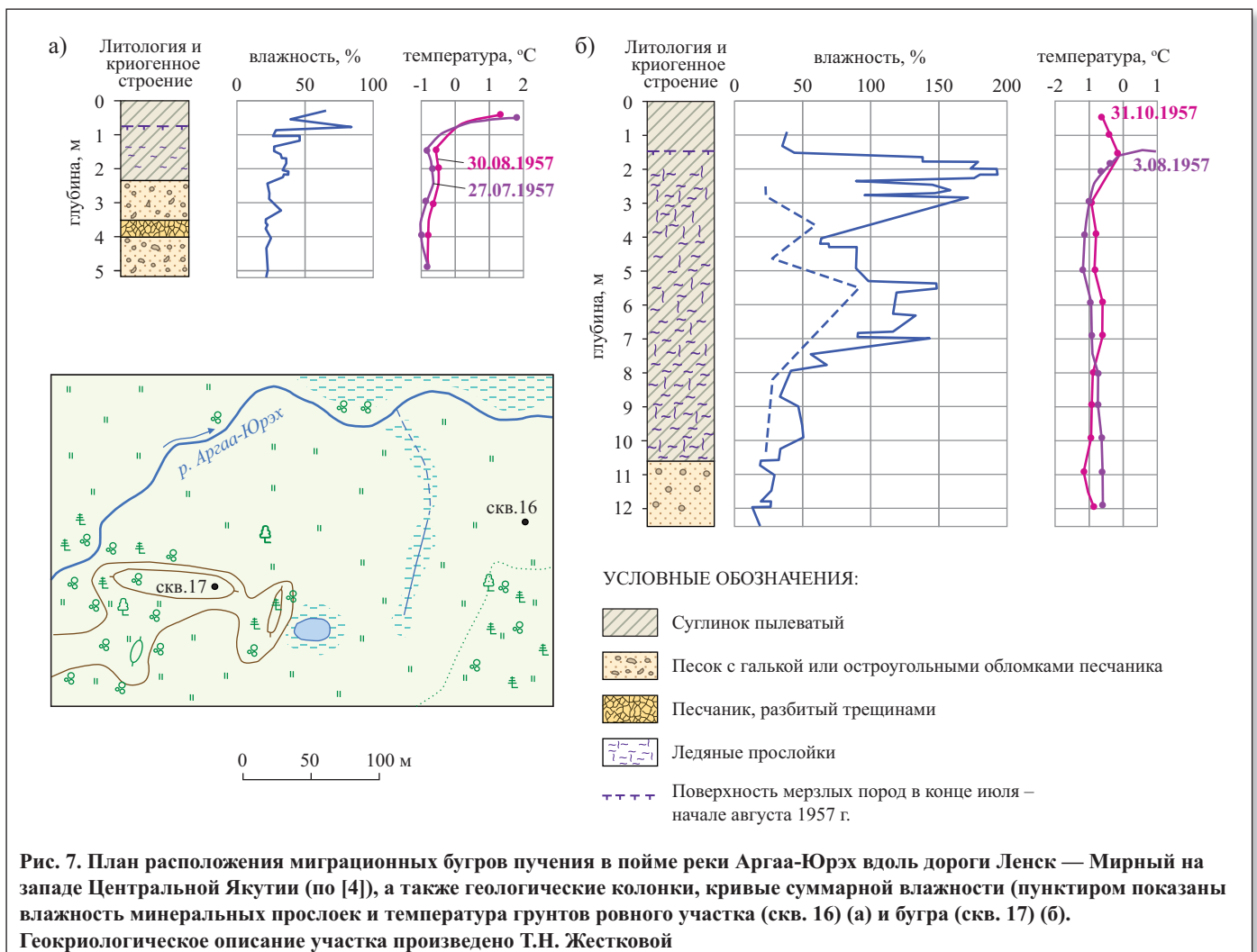
ли встречены этим автором близ осевой части междуречья, в частности в пойме реки Аргаа-Юрэх недалеко от озера Быйыттаах (рис. 7). Пальза здесь отличаются довольно пологими склонами и достаточно крупными размерами, достигая в плане 110 м по длинной и 40 м по короткой оси, и имеют высоту почти 3 м. Бугры четко выражены также благодаря отличающемуся от окружающей местности растительному покрову. На их поверхности имеются густые заросли таволги, кустарников (жимолости, шиповника и др.). На некоторых буграх произрастают отдельные березы и лиственницы. При этом остальная поверхность поймы поросла злаково-осоковым травянистым покровом. Наличие в растительном покрове древесных и кустарниковых видов свидетельствует о многолетнем существовании рассмариваемых пальза. Их развитие на пойме дает основание считать их современными образованиями.

Проведенные Н.Г. Бобовым наблюдения [4] показали, что многолетние бугры пучения, возникающие за счет образования сегрегационного льда при миграции влаги к основанию мерзлого ядра как наиболее охлажденного участка местности, на Лено-Вилуйском междуречье формируются в настоящее время. Рост описываемых бугров происходит в результате неравномерного по площади (дифференцированного) пучения их отдельных частей из-за неодинакового многолетнего промерзания. Дифференцированное пучение отдель-

ных частей пальза обуславливает нарушения в залегании грунтов, дизъюнктивные микродеформации и образование небольших воздушных полостей внутри бугров. Большое число воздушных полостей обуславливает довольно громкие звуки при ударах по буграм или даже ходьбе по ним. На это явление указывали в том числе местные жители.

Один из бугров был исследован более детально [4]. Среднегодовая температура грунтов в нем, измеренная в начале августа, составила минус 0,6°C. Этот бугор сложен пылеватым суглинком мощностью более 10 м, мерзлым с глубины 1,5 м, подстилаемым песком с галькой или остроугольными обломками песчаника. Лед в суглинке находится в виде прослоек (в том числе вертикальных) не толще 2 см, при этом льдистость довольно высокая: в верхней части разреза суммарная весовая влажность по отношению к сухой навеске приближалась к 200% (см. рис. 7, б), что соответствует льдистости около 100%. С глубиной льдистость суглинка уменьшается и уже на глубине 8 м составляет менее 50%. Льдистость подстилающего суглинок песка не превышает 30%. Для сравнения была исследована льдистость участка поймы в стороне от данного бугра. Вскрытые здесь суглинки менее льдистые, их суммарная влажность не превышает 50% и с глубиной также убывает.

Интересной особенностью криогенного строения вышеописанного бугра пучения являлись горизонталь-





но расположенные воздушные полости, окруженные неровными «рваными» поверхностями, расположенными друг от друга не более 1 см по высоте. Их видимая ширина превышает 8 см. В некоторых ядрах при их высоте не более 20 см наблюдалось до трех таких полостей. Вне бугров никаких воздушных полостей установлено не было [4]. В верхней части ядра была обнаружена вертикальная трещина длиной 13 см, заполненная льдом. Нижний конец ее терялся среди прослоек сегрегационного льда. По этой трещине произошло смещение грунтов (дизъюнктивная микродеформация), в результате которой правая часть пород ядра оказалась приподнятой на 2 см. Это отчетливо устанавливается по верхней горизонтальной прослойке, имеющей толщину 1,5 см. Подобные особенности были отмечены и другими исследователями, например Ф. Калмелсом, М. Аллардом и Л. Руссо [6], исследовавшими бугры пучения в Канаде.

По мнению Н.Г. Бобова [4], микросдвиг по вышеупомянутой трещине произошел тогда, когда грунты были уже мерзлыми, и с тех пор они не оттаивали. Он считает, что в результате пучения бугры распадаются системой трещин на блоки, а их поверхность при этом — на полигоны неправильной формы. Отмеченное смещение грунтов происходит в результате неравномерного многолетнего промерзания отдельных частей бугра и дифференцированного пучения. При этом смещения по вертикали могут достигать 0,3 м. При неравномерном пучении отдельных частей многолетних бугров происходит также локальное нарушение залегания и подстилающих талых грунтов. Наиболее интенсивное и дифференцированное пучение в описанном бугре происходило, очевидно, при промерзании верхней 8-метровой толщи грунтов, когда формировалось основное количество ледяных включений. В местах микросдвигов происходило расщепление слоев пород, что обусловило формирование небольших, но довольно многочисленных воздушных полостей. В процессе пучения формировалось температурное поле грунтов бугра, отличное от такового на смежных участках поймы. Глубже температурное поле в подобных условиях выравнивается настолько, что подток влаги к основанию бугра сокращается, и в результате пучение бугра замедляется, а затем и прекращается.

Таким образом, многолетние бугры пучения на Лено-Вилуйском междуречье являются миграционными. При этом их пучение происходит неравномерно вследствие неодинакового многолетнего промерзания, что обуславливает нарушения залегания грунтов, дизъюнктивные микродеформации и микросдвиги и образование небольших воздушных полостей внутри бугров. Неравномерное пучение отдельных частей палеозоя также определяет некоторую рыхлость сложения их многолетнемерзлых грунтов — в результате их суммарная льдистость меньше приращенного объема пород на величину, равную сумме воздушных полостей [4].

## 2.2. Миграционные бугры пучения междуречья Подкаменной Тунгуски и Нижней Тунгуски

В северо-западных районах Средней Сибири на водоразделе рек Чуны (61° с.ш., 102°49' в.д.) и Подкамен-

ная Тунгуска водораздельные крупнобугристые торфяники распространены на 6–7° южнее северной границы лесной зоны [38]. Особенности крупнобугристых торфяников, а именно облесенность бугров и бо-реальный характер покрывающей их растительности, проявляются достаточно четко и на торфяниках южной части Туруханского края.

Одним из ключевых районов для установления южного предела распространения палеозоя в Средней Сибири является территория, в пределах которой в 1908 г. произошло падение Тунгусского метеорита. Бугристые торфяники как в зоне катастрофы, так и вне ее были изучены Л.А. Куликом, Л.В. Шумиловой, Н.И. Пьявченко, Ю.И. Львовым, Е.М. Колесниковым и др. [15–18, 22, 28, 38, 41, 42]. Миграционные бугры пучения высотой 1–2 м встречаются в долине реки Нижняя Тунгуска, в верховьях реки Бахта (62°46' с.ш., 89° в.д.), на Чуны-Тунгусском междуречье и в районе падения Тунгусского метеорита (с. 277 [10]).

Как сообщают Ю.А. Львов и Г.М. Иванова [17], крупнобугристые комплексы широко распространены на междуречье Подкаменной Тунгуски и Нижней Тунгуски (рис. 8). На борту одного из бугров Ю.А. Львовым и др. [18] описано обнажение, вскрывшее сильнольдистое ядро палеозоя (рис. 9).

- 0–20 см. Торф кирпично-красного оттенка, пылеватой структуры, совершенно сухой, высокой степени разложения, с обрывками листьев мха *Sphagnum magellanicum* Brid. и корешков кустарничков. Это остаток мощного слоя верхового торфа, почти полностью разложившегося в условиях периодического пересыхания.
- 20–58 см. Торф бурого цвета, темнеющий на воздухе. Сложен преимущественно остатками трав (пушицы, вахты) и зеленых мхов (*Drepanocladus* sp. и *Meesia triquetra* Hedw). По мере роста глубины степень его разложения быстро падает с 70 до 50%.
- 58–64 см. Торф черного цвета. На глаз заметны волокнистые остатки растений, в составе которых преобладают зеленые мхи (*Drepanocladus*, *Meesia*). Степень разложения 30%.
- 64–74 см. Торф коричневого цвета, быстро темнеющий на воздухе; волокнистого строения. Сложен остатками зеленого мха *Meesia triquetra* и сфагнового мха из секции *Cimbifolia* (видимо, *Sph. centrale* C. Jens) в почти равных количествах с небольшой примесью остатков хвоща. Степень разложения 25%.
- 74–78,5 см. Торф черного цвета с волокнистыми остатками растений, в составе которых преобладают зеленые мхи.
- 78,5–108 см. Торф светло-коричневого цвета, сложенный остатками корневищ и влагалищ листьев вахты с примесью остатков травянистых растений и листьев карликовой березки. Степень разложения 30%. В отличие от предыдущих слоев, где лед заполняет промежутки между остатками растений, в этом пласте лед имеет форму линзочек толщиной 2,3–10 мм и диаметром до 20 мм, разделенных прослойками торфа толщиной 1–2 мм.
- 108–159 см. Линза чистого льда с вмержшими стволами и сучьями деревьев, концы которых выходят за пределы линзы.



- 159–195 см. Слой ячеистой структуры, где небольшие (3–4 мм толщиной) линзы льда разграничены тонкими (1–2 мм) прослойками торфа. В составе торфа преобладают травянистые остатки (пушица, в меньшей степени вахта), в малом количестве присутствуют остатки листьев карликовой березки. Степень разложения 30%.
- 195–201 см. Придонный слой, в котором наблюдаются макроскопические обильные остатки древесины. Кроме того, при ботаническом анализе в нем выделены остатки пушицы, хвоща и вейника.
- 201 см и глубже. Сизая оглеенная глина, густо пронизанная прожилками льда.

Г.А. Боровиков исследовал растительность Катанга-Ангарского междуречья в 1909 и 1910 гг. Обследованные им торфяные болота в лучшем случае имели крупнокочковатый рельеф. Боровиков отмечал малую мощность (1,0–1,5 м) торфяной залежи заангарских болот и их преимущественное развитие в долинах рек. Только в одном случае в долине реки Зааря в непосредственной близости от Подкаменной Тунгуски он отметил небольшой торфяной бугор высотой около 1,5 м. Остальные описанные Боровиковым крупнобугристые массивы находятся уже в правобережье реки Катанга.



Рис. 8. Крупнобугристый торфяник в районе падения Тунгусского метеорита (фото Е.М. Колесникова)

В то же время многолетнемерзлые грунты на Катанга-Ангарском междуречье широко распространены. Зондировка шупом и прикопки, произведенные Г.А. Боровиковым и Д.А. Драницыным [11], показали мощность

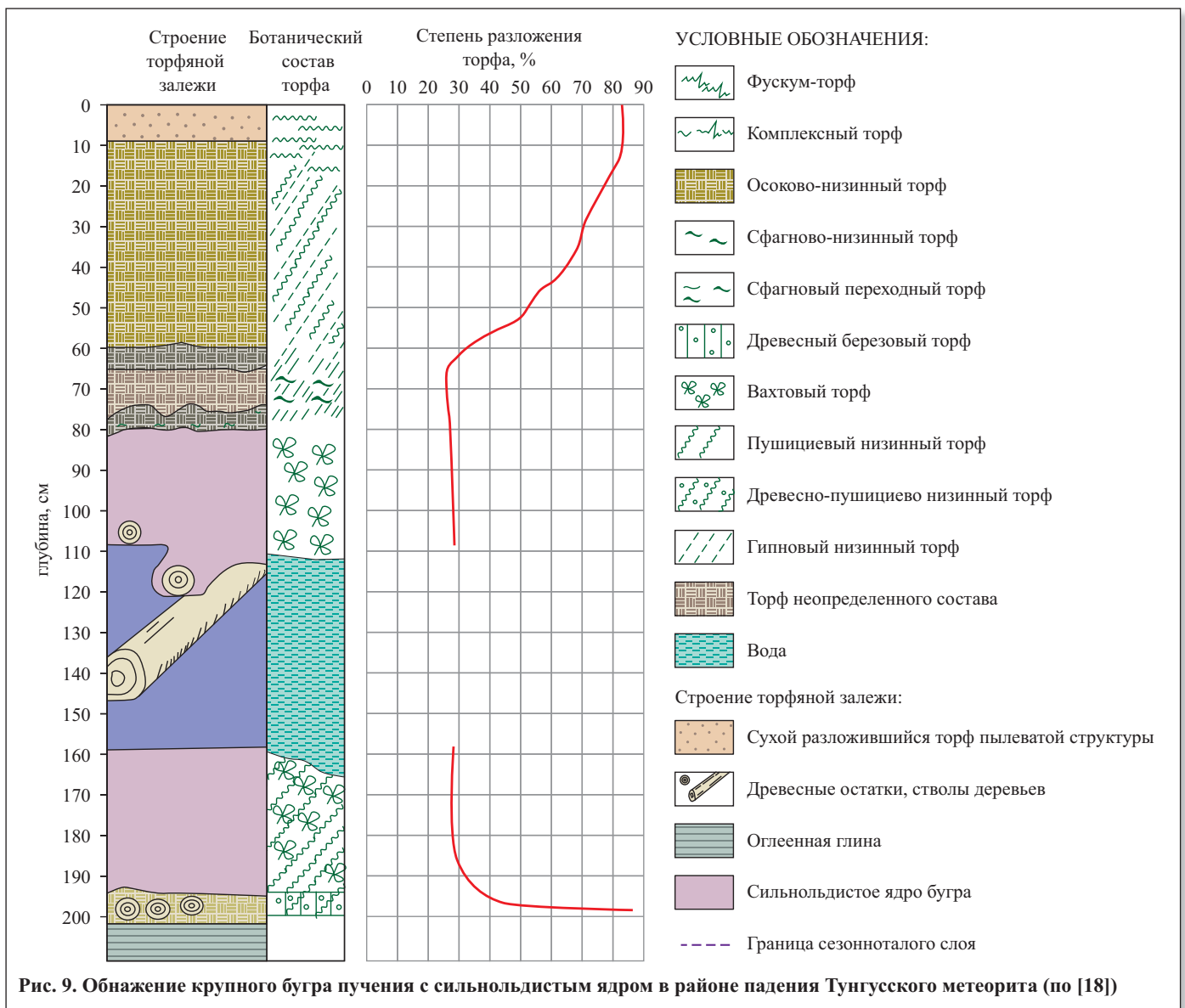


Рис. 9. Обнажение крупного бугра пучения с сильнольдистым ядром в районе падения Тунгусского метеорита (по [18])

деятельного слоя в конце лета более 2–3 м на песчаных грунтах и 20–25 см под слоем мха в густых ельниках.

Летом 1960 г. Ю.А. Львовым с соавторами [18] были обследованы следующие крупнобугристые торфяные массивы: четыре торфяника, лежащие вдоль тропы Кулика по линии Ванавара — заимка Кулика; болота Куликовской котловины, расположенной в центре района падения метеорита; Западное болото, лежащее в 45 км к юго-западу от этой котловины. Крупнобугристые торфяники здесь представляют собой комплекс крупных (до 6–7 м высотой) многолетнемерзлых торфяных бугров с талыми, обильно увлажненными межбугровыми понижениями (мочажинами). В основе такого бугра располагается мерзлое минеральное ядро, сложенное в одних массивах супесями, в других — суглинками или глинами. Цвет от сизого до сизо-синего свидетельствует о значительном оглеении подстилающих торфяник грунтов; их буроватые тона наблюдались только по периферии массивов на молодых мелкозалежных участках. Минеральное ядро бугра, как шапкой, покрыто слоем торфа различной мощности; его максимальная мощность (более 3 м) была обнаружена на Северном болоте [18].

Ю.А. Львов с соавторами [18] указывают, что в обследованном районе имеются бугристые торфяники, находящиеся на разных стадиях развития. Наиболее молодые из них обнаружены в долине реки Макикта (около 61° с.ш.). Они еще не имеют ярко выраженного бугристого рельефа и разделены на крупные участки только ложбинами стока. Растительный покров их представлен кустарничково-сфагновой группировкой с основой из мха *Sphagnum fuscum Klinggr.* Торфяник подобного типа имеется и в Метеоритной котловине к западу от истоков ручья Чургим. Торфяник Каровый, расположенный в одном из ответвлений долины реки Макикта, находится на более поздней стадии развития. В его бугристой части имеется несколько крупных мочажин, еще не расчленивающих его на отдельные участки. Сам бугор плоский и широкий, высота его не превышает полутора метров. В строении растительного покрова положительных элементов рельефа этого массива наряду со сфагновыми мхами значительная роль принадлежит лишайникам. Наиболее поздние этапы развития рельефа крупнобугристых торфяников наблюдаются в северо-восточной части котловины. Здесь в результате термокарста положительные элементы рельефа представлены большим количеством небольших по площади изолированных бугров, многие из которых полностью или в значительной степени разрушены, остальные же подвержены интенсивной денудации [18].

Торфяная залежь бугров двухслойная. Верхний слой образован на неразрушенных частях бугров фускум-торфом, нижний же — разнообразными низинными торфами. Граница между этими двумя слоями обычно резкая, говорящая о быстрой смене растительности при смене условий водно-минерального питания в результате мерзлотного пучения. Ледяные включения имеются как в слое торфа, так и в грунте. В грунте лед наблюдается в виде тонких разветвленных прожилок, в торфе — или в виде ледяных линз правильной формы (причем в разных группах торфов размеры и отчасти форма линз различны), или в виде

заполненных пустот (в моховой группе торфов). Мощность ледяных линз — до 1 см. Крупная ледяная (ледо-грунтовая) линза в торфе была обнаружена Ю.А. Львовым и др. [18] только один раз, ее мощность составляла 65–67 см, залегала она в основании торфяной залежи (см. рис. 9).

Эпицентр взрыва от падения Тунгусского метеорита (60°54'07" с.ш., 101°54'16" в.д.) случайно практически совпал с центром разрушенного древнего вулкана (Куликовского палеовулкана), описанного в 1975 г. Н.Л. Сапроновым и В.М. Соболенко. Этот район представляет собой невысокое лесистое плато, находящееся в области спорадического распространения многолетнемерзлых грунтов. Нижняя ее граница на торфяниках залегает на глубине 25 м. В сухих бугристых торфяниках мерзлота оттаивает к концу лета лишь до 35–45 см от поверхности, в то время как в каменистых грунтах она отсутствует на глубине 1 м и даже более. Следствием распространения многолетнемерзлых грунтов в районе является мощное развитие процессов вспучивания бугров на торфяных болотах (с. 66 [5]).

В.А. Рукавишников сообщил, что по данным бурения на бугристом торфянике в северной части платформы напротив Метеоритной заимки многолетнемерзлые породы в августе залегают на глубине 0,5 м и кончаются на глубине 25 м [2]. Дальше идут водоносные супеси и пески. Наибольшая глубина буровой скважины была 31,5 м. При вскрытии буром водоносного горизонта вода в обсадной трубе резко поднялась на два десятка метров, что говорит о том, что она находилась под давлением.

На ровном участке размером 40×50 км, приподнятом примерно на 70 м над долинами соседних притоков Подкаменной Тунгуски — речек Кимчу и Хушмо, также встречены бугристые торфяники. Из них особо отмечаются два в виде островов в северной части болота [15]. Здесь наблюдается преобладание бугров над низинами и спокойное параллельное напластование слоев минеральных грунтов и торфа в пальза. Минеральное ядро бугров слегка выпуклое, граница его с торфом резкая.

Сусловская воронка (60°54' с.ш., 101°54' в.д.) имеет диаметр примерно 32 м, ее борта заросли кустарником, в отдельных секторах выросли деревья — березы, сосны, кедры. Особенно активный рост деревьев наблюдается на откосах траншеи, прорытой Л.А. Куликом в 1928 году в борту воронки для спуска воды из нее (на рис. 10 представлен разрез крупного бугра с сильнольдистым ядром на борту траншеи). Дно воронки к настоящему времени заросло болотной растительностью.

После спуска воды экспедицией Л.А. Кулика верхний моховой слой осел на дно воронки и она приобрела вид чаши. На ее дне были пробурены три скважины. Одна из них была на северном борту. Она прошла 25 м многолетнемерзлых грунтов и около 6 м водоносного горизонта. Вторая скважина была пробурена в центре воронки в мерзлом грунте до глубины 20 м, а затем работа была приостановлена из-за обводнения. Третью скважину пытались бурить на южном борту воронки.

В 1998 г. с помощью георадара «Лоза» была изучена внутренняя структура Сусловской воронки до глубины 20 м.



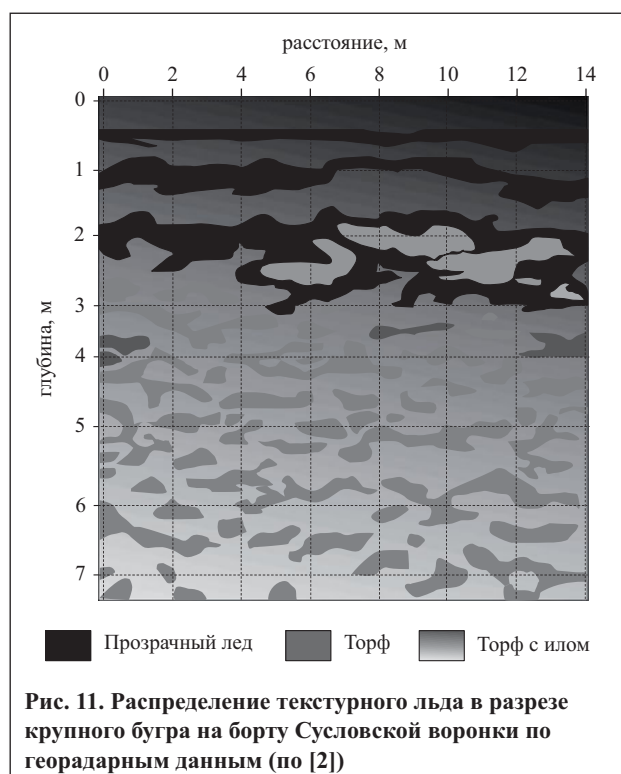
В 2009 г. в лесу в южной части Северного болота на площади диаметром 100 м по геоботаническим контурам болотной растительности были выявлены четыре воронки. С помощью георадара была изучена их конусная структура. К югу от Сусловской воронки на расстоянии примерно 60 м были найдены еще две структуры — сдвоенная и строенная воронки. Они также были изучены с применением георадара. На расстоянии примерно 60 м от северной границы Южного болота были найдены три соединенные воронки, расположенные полукругом. Еще одна воронка была обнаружена на северной границе этого болота. В 2010 г. была проведена георадарная съемка вдоль траншеи Л.А. Кулика и далее вдоль западного борта Сусловской воронки [1, 2] (рис. 11).

Ю.А. Львовым с соавторами [18] изучено еще несколько массивов крупнобугристых торфяников в смежных районах. Цветковский торфяник расположен в 7 км (по тропе Л.А. Кулика) от поселка Ванавара. Он залегает в неглубокой депрессии рельефа и представляет собой торфяник центрального типа — с одним обширным бугром, измятым и частично расчлененным термокарстом. Этот участок подробно описан в работе Л.В. Шумиловой [38], обследовавшей его в 1929 г. За последующие 30 лет произошло, видимо, некоторое изменение растительного покрова, выразившееся в увеличении площади лишайниковой формации за счет сокращения площади моховой дернины, а также увеличения площади мертвопокровных участков.

На участке чистой фускум-дернины на восточном склоне бугра недалеко от его подножия (ввиду сильного разложения верхних горизонтов торфа на вершине пальза) был заложен шурф. Здесь была обнаружена сравнительно маломощная (87 см) залежь торфа, подстилаемая темно-бурой глиной со следами оглеения. Залежь построена следующим образом: с поверхности до глубины 50 см идет чистый фускум-торф с постепенно повышающейся до 15% степенью разложения. В слое на глубине 50–55 см пятна слабо разложившегося фускум-торфа внедрены в торф высокой (30%) степени разложения, состоящий из остатков травянистых растений. Ниже идут низинные торфа, в составе которых встречаются листья низинных сфагновых мхов, почти исчезающие с глубиной, обильны кора и листья березы, остатки низинных пушиц, вахты и пр. Степень разложения этого слоя

30–35%. В придонном слое, располагающемся на глубине 80–87 см от поверхности, торф на три четверти образован корой березы и макроскопическими остатками ее древесины. Видимо, этот участок сравнительно недавно — не более 100–150 лет назад — был занят олиготрофной растительностью в результате мерзлотного поднятия окрайков болота, примыкающих к буграм [18].

Торфяник Чамбинский расположен на правобережной надпойменной террасе реки Чамба и представляет собой сложный комплекс лесных и гипново-осоковых мелкозалежных низинных болот различных типов, среди которых островом возвышается крупнобугристый участок, частично отчлененный от основной площади террасного болота невысокой грядой суходола. 11 июля мерзлые породы на ровных участках, покрытых дерниной мха *Sphagnum fuscum*, находились на глубине от 35,5 до 40,5 см, под пологом кустарников они залегали на 4–5 см выше, а на местах, лишенных растительности, опускались до 42–45 см. Мочажины



были тальми до самого дна. Шурф был заложен на вершине бугра пучения: сверху залегал торф, а на глубине 160 см обнаружился оглеенный песок [18].

Торфяник Каровый залегает в карообразной котловине на склоне долины реки Макикта. Здесь бугры низкие (высотой 1,0–1,5 м), плосковершинные, с крупнокочковатым микрорельефом, густо заросшие кустарничками и кустарниками, среди которых по периферии пальза преобладает береза приземистая (*Betula humilis Schrank*), образующая обширные куртины преимущественно там, где нарушен моховой покров. В центральной части бугров обилён багульник, здесь же сохранился и мох *Sphagnum fuscum*.

Метеоритная котловина занята бугристым массивом периферийного типа, причем в наиболее пониженной ее части развито обширное талое низинное Южное болото, а бугристые торфяники, составляющие с ним единую систему, располагаются по пологим склонам котловины в виде трех крупных языков, средний из которых получил название Центрального торфяника. Степень термокарстовой расчлененности бугристых участков увеличивается при приближении к Южному болоту, так что в его пределы внедрены отдельно стоящие бугры, например Северные острова.

Языки болота отличаются друг от друга возрастом и степенью деградации мерзлоты и торфяной залежи, а в связи с этим и сложностью рельефа, строением и составом растительного покрова и т.д. Бугры восточного языка, расположенного к востоку от горы Стойковича, подвержены наиболее интенсивному разрушению. Большие по площади участки пальза здесь просели настолько, что выше уровня воды находятся только отдельные их останцы высотой 3–4 см. Торф на них рассечен трещинами, на обнаженных участках он рассыпается в пыль, в отдельных случаях на крутых склонах он оползает целыми глыбами или осыпается под ногами.

Более крупные бугры поросли высокоствольным (до 12–15 м высотой) лиственнично-березовым лесом или покрыты зарослями карликовой березки. Часть деревьев, росших по урезу воды, в настоящее время опрокинута в мочажины вместе с оползшими глыбами торфа. На других болотах авторам работы [18] не встречался так далеко зашедший процесс разрушения бугров.

Центральный торфяник в 1929 г., по сообщению Л.В. Шумиловой [38], имел несколько иной растительный покров, чем в начале 1960-х гг. Мох *Sphagnum fuscum* являлся фоновым растением, занимая положительные элементы рельефа (в частности, вся плоская вершина бугра от Суловской воронки до Кобаевого острова была занята фускум-формацией). В 1960 г. фоновым растением стал лишайник, участки чистой дернины сфагновых мхов без примеси лишайников сохранились только за Кобаевым островом и у подножий гор Эйхвальда и Лысая. На большей части Северного болота мох *Sphagnum fuscum* отступил на вершины кочек, но и там его дернина смешана с лишайниками [18].

Деревья (лиственница, береза пушистая) встречаются только по окрайкам бугристого комплекса, или же береза приурочена к склонам мочажин. Пышная молодая поросль березы развилась по бортам траншеи у

Суловской воронки. Лиственница, пережившая падение Тунгусского метеорита, имеет хорошо сформированную новую крону. Некоторое изменение состава растительного покрова в сторону большего участия лишайников произошло с 1930 по 1960 г. Причина этого явления не связана с метеоритом [18].

Совершенно иное строение имеет растительный покров изолированно расположенных в пределах Южного болота Северных островов, представляющих собой два измятых термокарстом бугра, разделенных провальной мочажинной. Моховой и даже лишайниковый ярусы здесь полностью отсутствуют, только изредка можно обнаружить небольшие кочки мха *Polytrichum alpestre*. На поверхности этих бугров наблюдаются многочисленные стволы и выворотни лиственниц, позволяющие предположить, что до катастрофы бугры были покрыты лиственничным лесом с диаметром стволов деревьев 20–25 см. Исходя из описаний Л.В. Шумиловой [38] и наблюдений Ю.А. Львова и др. [18] на бугристых болотах, расположенных вне района повала леса, подобного размера деревья развиваются в тех частях бугров, где отсутствует моховая дернина и не происходит увеличения слоя торфа. Видимо, и до 1908 г. моховая растительность на изолированных буграх Южного болота не была развита, а травяно-кустарничковый ярус по составу был близок к современному.

Обращает на себя внимание пестрота строения нижних горизонтов залежи, сложенных низинными торфами, которая свидетельствует о комплексности, сложности строения низинных болот, давших начало центральному торфянику, и о различных путях сукцессионной смены растительности разных участков болота.

Южное болото залегает в наиболее пониженной части котловины и представляет собой низинное осокково-гипновое болото с грядово-мочажинным типом поверхности. Максимальная глубина (7 м) — в его центре. Сброс избыточных вод осуществляется ручьем Чургим. По очень пологим берегам низинного болота, как уже отмечалось выше, расположены крупнобугристые комплексы. Там, где наклон бортов ложа превышает 30–35°, низинные группировки вплотную подходят к берегу, а в местах меньшего наклона берегов развиваются своеобразные мерзлые бугры, имеющие вид валов высотой 2,5–3,0 м, шириной 15–20 м и длиной 50–100 м. Эти валы вытянуты параллельно береговой линии. Обычно вдоль нее тянется один, реже два рядом расположенных вала. В западной же части болота у истоков Чургима валы скапливаются по нескольку, будучи отделенными друг от друга узкими (15–30 м) и длинными очень топкими мочажинами. Истоки ручья прокладывают себе путь (ложбину) поперек каждого очередного вала и теряются, проходя через мочажину.

Рельеф валов неровный, отдельные точки их поверхности превышают уровень воды в мочажине на 4,5–5,0 м. Торфяной слой весьма разрушен, так что иногда при прикопке на глубине 30–50 см обнаруживается минеральный грунт, однако в других случаях обнажения показывают мощность торфяного пласта 1,5–2,0 м [18].

В 1939 г. Л.А. Кулик [15], производя зондировку участка дна Южного болота, обнаружил, что в неко-



торых придонных образцах небольшие по мощности слои торфа чередуются с тонкими прослойками грунта — «зеленого ила».

В северо-таежной зоне долины реки Котуй лесообразующей является лиственница. Кроме того, встречаются ель, береза и тополь. В подлеске наиболее распространены ива, ерник, ольха. Напочвенный покров — мохово-лишайниковый. По долинам развиты ерничково-моховые редколесья. Крупнобугристые болота — с кустарниково-моховыми буграми и пушицево-моховыми мочажинами.

### 2.3. Южные участки распространения миграционных бугров пучения в Нижнем Приангарье

Многолетнемерзлые породы с буграми пучения отмечены близ быстро развивающегося города Козинска ( $58^{\circ}41'00''$  с.ш.,  $99^{\circ}11'00''$  в.д.), расположенного в 12 км от створа гидроузла Богучанской ГЭС на реке Ангаре. Они встречаются в долинах ручьев и оврагов, на заболоченных участках, на затененных и залесенных склонах северной экспозиции. Мощность ММП изменяется от 0,5 до 10–15 м. Их температура колеблется от  $0,1^{\circ}\text{C}$  до минус  $0,5^{\circ}\text{C}$ . Встреченные здесь бугры пучения приурочены к заболоченным участкам, долинам ручьев и падям, т.е. к участкам с большой мощностью суглинистых рыхлых грунтов.

Л.В. Карпенко [12] исследовала многолетнемерзлый бугристый торфяник в акватории будущего водохранилища Богучанской ГЭС в долине реки Кова ( $58^{\circ}12'$  с.ш.,  $100^{\circ}10'$  в.д.) и обнаружила, что по краям переходных болот на первой надпойменной террасе встречаются бугры пучения с сильнольдистым и даже ледяным ядром. Мощность торфа здесь варьирует от 0,25 до 1,50 м. Под бугорково-мочажинными комплексами встречаются линзы льда, которые залегают на глубине 0,3–0,4 м, по краям болот нередки бугры пучения, сложенные чистым льдом (с. 113 [12]).

На значительной части территории вблизи поселка Таежный ( $58^{\circ}04'$  с.ш.,  $97^{\circ}18'$  в.д.) Богучанского района отмечены условия, благоприятные для морозного пучения. Пальза встречены на левобережных пологих склонах долин рек Карабула ( $58^{\circ}36'$  с.ш.,  $97^{\circ}02'$  в.д.) и Кунчет ( $58^{\circ}36'$  с.ш.), а также на склонах северо-западной и северо-восточной экспозиции в устье реки Кунчет. Среднегодовая температура воздуха здесь составляет минус  $2,5^{\circ}\text{C}$ . Продолжительность периода с отрицательными средними месячными температурами составляет 150–170 дней. Самый холодный месяц — январь, средняя многолетняя температура января — минус  $24,4^{\circ}\text{C}$ , июля — плюс  $17,2^{\circ}\text{C}$ . Среднегодовая сумма осадков равна 400–450 мм, высота снежного покрова зимой достигает 100 мм. Основной тип растительности — сосновые сообщества. Постоянными спутниками сосновых сообществ являются кустарники и кустарнички: кустарная ольха, кедровый стланик, различные березки, багульник, голубика, толокнянка, брусника и некоторые другие. При этом во многих случаях напочвенный ярус из мхов или лишайников бывает выражен слабо и не определяет характеристики сообществ.

Бугристые формы описаны даже на острове Ольхон ( $53,15^{\circ}$  с. ш.  $107,38^{\circ}$  в.д.) на озере Байкал (рис. 12).

### 2.4. Южные места распространения миграционных бугров пучения в Алдан-Тимптонском междуречье

Выпуклобугристые торфяники на юге Якутии встречаются на старичных участках террас по периферии термокарстовых озер. В большинстве случаев они занимают небольшую площадь и представляют собой массивы из отдельных или нескольких куполообразных торфяных бугров высотой 3–5 м и диаметром 5–20 м [37].

В Южной Якутии трасса ТС ВСТО-1 пересекает участки с многолетними буграми пучения. Например, бугристый массив в долине реки Хатынг-Уэя (приблизительно  $58^{\circ}$  с.ш.) в 200 км западнее города Олекминска пересечен ВСТО-1 и существенно деградировал к настоящему времени (рис. 13). Заметно изменены бугры в пределах долин рек Халдя, Никак, Васильевка, Аччыгый-Леглегер, Горбыллах, ручья Озерный (рис. 14–17). В межбугристых понижениях в долине реки Халдя (40 км южнее стационара Керак) вдоль трассы ВСТО-1 скапливается мощный снежный покров, оказывающий отепляющее воздействие на грунты, и в летнее время эти участки обводнены, здесь развивается термокарст. В долине реки Керак организован стационар по наблюдению за динамикой миграционных торфяных бугров пучения ( $57^{\circ}58'$  с.ш.,  $125^{\circ}30'$  в.д.). Здесь их высота обычно около 2 м, но наиболее крупные бугры достигают высоты 5 м. Вершины бугров и понижения покрывают кедровый стланик, багульник, березка Миддендорфа, брусника. Мощность торфа на бугре превышает 1 м. По радиоуглеродным данным (см. таблицу), возраст торфа близ подошвы составляет  $4205 \pm 55$  лет [35].

Е.Н. Оспенников и др. [24, 25] и Ю.В. Станиловская [30] исследовали торфяной массив Горбыллах ( $56^{\circ}25'$  с.ш.,  $124^{\circ}53'$  в.д.) с многолетними буграми пучения, расположенный южнее города Нерюнгри в Верхнегорбыллахской тектонической депрессии (рис. 18–20) в верхней части долины одноименной реки на абсолютной высоте 800 м. По периферии одного из озер расположено шесть бугров пучения высотой от 2 до 6 м. Самый высокий 6-метровый бугор имеет овальную форму (вытянут с востока на запад) и является куполообразным, с плоской слабовыпуклой вершиной, по которой



Рис. 12. Мерзлые торфяные бугры пучения на острове Ольхон на Байкале (фото А. Рыбченко)



Рис. 13. Бугристый массив в долине реки Хатынг-Уэся в 200 км западнее города Олекминска вдоль трассы ТС ВСТО-1 (фото Ю.В. Станиловской, май 2011 г.)



а)



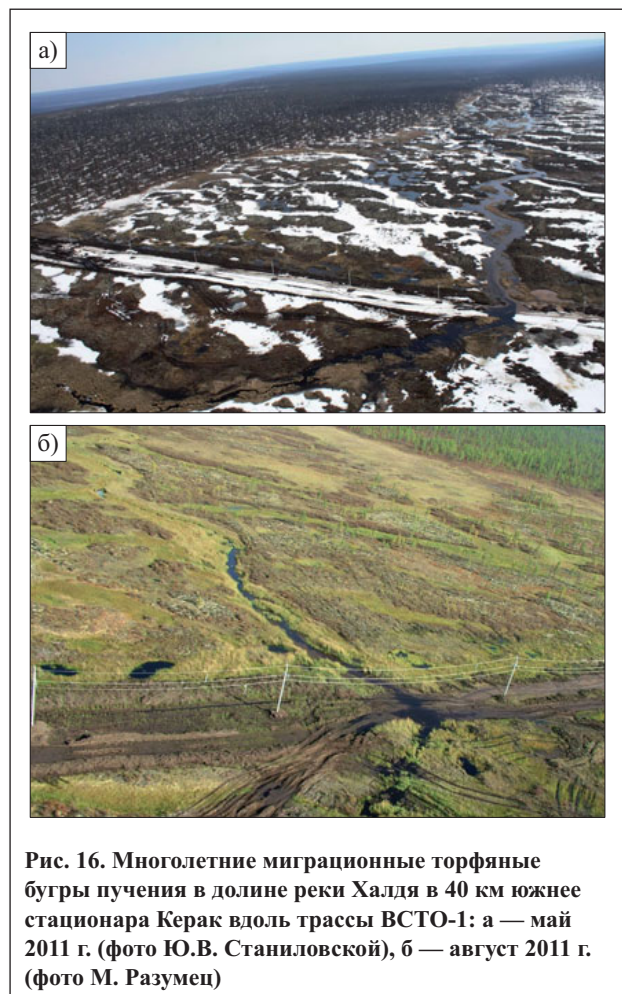
б)

Рис. 14. Быстрое протаивание многолетнемерзлых грунтов и миграционных бугров пучения в долине ручья Озерный в 10 км южнее стационара Керак (Южная Якутия) вдоль трассы нефтепровода ВСТО-1: а — август 2010 г. (фото Ю.В. Станиловской), б — август 2011 г. (фото М. Разумец)

проходит продольная трещина длиной 14 м, шириной 5 см и глубиной 10 см. В морфологии бугра достаточно четко выражен приподнятый на 0,5–1,0 м вытянутый пьедестал (повторяющий форму основания бугра), ограниченный невысокой выраженной ступенькой, которая, однако, не выдерживается по всему периметру.



Рис. 15. Многолетние миграционные торфяные бугры пучения в долине реки Аччыгый-Леглегер в 20 км южнее стационара Керак. На ближнем плане — трасса ВСТО-1, притрассовая дорога и срезанный торфяной бугор пучения (фото М. Разумец, август 2011 г.)



**Рис. 16.** Многолетние миграционные торфяные бугры пучения в долине реки Халдя в 40 км южнее стационара Керак вдоль трассы ВСТО-1: а — май 2011 г. (фото Ю.В. Станиловской), б — август 2011 г. (фото М. Разумец)

Растительный покров данного бугра представлен угнетенными лиственничными лесами с подлеском из березы Миддендорфа и кедрового стланника. Распределение растительности неоднородно: на склоне южной экспозиции произрастают карликовая березка Миддендорфа высотой до 0,7 м и голубика, склон северной экспозиции покрыт моховым покровом с отдельными кустарничками (багульник). В сплошном моховом покрове между описываемым пальза и сосед-



**Рис. 17.** Многолетние миграционные торфяные бугры пучения на участке Керак (Южная Якутия, август 2008 г., фото Ю.В. Станиловской)

ними буграми господствуют мхи *Polytrichum strictum* и *Sphagnum riparium* [30].

Практически весь торфяной покров бугра сложен сфагновым низинным торфом. В составе торфа преобладают остатки растений, предпочитающих избыточное увлажнение, — сфагновых мхов (*Sphagnum riparium*, *Sphagnum lenens*), примерно 10% пушицы (*Eriophorum*). Встречены единичные остатки осоки топьяной (*Carex limosa*), зеленых мхов (*Drepanocladus*), коры березы (*Betula*) и древесины хвойных деревьев. В состав торфа, залегающего с поверхности на вершине бугра, входит 95% остатков зеленых мхов (*Polytrichum strictum*), а также 5% сфагновых мхов (*Sphagnum riparium*).

Состав растительных остатков свидетельствует о том, что бугор сформировался очень быстро, до того как начал накапливаться настоящий верховой торф. До глубины 0,8 м залегает сфагновый низинный торф с уменьшающейся от 25 до 15% (с глубиной) степенью разложения и разной зольностью (от 5,60 до 12,72%). В составе этого торфа преобладают сфагновые мхи

Таблица

Радиоуглеродные даты торфяных бугров пучения в южных районах криолитозоны Средней Сибири (Южная Якутия)				
Место взятия образца	Глубина, м	Радиоуглеродная дата, лет	Лабораторный номер образца	
Бугор пучения высотой 4–6 м в торфяном массиве Суоллах в Алдано-Тимптонском междуречье (по [24])	0,20	3420 ± 50	ГИН-4355	
	2,30	8950 ± 70	ГИН-4356	
	2,50	10750 ± 80	ГИН-4357	
	2,70	9940 ± 60	ГИН-4358	
	2,90	9990 ± 90	ГИН-4359	
	3,30	9910 ± 80	ГИН-4360	
	3,50	10120 ± 120	ГИН-4361	
	3,90	10610 ± 70	ГИН-4362	
Бугор пучения в долине реки Горбыллах (определение возраста выполнено по образцам, отобранным Ю.В. Станиловской в 2006 г.)	вершина	0,18	2870 ± 210	ГИН-13947
	подножие	0,45	2170 ± 240	ГИН-13949
		0,65	2570 ± 110	ГИН-13950
Бугор пучения в долине реки Керак	1,00	4205 ± 55 лет	-	





Рис. 18. Миграционные бугры пучения на правом берегу озера в долине реки Горбыллах и срезанные бугры вдоль трассы ВСТО-1. Справа вдали виден полигональный рельеф (фото Ю.В. Станиловской, август 2010 г.)

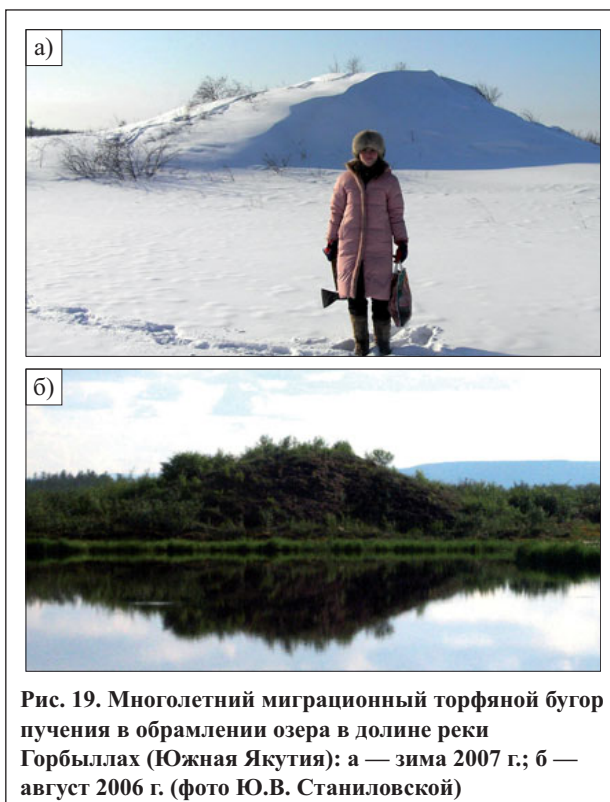


Рис. 19. Многолетний миграционный торфяной бугор пучения в обрамлении озера в долине реки Горбыллах (Южная Якутия): а — зима 2007 г.; б — август 2006 г. (фото Ю.В. Станиловской)

*Sphagnum riparium*, *Sphagnum lenense*, *Sphagnum sect. Acutifolia*; встречаются также зеленые мхи *Drepanocladus*, *Calliergon stramineum*, *Aulacomnium* и осока *Carex limosa*. Обнаружены также остатки коры березы (*Betula*) и древесины хвойных деревьев.

На склоне торфяного бугра с поверхности залегает слой переходного торфа с увеличивающейся (вниз по разрезу) от 15 до 20% степенью разложения и зольностью, изменяющейся от 10,32 до 26,53%. В составе переходного торфа преобладают сфагновые мхи (*Sphagnum compactum* — 70%, *Sphagnum fuscum* — 45%, *Sphagnum riparium* — 45%). Также встречены единичные включения зеленых мхов (*Drepanocladus*), осоки топяной (*Carex limosa*) и древесины хвойных деревьев. Под переходным торфом залегает сфагновый низинный торф со степенью разложения 27% и зольностью 7,47%. В его составе преобладают сфагновые мхи (*Sphagnum riparium* — 80%) и встречены единичные остатки зеленых мхов (*Drepanocladus*), коры березы (*Betula*) и древесины хвойных деревьев.

У подножия бугра залегают низинные торфа с увеличивающейся (с глубиной) от 10 до 25% степенью разложения и растущей от 4,9 до 9,4% зольностью. В их составе преобладают сфагновые мхи (*Sphagnum ripa-*

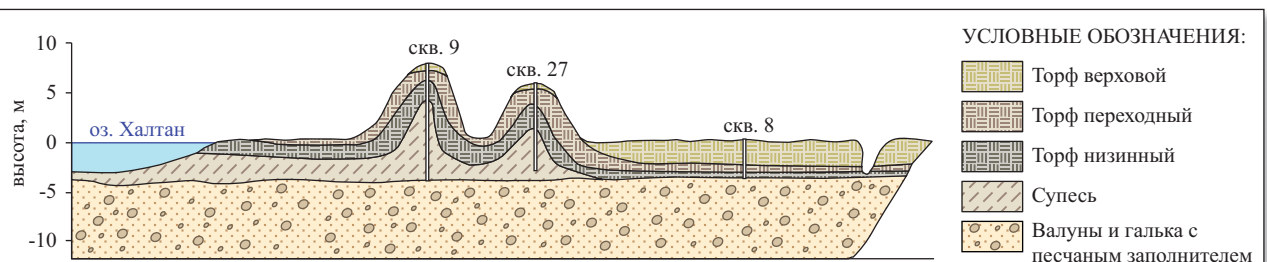


Рис. 20. Схематический разрез болотного массива в верховьях реки Горбыллах в Южной Якутии (по [25])



rium — 80—90%, *Sphagnum lenense* — 20%), встречаются единичные включения зеленых мхов (*Polytrichum*, *Drepanocladus*) и пушицы (*Eriophorum*) [30].

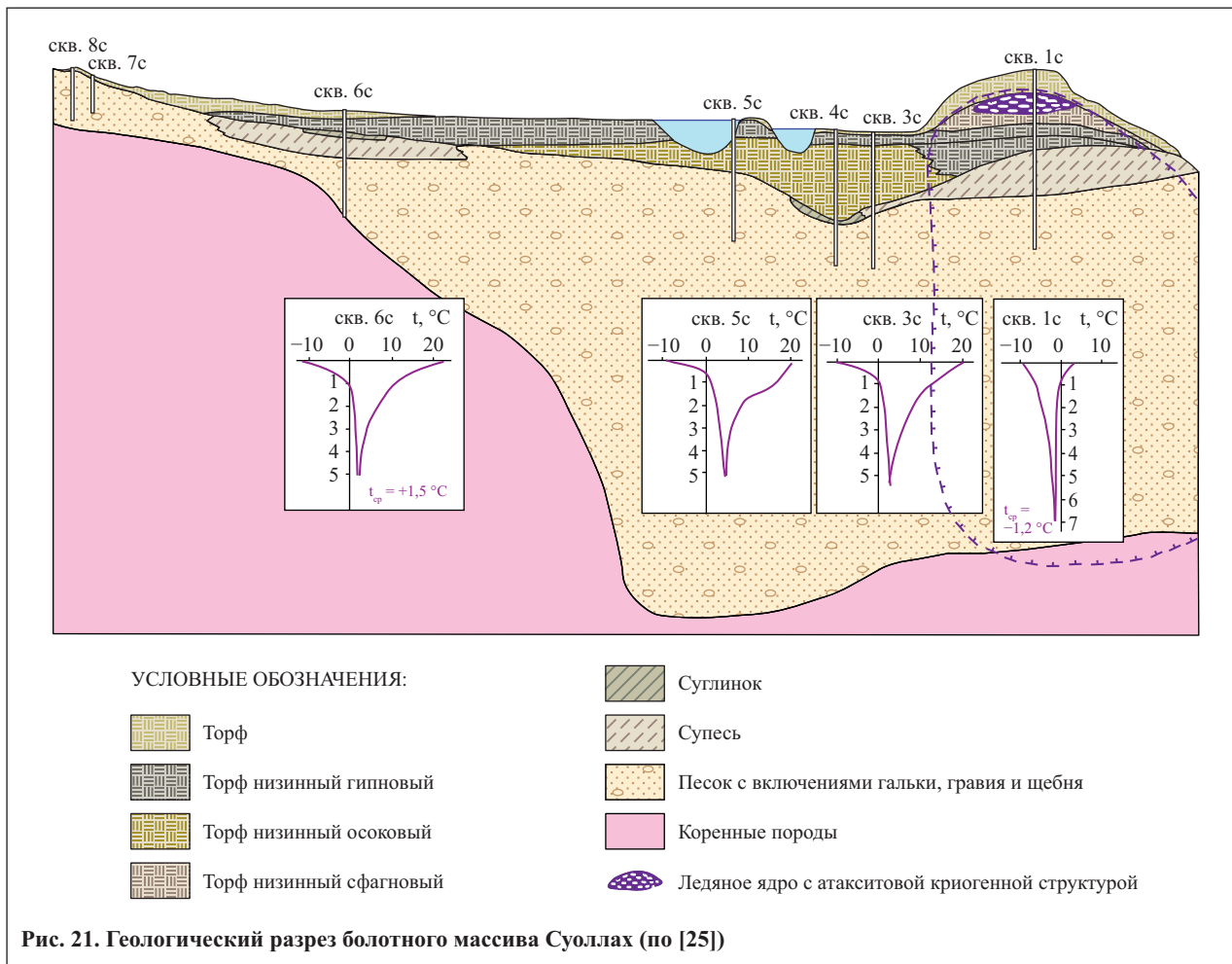
Вокруг описываемого бугра пучения сильно обводненные понижения заполнены переходным торфом с зольностью 5,08%. В составе переходного торфа преобладают сфагновые (*Sphagnum balticum*, *Sphagnum magellanicum* — 55%) и зеленые (*Polytrichum* — 45%) мхи. Согласно данным радиоуглеродного анализа бугор пучения на участке Горбыллах сформировался не ранее чем 2870 лет назад (см. таблицу). Интересно, что палза высотой до 8 м, сформировавшиеся почти на той же широте (57°45 с.ш., 76° з.д.) в долине реки Бонифейс в Канаде начали формироваться не ранее чем 1800 лет назад [40].

Крупные многолетние бугры пучения исследованы на заболоченных участках дна долины реки Горбыллах. Здесь в районе озера Халтан площадь болотного массива составляет около 5 км<sup>2</sup>. По мере удаления от озера низинные болота сменяются на мезотрофные и верховые. Мезотрофные болота этого вида простираются в виде каймы шириной до 100 м. Бугры пучения приурочены к приграничной зоне переходных и верховых болот. Высота бугров достигает 8 м, а диаметр у основания — 20–30 м. Они сложены преимущественно низинным и переходным торфом мощностью около 3 м, подстилаемым супесью. В основании разреза залегает валунно-галечниковый горизонт с песчаным заполнителем. Как полагают Е.Н. Оспенников с соавторами [25], многолетнее промерзание тор-

фяника и подстилающих его аллювиальных отложений с образованием бугров пучения происходило на этапе перехода его питания от грунтового к атмосферному. Этот этап четко фиксируется резким уменьшением степени разложения торфа до 5–15% по сравнению с 60–75% в нижней части разреза. По-видимому, эти процессы происходили сравнительно недавно, о чем свидетельствует практически полное отсутствие на поверхности бугров торфа верхового типа.

Разрез бугра пучения в днище долины реки Горбыллах представлен торфом мощностью 2,5 м, мерзлым с глубины 0,8 м, подстилаемым переслаивающимися горизонтами супеси, суглинка и песка. Верхний горизонт торфа имеет массивную и микролинзовидно-слоистую криотекстуру; льдистость этого горизонта не превышает 20–30%. Ниже по разрезу криотекстура меняется на атакситовую, линзовидно-сетчатую и крупношпировую, нередко косослоистую, что отражает специфические условия промерзания отложений в краевых частях болотных массивов; льдистость здесь возрастает до 70–95%. Такое распределение льдистости торфа отмечено и по другим скважинам, пробуренным в болотах такого типа (более 300 определений).

Е.Н. Оспенниковым в Южной Якутии изучены три болотных массива с буграми пучения [23, 24]. Два из них (Дерпут и Суоллах) образовались при заторфовывании озер и расположены на Чульманском плато, а третий (Алексеевские болота), возникший при заболачивании минеральных почв, находится на Алданском плоскогорье.



Болотный массив Дерпут приурочен к неотектоническому блоковому понижению в верхней части долины одноименной реки (абс. отм. около 700 м), сложенному сверху озерно-болотными отложениями мощностью 20–25 м. Многолетнемерзлые грунты имеют здесь прерывистое и островное распространение со среднегодовыми температурами от 0 до минус 2°C. В болотном массиве, на поверхности которого существует верховое лиственнично-кустарничково-сфагновое болото, среднегодовая температура грунтов составляет минус 1,4 — минус 2,0°C. Под термокарстовыми озерами развиты талики со среднегодовой температурой до плюс 2,5°C [23].

Болотный массив Суоллах находится примерно в 15 км от массива Дерпут и располагается в приводораздельной седловинной части долины одноименного ручья (абс. отм. около 750 м). Водораздельная седловина выполнена 20–25-метровой толщиной песка (с включениями мелкой гальки, гравия и щебня), супесью и суглинком (рис. 21). Сверху залегает торфяной горизонт мощностью до 4,5 м. На бугристой поверхности массива развито кустарничково-сфагновое болото. Среднегодовая температура грунтов по данным режимных геотермических наблюдений составляет здесь минус 1,8 — минус 2°C [23].

Суммарная льдистость торфа варьирует по разрезу от 50% в горизонтах с мелкими включениями льда до

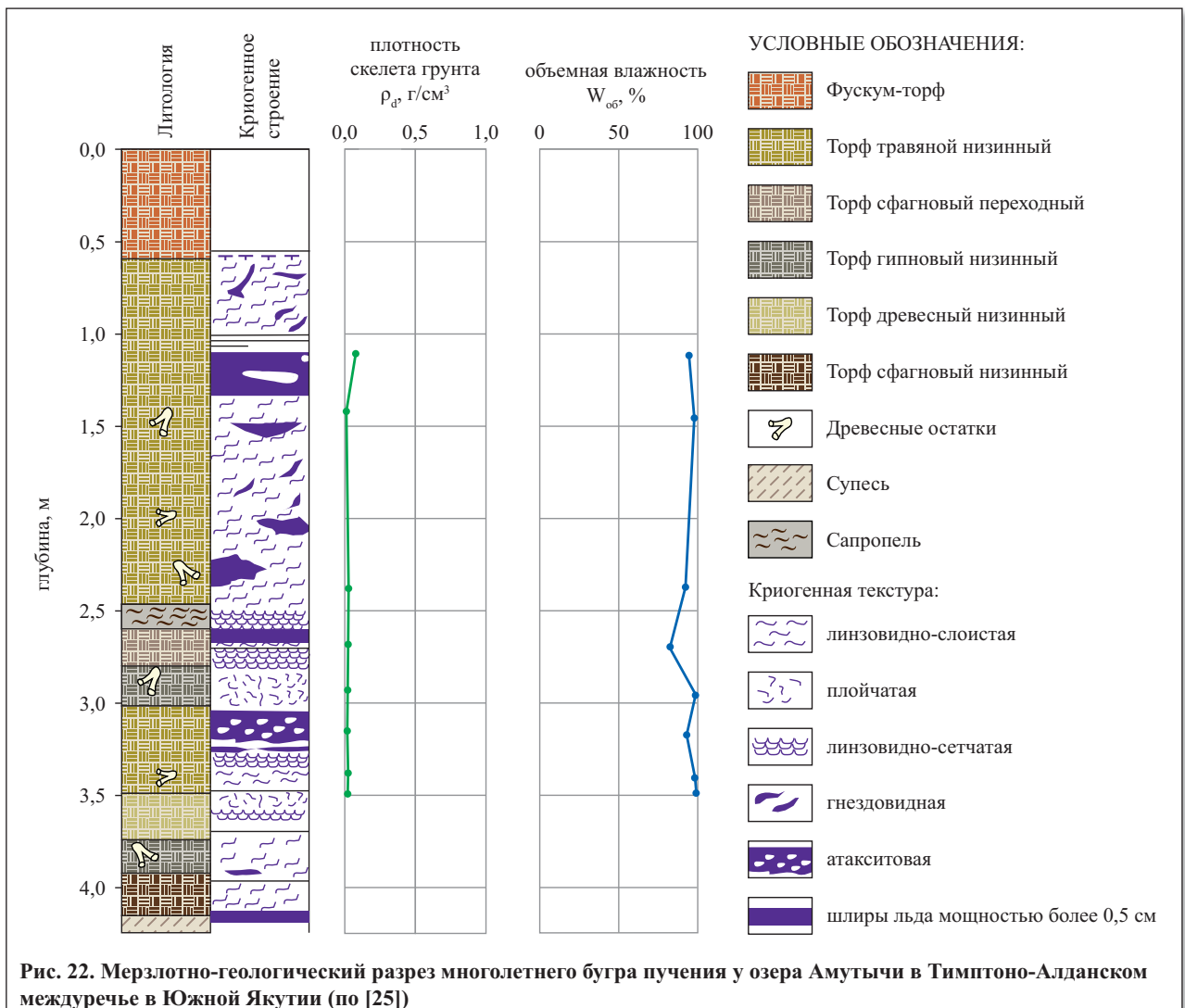
80–90% в горизонтах с атакситовой криотекстурой и крупными шлирами льда. В целом льдистость торфа довольно высокая по всему разрезу, что указывает на то, что осадки промерзали в слаболитифицированном водонасыщенном состоянии.

Криогенное строение низинного и переходного торфа в нижней части торфяной толщи характеризуется преобладанием шлировых и линзовидно-сетчатых и атакситовых криотекстур, объемная льдистость достигает 90%.

Для верхового торфа, в виде тонкого слоя залегающего на поверхности бугров, характерно практически полное отсутствие шлировых и сетчатых криотекстур. Преобладают микролинзовидно-слоистые текстуры с отдельными линзами льда мощностью до 1 см. Льдистость верхового торфа сокращается до 60–80%.

Незначительная мощность горизонта сапропеля, который часто накапливается в отложениях торфяников, образующихся на месте водоемов, а также их большая запыленность и заторфованность свидетельствуют о том, что озеро, в котором начался процесс торфонакопления, было мелким и существовало в течение непродолжительного времени [25].

На контакте торфа и минерального грунта отмечены прослойки чистого льда мощностью от 40 до 130 см, скорее всего, представляющие ледяное ядро бугра. С глубины 4,5 м льдистость резко снижается до 10–20%.





Криотекстура в основном гнездовидная, массивная. Крупные шлиры и включения льда встречены на глубине 5,3–5,5 и 6,6–7,2 м.

Существенное отличие криогенного строения и распределения льдистости бугров пучения, формирующихся в болотах верхового типа от таковых у пальза, растущих в болотах, проходящих стадии развития от низинных к верховым, заключается в том, что льдистые ядра первых имеют неглубокое залегание и формируются в нижней части торфа и/или на контакте торфа с подстилающим минеральным грунтом.

Е.Н. Оспенниковым с соавторами [25] исследованы многолетние бугры пучения в пределах болот Алдано-Тимптонского междуречья. Один из них расположен на водоразделе рек Унгра и Алдакай вблизи озера Амутычи в пределах торфяника, образовавшегося на месте другого озера. При бурении на этом бугре вскрыт торф мощностью более 4 м, мерзлый с глубины 0,5 м. В нем встречен прослой сапропеля, подстилаемый озерной супесью. В торфе отмечены линзовидно-слоистая, линзовидно-сетчатая, атакситовая и крупношлировая криотекстуры (рис. 22).

Отдельные острова ММП с близкой к 0°C среднегодовой температурой и мощностью до 40–50 м могут быть встречены в разных частях Южной Якутии, в частности в районе поселка Беркакит (56°34'22" с.ш., 124°46'30" в.д.) вдоль Амуро-Якутской железнодорожной магистрали и автодороги «Лена» (рис. 23).

В Центральной Якутии и Ангаро-Ленском регионе миграционные бугры пучения на торфяниках широко распространены в долинах мелких рек и на плоских заболоченных водораздельных пространствах [10, 29, 35–37] в таежном Приангарье, в бассейнах рек Лена, Киренга, а также по днищам долин Лено-Манзурского и Кудино-Манзурского междуречий, сложенных сильнопучинистыми суглинисто-глинистыми грунтами [34].

Болота широко распространены в долине, где они приурочены к притеррасным участкам поймы и террасам, в меньшей степени — на водораздельных поверхностях, где развиты в котловинах спущенных и полупущенных озер (хасыреев). Наиболее крупные болотные массивы расположены в низовьях рек Агапа и Янгода, а также в районе впадения рек Дюрюса и Малая Дюрюса в Агапу. Все эти массивы сильно заозерены вследствие развитого термокарста. Болота представлены всеми стадиями развития полигональных комплексов — от гомогенных травяных до плоскобугристых торфяников. Для поверхностей террас более характерны плоскобугристые болота со значительно заторфованными буграми. В заболоченных хасыреех на водоразделах местами встречаются тундрово-болотные комплексы с крупными торфяно-минеральными выпуклыми буграми высотой до 1,0–1,5 м, чередующимися с пушицево-осоковыми и кустарниково-пушицевыми понижениями.

Говоря о прогнозе состояния бугров, следует упомянуть о том, что Г.В. Малкова с соавторами [19] полагают, что очаги минимальных трендов к потеплению (0,03–0,04°C/год) сконцентрированы на Лено-Оленекском междуречье и в среднем течении реки Енисей. Максимальные тренды (0,06°C/год и более) зафиксированы на юге Сибири и в Центральной Якутии. На



**Рис. 23. Бурение скважины для установки мерзлотомера Данилина в мерзлых толщах на южном пределе их распространения в районе поселка Беркакит в юго-восточной части Средней Сибири (фото К. Йошикавы, июль 2012 г.)**

юге Якутии, несмотря на сильное потепление климата, сохранилась высокая термическая устойчивость ММП, что объясняется большой изменчивостью толщины снега в последние десятилетия и преимущественной ролью зимнего охлаждения и характера снеготложений в формировании среднегодовых температур грунтов.

## Выводы

1. Бугры пучения — одно из самых распространенных криогенных явлений в Средней Сибири благодаря климатическим и гидрологическим особенностям данной территории.
2. В Средней Сибири ареал миграционных бугров пучения в северной части заходит в зону низкотемпературных многолетнемерзлых грунтов со сплошным их распространением.
3. Южный предел ареала бугров пучения в Средней Сибири совпадает с южной границей распространения многолетнемерзлых грунтов и проходит на западе региона южнее 55° с.ш., на востоке — близ широты 56° с.ш.
4. Миграционные бугры пучения существенно осложняют эксплуатацию магистральных трубопроводов, дорог, крупных объектов строительства, аэродромов. ❄️

*Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 11-05-01141) и федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2012–2013 гг. (лот 2012-1.1-12-000-1008, соглашение 8339). Аэровизуальное обследование коридора трассы ТС ВСТО-1 было выполнено Ю.В. Станисловской с коллегами из ИГЭ РАН в апреле–октябре 2011 г.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В.А., Алексеева Н.Г., Копейкин В. В. Результаты георадарного и водородного исследования импактных воронок Тунгусского метеорита в 2009 и 2010 годах // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 12. С. 1105–1108.
2. Алексеев В.А., Копейкин В.В., Алексеева Н.Г., Кривулин В.В., Пелехань Л.Г., Рукавишников В.А., Чечин В.А. Изучение импактных воронок Тунгусского метеорита // Материалы 4-й Конференции геокриологов России, МГУ, г. Москва, 7-9 июня 2011 г. Т. 1. С. 165–174.
3. Бердников Н.М. Бугры пучения в различных ландшафтах бассейна реки Надым // Криосфера Земли. 2012. № 2. С. 81–86.
4. Бобов Н.Г. Современное образование многолетнемерзлых бугров пучения на Лено-Виллойском междуречье // Известия АН СССР. Серия геогр. 1960. № 5. С. 64–68.
5. Васильев Н.В. Тунгусский метеорит. Космический феномен лета 1908 г. М.: НП ИД «Русская панорама», 2004. 372 с.
6. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Чижова Ю.Н. Выпуклые бугры пучения многолетнемерзлых торфяных массивов / под ред. 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. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Чижова Ю.Н. Миграционные бугры пучения на севере Западной Сибири: южный и северный пределы ареала и современная динамика // Инженерная геология. 2012. № 3. С. 62–78.
9. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Репкина Т.Ю. Миграционные бугры пучения в заполярной части криолитозоны Средней Сибири // Инженерная геология. 2013. № 2. С. 28–45.
10. Геокриология СССР. Средняя Сибирь / под ред. Е.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 414 с.
11. Драницин Д.А. О некоторых зональных формах рельефа Крайнего Севера // Почвоведение. 1914. № 4. С. 21–68.
12. Карпенко Л.В. Современное состояние болот проектируемой зоны затопления Богучанского водохранилища: материалы временных коллективов // География и природные ресурсы. 2009. № 1. С. 110–116.
13. Кац Н.Я. Типы болот СССР и Западной Европы и их географическое распространение. М.: Гос. изд-во географической литературы, 1948. 318 с.
14. Кашиперюк П.И., Трофимов В.Т. Типы и инженерно-геологическая характеристика многолетнемерзлых торфяных массивов. М.: Изд-во Московского ун-та, 1988. 183 с.
15. Кулик Л.А. Данные по Тунгусскому метеориту к 1939 г. // Доклады Академии наук СССР. 1939. Т. 22. № 8. С. 520–524.
16. Львов Ю.А., Бляхарчук М.А. Мерзлотный торфяник в центре области выпадения вещества Тунгусского метеорита // Метеоритные и метеорные исследования. Новосибирск: Наука, 1983. С. 84–99.
17. Львов Ю.А., Иванова Г.М. Провальные термокарстовые депрессии на крупнобугристых торфяниках района падения Тунгусского метеорита // Проблема Тунгусского метеорита. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1963. С. 48–58.
18. Львов Ю.А., Лагутская Л.И., Иванова Г.М., Мильчевский В.И., Райфельд А.Ф., Говорухин В.И., Бояркина А.П. Болота района падения Тунгусского метеорита // Проблема Тунгусского метеорита. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1963. С. 34–47.
19. Малкова Г.В., Павлов А.В., Скачков Ю.Б. Оценка устойчивости мерзлых толщ при современных изменениях климата // Криосфера Земли. 2011. Т. 15. № 4. С. 33–36.
20. Мельников В.П., Спасицев В.И. Криогенные образования в литосфере Земли: монография. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 344 с.
21. Мульдьяров Е.Я., Лапина Е.Д. Датировка верхних слоев торфяной залежи, используемой для изучения космических аэрозолей // Метеоритные и метеорные исследования. Новосибирск: Наука, 1983. С. 75–84.
22. Мульдьяров Е.Я., Лапина Е.Д. Эколого-фитоценотическая характеристика биофлоры района падения Тунгусского метеорита // Следы космических воздействий на Землю. Новосибирск: Наука, 1990. С. 133–140.
23. Оспенников Е.Н. Динамика геокриологических условий болотных массивов юга криолитозоны в голоцене // Материалы 3-й Конференции геокриологов России, МГУ, г. Москва, 1–3 июня 2005 г. Т. 3. С. 203–211.
24. Оспенников Е.Н. Об инверсии радиоуглеродных дат в торфяниках Сибири // Геокриологические исследования. М.: Изд-во Московского ун-та, 1991. С. 29–35.
25. Оспенников Е.Н., Трухи Н.И., Чижов А.Б., Чижова Н.И. Экзогенные геологические процессы и явления. М.: Изд-во Московского ун-та, 1980. 227 с.
26. Пономарева О.М., Гравис А.Г., Бердников Н.М. Современная динамика бугров пучения и плоскобугристых торфяников в северной тайге Западной Сибири (на примере Надымского стационара) // Криосфера Земли. 2012. № 4. С. 21–30.
27. Попов А.И. Вечная мерзлота в Западной Сибири. М.: Изд-во АН СССР, 1953. 230 с.
28. Пьявченко Н.И. К изучению болот Красноярского края // Заболоченные леса и болота Сибири. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 5–32.
29. Стамбовская Я.В. Изучение формирования многолетних бугров пучения на низких террасах р. Лены в Центральной Якутии // Материалы Международной молодежной конференции: «Современные проблемы и будущее геокриологии». Якутск. Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН, 2008. С. 26–28.
30. Станисловская Ю.В. Повторно-жильные льды и бугры пучения Южной Якутии и Северного Забайкалья // Дипломная работа. М.: МГУ, 2007. 86 с.
31. Сумгин М.И. Вечная мерзлота почв в пределах СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1937. 379 с.
32. Тьртиков А.П. Формирование и развитие крупнобугристых торфяников в северной тайге Западной Сибири // Мерзлотные исследования. 1966. Вып. 6. С. 144–154.
33. Тьртиков А.П. Лес на северном пределе в Азии. М., 1995. 144 с.
34. Угланов И.Н. Карстовый и мерзлотный рельеф Кудинско-Манзурского междуречья // Труды Иркутского гос. ун-та им. А.А. Жданова. Сер. геогр. 1958. Т. 24. Вып. 1. С. 125–141.
35. Урбан А.А. Особенности формирования процессов мерзлотного пучения на территории Якутии // Материалы 11-й Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов в г. Нерюнгри. Секции 1-2. Нерюнгри: Технический институт ЯГУ, 2010. С. 86–89.
36. Фотиев С.М., Данилова Н.С., Шевелева Н.С. Геокриологические условия Средней Сибири // Дипломная работа. М.: Наука, 148 с.
37. Хруцкий С.Ф. К истории формирования многолетнемерзлых пород и подземных льдов в грабнях Тимптоно-Гонамского района // Мерзлотные исследования. М.: Изд-во Московского ун-та, 1968. Вып. 8. С. 81–88.
38. Шумилова Л.В. О бугристых торфяниках южной части Туруханского края // Известия Томского отделения Русского ботанического общества. 1931. Т. 3. С. 1–13.
39. Akerman J. Observations of palsas within the continuous permafrost zone in eastern Siberia and in Svalbard // Geografisk Tidsskrift. 1982. № 82. P. 45–51.
40. Cyr S., Payette S. The origin and structure of wooded permafrost mounds at the arctic treeline in eastern Canada // Plant Ecology and Diversity. 2010. V. 3. № 1. P. 35–46.
41. Kolesnikov E.M., Kolesnikova N.V., Boettger T. Isotopic anomaly in peat nitrogen is a probable trace of acid rains caused by 1908 Tunguska bolide // Planetary and Space Science. 1998. V. 46. № 2–3. P. 163–167.
42. Kolesnikov E.M., Longo G., Boettger T., Kolesnikova N.V., Gioacchini P., Forlani L., Giampieri R., Serra R. Isotopic geochemical study of nitrogen and carbon in peat from the Tunguska Cosmic Body explosion site // Icarus. 2003. V. 161. P. 235–243.
43. Vasilchuk Yu.K., Vasilchuk A.C. The <sup>14</sup>C age of palsas in Northern Eurasia // Radiocarbon. 1998. V. 40. № 2. P. 895–904.
44. Wu Z., Barosh P.J., Wang L., Hu D., Wang W. Numerical modeling of stress and strain associated with the bending of an oil pipeline by a migrating pingo in the permafrost region of the northern Tibetan Plateau // Engineering Geology. 2008. V. 96. № 1–2. P. 62–77.