

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 551.345

DOI: 10.15372/KZ20250103

EDN: VERPVK

ПАРАГЕНЕЗИС ДЕГРАДАЦИОННЫХ И АГРАДАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ
В МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХФ.М. Ривкин^{1,*}, С.Н. Булдович², Д.А. Каверин³¹ Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, 625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия³ Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, 167982, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28, Россия

*Автор для контакта; e-mail: f-rivkin@narod.ru

Рассматриваются закономерности новообразования мерзлых грунтов вблизи южной границы распространения многолетнемерзлых пород в условиях положительного климатического тренда и их деградации. Новообразование многолетнемерзлых грунтов на фоне многолетнего оттаивания пород рассматривается как парагенетический процесс. Пространственная неоднородность морозного пучения и оттаивания грунтов приводит к образованию локальных неровностей на изначально плоских гидроморфных участках, где условия становятся благоприятными для новообразования мерзлых грунтов. Даже незначительная высотная дифференциация исходной поверхности (0.05–0.2 м) может привести к радикальному изменению геокриологических условий и формированию достаточно низкотемпературных мерзлых пород. Следовательно, на фоне общего потепления климата может происходить новообразование мерзлых пород.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, заглубленная кровля многолетнемерзлых пород, осадка мерзлых пород при оттаивании, аградация, многолетнее промерзание, пучение.

Ссылка для цитирования: Ривкин Ф.М., Булдович С.Н., Каверин Д.А. Парагенезис деградационных и аградационных процессов в мерзлых грунтах // Криосфера Земли, 2025, т. XXIX, № 1, с. 25–36. DOI: 10.15372/KZ20250103. EDN: VERPVK.

PARAGENESIS OF DEGRADATION AND AGGRADATION PROCESSES IN FROZEN GROUND

F.M. Rivkin^{1,*}, S.N. Buldovich², D.A. Kaverin³¹ Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Malygina St. 86, Tyumen, 625026 Russia² Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russia³ Institute of Biology, Komi Science Centre of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Kommunisticheskaya St. 28, Syktyvkar, 167982 Russia

*Corresponding author; e-mail: f-rivkin@narod.ru

The regularities of the new formation of frozen ground near the southern boundary of permafrost against the background of a positive climate trend and permafrost degradation are considered. The new formation of permafrost against the background of long-term thawing of frozen ground is considered a paragenetic process. The spatial heterogeneity of frost heaving and thawing of soils leads to the formation of local irregularities within initially flat hydromorphic areas, where conditions become favorable for the new formation of frozen ground. Even minor altitudinal differentiation of the original surface (0.05–0.20 m) can radically change geocryological conditions and form fairly low-temperature permafrost. Thus, new frozen ground formation can occur against the background of general climate warming and permafrost degradation.

Keywords: permafrost, deep position of a permafrost table, frozen ground thaw subsidence, aggradation of frozen ground, perennial ground freezing, frost heaving.

ВВЕДЕНИЕ

Новообразования многолетнемерзлых пород (ММП) в таликах широко представлено в криолитозоне как на севере, так и вблизи южной границы ММП. Если в области формирования низких

среднегодовых температур воздуха и, соответственно, распространения низкотемпературных мерзлых пород, новообразование мерзлых пород в таликах вполне закономерно, то новообразование

мерзлых грунтов вблизи южной границы распространения ММП представляется явлением, требующим установления его пространственно-временных закономерностей.

Исследования трансформации геокриологических условий в верхней части разреза вблизи южной границы распространения ММП показали, что новообразование мерзлых грунтов на фоне положительного тренда температуры воздуха является частью механизма естественной динамики ММП (в том числе самоконсервации геокриологических условий) [Иванова и др., 2011; Осадчая, 2016; Ривкин и др., 2017; Ривкин, Булдович, 2024; Seppälä et al., 2011; Sjöberg et al., 2015; Väliiranta et al., 2021]. Этот процесс оказывает существенное влияние и на закономерности изменения ландшафтов, и на сопутствующие парагенетические процессы. В частности, значительные по площади несквозные талики и участки с заглубленной кровлей ММП, расположенные в широких и плоских межблочных понижениях, долинах стока, дренированных озерных котловинах и других ландшафтах, подвержены локальному промерзанию. В верхней части разреза на таких участках формируются локализованные маломощные мерзлые толщи. В плане они обычно составляют минерально-торфяные бугры с размерами до 3 × 3 м (рис. 1, а). В центре бугров мощность мерзлых грунтов достигает 3.0–3.5 м. Такую же мощность в пределах бугров имеет ярус годовых теплооборотов. При этом такие образования иногда могут занимать до 90 % площади ландшафта (см. рис. 1, б), что соответствует прерывистому с поверхности распространению мерзлых грунтов. Возникает парадоксальная геокриологическая ситуация, а именно: участок характеризуется прерывистым с поверхности распространением маломощных ММП (до 90 % распространения по площади), а на глубине ниже 3.0–3.5 м участок сложен тальми породами. Под

талыми породами, иногда ниже глубины 10–12 м, снова могут располагаться ММП. При детальном исследовании такие участки выделяются в самостоятельные геокриологические районы.

Несмотря на понятный в целом механизм новообразования ММП, закономерности этого явления представляются достаточно неоднозначными. Вместе с тем процесс дифференцированной аградации ММП на фоне положительного температурного тренда связан с локальной неоднородностью поверхности: наличием или возникновением неровностей (небольших бугров или кочек) на изначально ровной поверхности гидроморфных участков.

Появление неровностей на изначально плоских поверхностях существенно меняет условия теплообмена и “запускает” механизм локального новообразования мерзлых грунтов. Возникновение криогенного микрорельефа на изначально ровных и плоских участках обычно связывают с неравномерным по площади многолетним морозным пучением. При этом более интенсивное пучение на локальных участках может провоцироваться плановыми (площадными) неоднородностями поверхностных и грунтовых условий. Некоторые сочетания этих факторов могут иметь случайный или кратковременный характер (сезонный), но в дальнейшем усиливаться в ходе эволюции мерзлотной обстановки.

Однако более значимой в количественном отношении причиной возникновения неровностей рельефа является неравномерная осадка поверхности, реализующаяся при оттаивании сверху (деградации) ММП. В настоящее время этот процесс в условиях наблюдаемых климатических изменений имеет широкое развитие на южной периферии криолитозоны.

Авторы рассматривают несколько вариантов новообразования ММП на фоне положительного

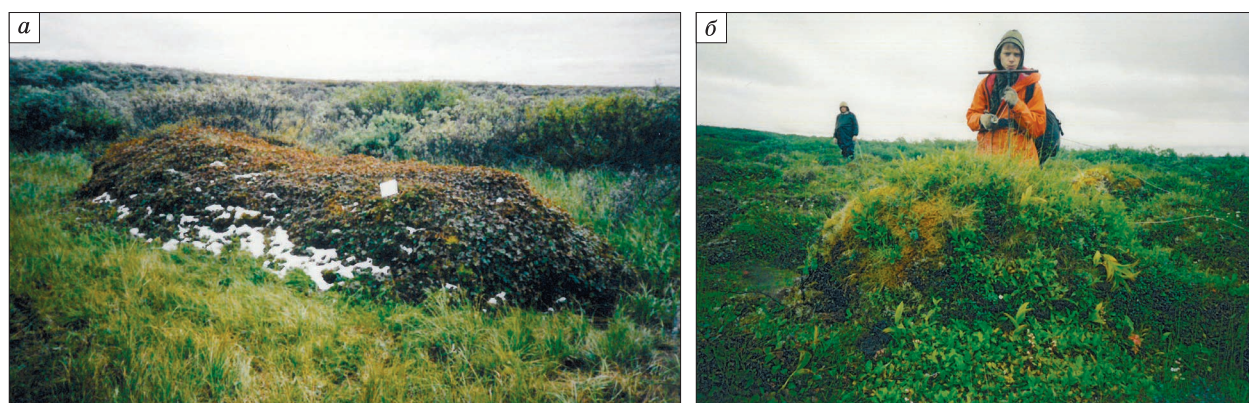


Рис. 1. Бугор пучения в ложбине стока (а) и в обрамлении дренированной озерной котловины (б) (южный сектор Большеземельской тундры).

Фото А.А. Поповой.

температурного тренда. Первый вариант – новообразование ММП за счет благоприятного сочетания внутрисезонных факторов: температуры воздуха, особенно в начале зимнего периода; режима снегонакопления, особенно соотношения сроков установления низкой температуры воздуха и устойчивого снежного покрова; грунтовых условий в пределах слоя сезонного промерзания и оттаивания и сочетания благоприятных факторов промерзания и оттаивания в течение нескольких последующих лет. Второй вариант – новообразование ММП на фоне общего понижения кровли ММП, появления неровностей рельефа (из-за пространственной дифференцированности льдистости в пределах слоя многолетнего оттаивания) на изначально ровных гидроморфных поверхностях и локализации на них более глубокого сезонного промерзания. На таких неровностях рельефа создаются условия для многолетнего промерзания и новообразования ММП.

Для исследования влияния положительного температурного тренда на геокриологическую обстановку в характерных условиях гидроморфных межблоковых понижений был выполнен ряд вычислительных экспериментов. Рассматривались достаточно типичные геокриологические условия для заболоченного понижения, где с поверхности развиты талые породы, подстилаемые на глубине нескольких метров ММП, находящимися или в стадии деградации сверху (несливающаяся мерзлота) или уже в стационарном состоянии (несквозной талик). В результате воздействия тех или иных локальных факторов на изначально ровной поверхности возникают небольшие (высотой до первых дециметров) поднятия, где условия теплообмена пород с внешней средой незначительно отличаются от таковых на окружающей территории.

Настоящая работа посвящена исследованию механизма инициализации процесса новообразования ММП с целью установления критериев и закономерностей устойчивого новообразования ММП с учетом температурных условий на поверхности, теплофизических характеристик напочвенных растительных покровов и криолитологических характеристик грунтов в верхней части разреза.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Новообразования устойчивых маломощных приповерхностных ММП, которое может реализовываться в течение одного цикла промерзания–оттаивания, существенно зависит от сочетания целого комплекса пространственно-временных факторов:

1) условия на поверхности (температура воздуха, режим снегонакопления, микрорельеф и др.), обеспечивающих быстрое промерзание грунтов на локальном участке;

2) грунтовые условия и режим предзимнего увлажнения, обеспечивающие глубокое сезонное

промерзание и формирование эффективного температурного импульса, возбуждающего миграцию воды в промерзающем грунте [*Рекомендации...*, 1986; Орлов и др., 1987] (последнее обеспечивает пространственно-дифференцированную миграцию воды к зоне более интенсивного промерзания грунта и сезонное пучение);

3) сочетание климатических и грунтовых факторов сезонного цикла промерзания–оттаивания должно обеспечивать сохранение перелетка мерзлых грунтов, т. е. зимнее промерзание не должно компенсироваться летним оттаиванием (глубина сезонного промерзания (СМС) больше глубины сезонного оттаивания (СТС)). Кроме того, благоприятные условия для роста и(или) сохранения перелетка должны в той или иной степени существовать несколько лет подряд. Тогда тенденция к многолетнему промерзанию сохранится и может сформироваться устойчивый слой новообразования ММП. В противном случае, более теплые температурные условия могут привести к полному оттаиванию новообразования мерзлых грунтов. Однако и в этом случае на поверхности формируется остаточный бугор. В дальнейшем при сочетании благоприятных факторов он может стать участком новообразования ММП.

Сочетание низких температур воздуха с дифференцированностью снегонакопления (в том числе в результате ветрового перераспределения) в начале зимнего периода создают предпосылки для более быстрого и глубокого промерзания на локальных участках. На рис. 2 приведены результаты режимных (десятилетних) наблюдений за температурой на поверхности грунта в период ее осенней инверсии. Очевидно, что на фоне положительного тренда температуры на поверхности грунта, тем не менее, периодически, в более холодные годы, возникают условия для глубокого промерзания грунтов (см. рис. 2, 2019 г.).

На рис. 3 приведен фрагмент результатов режимных наблюдений за температурой в почвенном профиле (торф), показывающих, насколько быстро происходит понижение температуры в пределах СТС при благоприятном сочетании факторов промерзания. В течение трех суток (с 13 по 16 октября) на участке с маломощным снежным покровом произошло полное промерзание сезонноталого слоя.

На рис. 4 приведена принципиальная схема новообразования мерзлых грунтов в гидроморфном термокарстовом межблочном понижении с изначально плоской поверхностью. Рассматривается понижение с заглубленной кровлей ММП (несквозной талик), обрамленное мерзлыми участками (см. рис. 4, а). С поверхности разрез представлен талым торфом, который подстилается тальми суглинками. Кровля ММП заглублена на 8–9 м. Изначально плоская и ровная поверх-

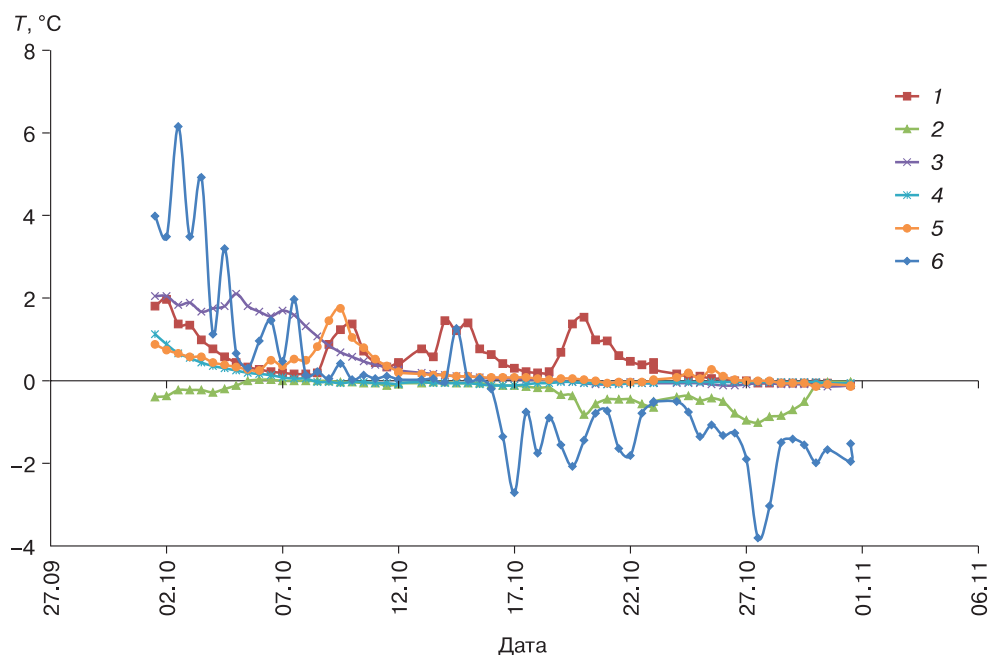


Рис. 2. Температура на поверхности грунта (под растительным слоем по двум отсечкам в сутки 12:00 и 24:00) в период осенней инверсии знака температуры воздуха.

1 – 2012 г.; 2 – 2013 г.; 3 – 2014 г.; 4 – 2015 г.; 5 – 2016 г.; 6 – 2019 г.

ность ландшафта указывает на однородность геокриологического разреза до кровли ММП. С началом цикла промерзания (см. рис. 4, б) для формирования устойчивого новообразования ММП необходимо определенное сочетание двух факторов: установление низких температур воздуха до начала формирования снежного покрова на поверхности участка; поднятие поверхности грунта (пучение) в результате более глубокого промерзания на локальном участке.

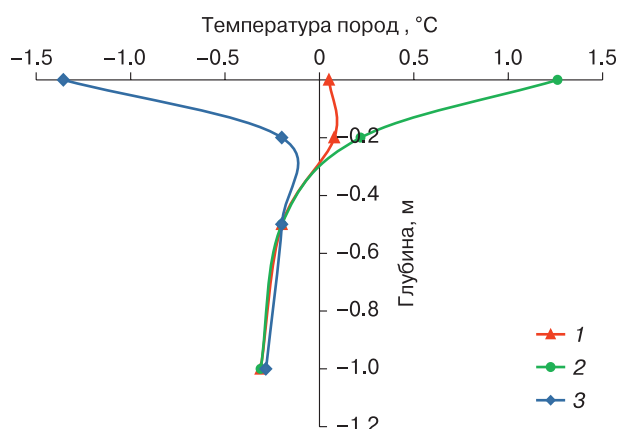


Рис. 3. Быстрое промерзание сезонноталого слоя на локальном участке.

1 – 13.10.2019 г.; 2 – 14.10.2019 г.; 3 – 16.10.2019 г. Время: 24:00.

Зимний период цикла промерзания–оттаивания (см. рис. 4, в) завершается формированием более глубокого промерзания на локальном участке и образованием неровности микрорельефа (бугра) на изначально ровной поверхности. Глубина промерзания в зоне бугра будет превышать глубину СМС на смежном участке с более мощным снежным покровом. Кроме того, приращение пучения будет увеличиваться и за счет миграции воды к зоне более глубокого промерзания, особенно в результате промерзания нижележащих суглинков.

Глубина летнего оттаивания (см. рис. 4, г) меньше глубины сезонного промерзания. Летний цикл завершается сохранением перелетка мерзлых грунтов, а на изначально плоской поверхности сохраняется минерально-торфяной бугор. В последующем это будет способствовать более быстрому и глубокому промерзанию грунтов в контурах бугра.

На рис. 5 приведены расчетные зависимости величины пучения при промерзании суглинка, залегающего под торфом [Рекомендации..., 1986]. Расчеты выполнялись для суглинка с плотностью минеральных частиц $\rho_s = 2.78 \text{ г/см}^3$, плотностью скелета грунта $\rho_d = 1.8 \text{ г/см}^3$ при влажности $W_e = 0.37, 0.32, 0.257$. Максимальные значения пучения, естественно, возникают при влажности грунта, соответствующей его максимальной влаго-

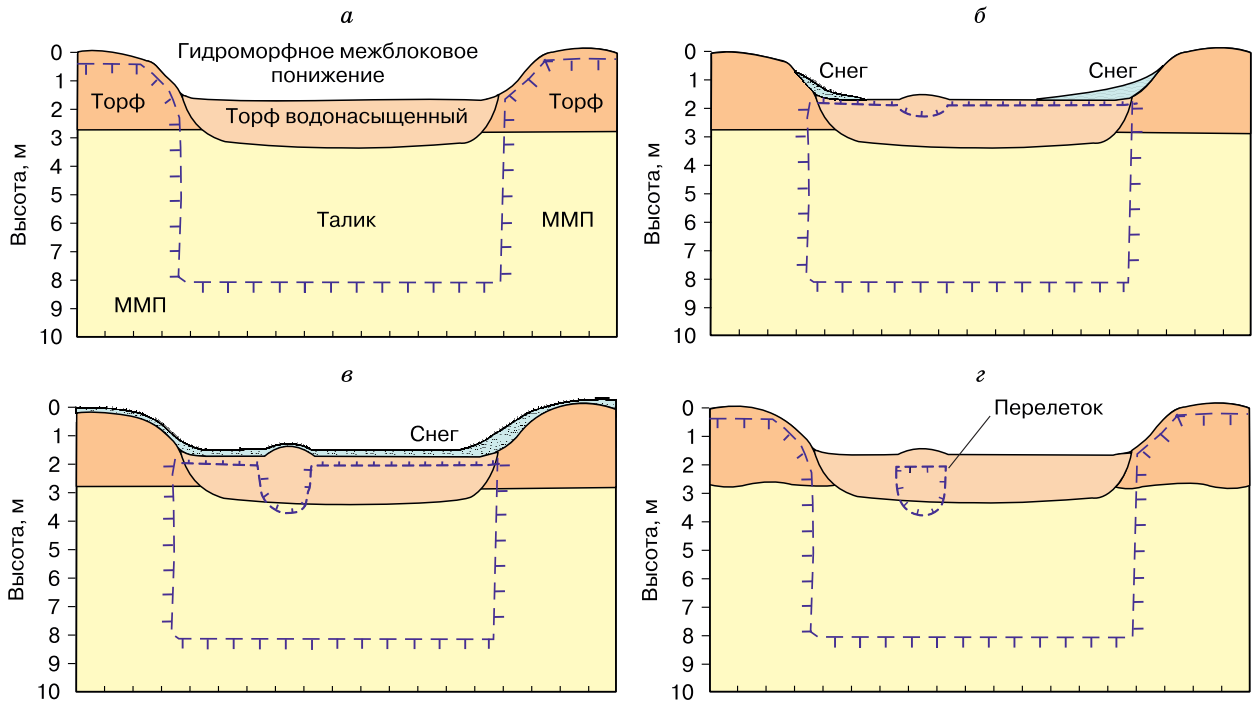


Рис. 4. Принципиальная схема формирования новообразования ММП в межблочном гидроморфном понижении (соотношение вертикального и горизонтального масштаба 1:1).

а – термокарстовое понижение, ложбина стока, дренированное озерное понижение с плоской и ровной поверхностью; *б* – начало цикла промерзания–оттаивания, период устойчивого перехода температуры воздуха через 0°C и формирование неравномерного снежного покрова; *в* – завершение зимнего цикла промерзания; *г* – завершение годового цикла промерзания–оттаивания, формирование перелетки мерзлых грунтов.

емкости ($W_e = W_{\text{sat}} = 0.37$). Оптимальным разрезом можно считать водонасыщенный суглинок, перекрытый слоем торфа мощностью 0.35–0.40 м. Промерзание суглинка обеспечивает приращение пучения, а слой торфа мощностью 0.35–0.40 м способствует сохранению перелетки, так как практически обеспечивает локализацию СТС в пределах торфяного слоя.

Для гидроморфных участков, каковыми и являются локальные понижения (ложбины стока и др.), это достаточно типичная ситуация. В этом случае величина пучения при глубине промерзания суглинка под слоем торфа 0.3 м составит 0.08–0.10 м, а с учетом миграционного льдовыделения может быть больше. Таким образом, создаются условия для формирования первичного бугра, даль-

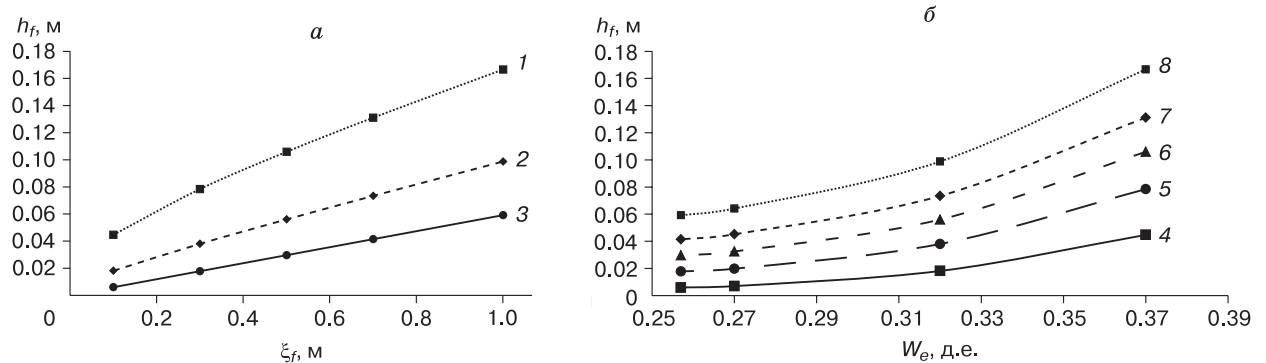


Рис. 5. Расчетная зависимость величины пучения h_f от глубины промерзания ξ_f (*а*) и влажности W_e суглинка (под слоем торфа) без учета пучения торфа (*б*).

1 – $W_e = 0.37$; 2 – $W_e = 0.32$; 3 – $W_e = 0.257$; 4 – $\xi_f = 0.1$ м; 5 – $\xi_f = 0.3$ м; 6 – $\xi_f = 0.5$ м; 7 – $\xi_f = 0.7$ м; 8 – $\xi_f = 1$ м.

нейшее развитие которого (в последующие годы) может привести к формированию устойчивого новообразования приповерхностных ММП. Именно с этим связана локализация новообразований ММП по периферии дренированных озерных котловин и межблоковых гидроморфных понижений, где, вероятно, чаще встречаются условия, оптимальные для новообразования ММП (и литологические, и поверхностные). Такие новообразования часто встречаются как в зоне преимущественно сплошного распространения ММП с поверхности на участках несливающейся мерзлоты (см. рис. 1), в зоне сплошного распространения ММП (рис. 6), так и на талых участках в зоне спорадического распространения ММП (рис. 7). На фотографиях хорошо видно, что новообразование ММП происходит на локальных участках на фоне достаточно однородной в ландшафтном отношении поверхности.

Дальнейшее развитие новообразования будет сильно зависеть от климатических условий следующего года. Если следующий цикл будет более теплым (по совокупному влиянию комплекса ус-

ловий: температуре воздуха, режиму снегонакопления и др.), то образовавшийся перелеток закономерным образом прекратит свое существование. В ином случае, если следующий годовой цикл будет таким же или более холодным, формирование новообразования мерзлых грунтов будет продолжаться до достижения им размеров, адекватных современным климатическим условиям.

Не менее действенной криогенной причиной возникновения неровностей рельефа может стать неравномерная осадка поверхности, реализующаяся при оттаивании многолетнемерзлых пород. В случае однородных по площади условий теплообмена пород с внешней средой на поверхности основной причиной дифференциации скоростей осадки поверхности, которая и приводит к возникновению относительных неровностей рельефа, могут являться неоднородности свойств пород и в первую очередь их льдистости.

При одинаковых по площади свойствах пород неравномерная их осадка в ходе многолетнего оттаивания может быть связана как с различиями



Рис. 6. Локальные бугры пучения на поверхности хасырея (северный сектор Большеземельской тундры).

Фото Ф.М. Ривкина.



Рис. 7. Останцы грунтово-минеральных сезонных бугров пучения в обрамлении заболоченного гидроморфного понижения (район Кево, Финляндия).

Фото Ф.М. Ривкина.

Таблица 1. **Теплофизические свойства пород**

Порода	ρ_d , г/см ³	w	w_w	λ_{th}	λ_f	C_{th}	C_f	Q_{ph} , кДж/м ³
		д.е.		Вт/(м·°С)		кДж/(м ³ ·°С)		
Суглинок	1.55	0.28	0.09	1.48	1.70	3310.0	2660.0	100 200.0
Торф водонасыщенный	0.18	4.88	1.22	0.55	1.30	4000.0	2630.0	220 100.0
Торф слабовлажный	0.18	<1.5	–	0.17	0.17	–	–	–

Примечание. ρ_d – плотность скелета; w – влажность; w_w – влажность незамерзшей воды; λ_{th} , λ_f – теплопроводность талых и мерзлых пород соответственно; C_{th} , C_f – объемная теплоемкость талых и мерзлых пород соответственно; Q_{ph} – объемная теплота фазовых переходов воды.

условий внешнего теплообмена, обусловленного локальными особенностями напочвенного растительного покрова, так и с его нарушениями.

Важно отметить, что в обоих случаях причиной высотной дифференциации поверхности является начало деградации ММП. В свою очередь, появление неровностей рельефа начинает менять условия теплообмена на относительно приподнятых и на соседних, пониженных по сравнению с исходными, участках. Изменение условий теплообмена происходит даже несмотря на небольшую амплитуду этих неровностей. При этом наиболее действенным фактором является понижение мощности снежного покрова на приподнятых участках и рост мощности снега в понижениях вследствие ветрового его перераспределения. Не говоря уже о том, что “бугры” в условиях метелевого переноса иногда вообще могут покрываться снегом с большим запаздыванием относительно окружающей территории, т. е. значительно позже перехода температуры воздуха через 0 °С (см. рис. 1, а). Следует отметить, что на увлажненных, заболоченных участках, сложенных с поверхности биогенными отложениями (торф), существенное изменение условий теплообмена связано также с дренированием этого покрова на образующихся повышениях рельефа. Дренажное приводит к резкому уменьшению его теплопроводности, фактически формируя здесь теплоизоляционный слой [Ривкин, Булдович, 2024].

Оба указанных фактора приводят к заметному понижению среднегодовой температуры пород на растущих буграх, причем уменьшение отепляющего влияния снега, связанное с сокращением его мощности, реализуется в зимнее время, а воздействие слабовлажного биогенного слоя связано с резким сокращением теплового потока в породы в теплый период. Есть и обратная связь, а именно: сокращение летнего теплооборота за счет теплоизоляционного воздействия осушенного торфа сопровождается дополнительным уменьшением отепляющего влияния снега. Кроме того, на дренированных возвышенных участках возможно довольно быстрое развитие нового (мохового) растительного покрова, который также оказывает дополнительное охлаждающее воздействие.

Таким образом, деградация ММП на участках, имеющих пространственные неоднородности льдистости или исходных поверхностных условий, приводит к формированию неровностей рельефа. Амплитуда неровностей микрорельефа увеличивается в соответствии с ростом глубины многолетнего оттаивания. Следствием этого является дифференциация условий теплообмена пород с внешней средой, которая приводит к обратному парагенетическому эффекту – значительному понижению температуры пород на повышенных участках на фоне общего положительного температурного тренда.

Для исследования влияния высотной дифференциации поверхности на новообразование мерзлых грунтов был выполнен ряд расчетов. Цель расчетов – количественная оценка влияния малоамплитудных поднятий поверхности (бугров, кочек) на мерзлотные условия. Для расчетов использовался упрощенный разрез, достаточно типичный для заболоченных участков северных тундр: сверху залегает слой торфа мощностью 0.4 м, ниже – суглинки. Все элементы разреза водонасыщены. Теплофизические свойства пород приведены в табл. 1. В качестве климатических параметров для расчетов использовались современные (осредненные за последние 5 лет) климатические характеристики района г. Воркуты, ход среднемесячных температур воздуха приведен в табл. 2.

Таблица 2. **Среднемесячные температуры воздуха по м/с Воркута (осреднение за 2018–2023 гг.)**
[Климат..., 2024]

Месяц	t_i , °С	Месяц	t_i , °С
I	–18.2	VII	14.1
II	–15.0	VIII	10.9
III	–10.6	IX	–18.2
IV	–5.4	X	–15.0
V	–0.1	XI	–10.6
VI	8.6	XII	–5.4

Примечание. t_i – среднемесячная температура воздуха. $\Omega_s = 28\ 300$ °С·ч, $\Omega_w = -54\ 480$ °С·ч – суммы летних и зимних температур.

Высота снежного покрова в конце зимы принята равной $h_{sn} = 0.5$ м, плотность снега $\rho_{sn} = 0.28$ г/см³. В расчетах использовалось осредненное за зиму значение высоты снежного покрова: при близком к параболическому закону увеличения мощности снега в течение зимы среднее ее значение за холодный период составляет 2/3 от максимального, т. е. $h_{sn} = 0.33$ м. Теплопроводность снега рассчитывается по известной формуле Проскурякова и равна $\lambda_{sn} = 0.31$ Вт/(м·°С), тогда исходное среднее термическое сопротивление снега составит $R_{sn} = 1.06$ (м²·°С)/Вт.

Изменение среднегодовой температуры пород и глубин сезонных промерзания и оттаивания пород в пределах образовавшихся поднятий может быть связано с рядом причин, основными из которых являются следующие. Во-первых, формирование локальной положительной формы рельефа в районах с развитым метелевым переносом снега должно сопровождаться снижением высоты снежного покрова на этом поднятии, что приведет к уменьшению его отепляющего влияния и понижению температуры пород. Во-вторых, очень действенным в плане формирования мерзлотной ситуации оказывается дренирование верхней части торфяного слоя в пределах поднятия. Теплофизические свойства торфа при понижении его влажности сильно меняются (см. табл. 1), фактически речь идет о возникновении в пределах поднятия дополнительного теплоизолирующего покрова на поверхности со значительным термическим сопротивлением. Поэтому в расчетной схеме дренированная часть торфяного слоя рассматривается именно в этом качестве.

Для оценки влияния двух указанных факторов на среднегодовую температуру пород и глубины сезонного оттаивания–промерзания (СТС–СМС) решалась серия стационарных одномерных задач в спектре изменения высоты поднятия поверхности и соответствующего изменения свойств покровов [Булдович, 2016]. В такой постановке ни динамика климатических изменений, ни скорость роста этих поднятий не учитываются. Считается, что до начала высотной дифференциации территории температурный режим на дневной поверхности вместе с особенностями снегонакопления обеспечивают формирование постоянной по площади положительной среднегодовой температуры пород, не изменяющейся во времени. Образование торфяного бугра и его частичное дренирование принимаются мгновенными. Далее в зависимости от высоты бугра (и соответствующих мощности дренированного слоя торфа и толщины снега) рассчитываются установившиеся среднегодовые температуры пород и глубины СТС/СМС. Эта температура и ее знак позволяют судить как о влиянии высоты бугра на температурный режим пород, так

и о дальнейшей направленности развития мерзлотной ситуации.

По данным численного моделирования, перестройка геокриологической ситуации при изменении условий теплообмена на поверхности пород происходит очень быстро: если на изначально талых участках новым условиям соответствует формирование установившейся отрицательной среднегодовой температуры пород, то их многолетнее промерзание обычно начинается уже в течение первого–второго года после изменений, редко более. При этом понижение среднегодовой температуры на подошве слоя сезонного оттаивания и промерзания после изменения условий теплообмена на поверхности пород до стационарных значений происходит с запозданием, часто значительным, зависящим от скорости погружения фронта многолетнего промерзания пород. Таким образом, сразу после образования бугра в его границах начинается быстрое понижение температуры пород, которое при достаточной высоте поднятия приводит к переходу температуры в отрицательную область, смене сезонного промерзания пород сезонным их оттаиванием и началом новообразования ММП.

Методика аналитических расчетов была выбрана потому, что она позволяет получить раздельную количественную оценку всех действующих факторов, формирующих температуру пород. Безусловно, одномерная схема в данном случае является существенным упрощением реальной ситуации, так как она не учитывает боковое тепловое взаимодействие “бугорка” с окружающими породами. Однако целью анализа была именно оценка степени воздействия разных факторов теплообмена непосредственно в пределах поднятия. Задачи решались с использованием методики аналитического расчета геокриологических характеристик при двухслойном строении СТС, разработанной на кафедре геокриологии МГУ [Булдович, 2016], кроме того, решения контролировались численным компьютерным моделированием в программе “WARM” [Программа..., 1994].

Задача решалась в двух вариантах. В первом варианте расчета, для оценки влияния только дренирования части биогенного слоя, дифференциация мощности снега не учитывалась. Было принято, что снег имеет одинаковую высоту и термическое сопротивление как на поднятиях, так и на остальной территории. Мощность дренированного слоя торфа была принята равной высоте поднятия (бугра) и увеличивалась в соответствии с ростом этой высоты.

Во втором варианте расчета считалось, что поверхность снежного покрова выравнивается ветрами и не зависит от неровностей подстилающего рельефа (что характерно для реальных усло-

Таблица 3. Результаты расчетов геокриологических характеристик по двум вариантам

№ п/п	h_b , м	R_{dp} , (м ² ·°С)/Вт	$H_{вп}$, м	R_{sn} , (м ² ·°С)/Вт	$H_{СМС/СТС}$, м	t_{ξ} , °С	B , МДж/м ³	Δt_{sn} , °С	Δt_{λ} , °С
Вариант I									
1	0	0	0.40	1.06	0.87	0.65	149.05	5.01	-1.37
2	0.025	0.15	0.375	1.06	0.81	0.39	135.32	4.55	-1.17
3	0.05	0.295	0.35	1.06	0.77	0.17	124.00	4.17	-1.01
4	0.075	0.44	0.325	1.06	0.71	-0.01	115.11	3.87	-0.86
5	0.10	0.59	0.30	1.06	0.61	-0.21	103.48	3.48	-0.70
6	0.15	0.88	0.25	1.06	0.46	-0.58	85.50	2.87	-0.46
7	0.20	1.18	0.20	1.06	0.36	-0.89	71.58	2.41	-0.29
Вариант II									
1	0	0	0.40	1.06	0.87	0.65	149.05	5.01	-1.37
2	0.025	0.15	0.375	0.977	0.92	0.11	140.90	4.37	-1.27
3	0.05	0.295	0.35	0.893	0.78	-0.34	130.91	3.71	-1.06
4	0.075	0.44	0.325	0.81	0.65	-0.80	118.33	3.04	-0.85
5	0.10	0.59	0.30	0.727	0.53	-1.20	106.91	2.46	-0.68
6	0.15	0.88	0.25	0.56	0.35	-1.84	88.88	1.58	-0.43
7	0.20	1.18	0.20	0.393	0.21	-2.31	74.53	0.93	-0.25

Примечание. Вариант I – переменная мощность дренированного торфа, постоянная мощность снежного покрова. Вариант II – переменная мощность дренированного торфа, переменная мощность снежного покрова. Обозначения: h_b – высота поднятия (бугра); R_{dp} – термическое сопротивление сухого торфа; $H_{вп}$ – мощность обводненного торфа; R_{sn} – термическое сопротивление снега; $H_{СМС/СТС}$ – мощности СМС и СТС; t_{ξ} – среднегодовая температура пород; B – годовой теплооборот в породах; Δt_{sn} – утепляющее влияние снега; Δt_{λ} – температурная сдвижка.

вий). В этом случае высота снега соответствующим образом уменьшается над поднятиями; одновременно здесь происходит увеличение мощности дренированного слоя торфа.

Результаты расчетов показали чрезвычайно высокую чувствительность геокриологических условий к воздействию двух рассмотренных факторов и, следовательно, очень сильное влияние высотной дифференциации поверхности, проявляющееся буквально с первых сантиметров относительного роста поднятия.

Рассмотрим сначала случай (вариант I), когда характеристики снежного покрова остаются постоянными и не зависят от высоты поднятия поверхности. Единственным изменением, связанным с поднятием поверхности, является увеличение мощности дренированного торфа (и одновременное уменьшение мощности нижней обводненной части слоя торфа). В табл. 3 и на рис. 8 показаны результаты расчетов. Начальная среднегодовая температура пород при отсутствии поднятия поверхности была $t_{\xi} = +0.65$ °С, а мощность СМС составляла $\xi_f = 0.87$ м. С ростом высоты поднятия происходит заметное понижение среднегодовой температуры пород и уменьшение глубины сезонного промерзания, и при высоте бугра всего $h_b = 0.075$ м температура пород t_{ξ} переходит в отрицательную область при мощности СМС $\xi_f = 0.7$ м, а при высоте бугра $h_b = 0.20$ м среднегодовая температура пород опускается до величины $t_{\xi} = -0.89$ °С при мощности слоя сезонного

оттаивания $\xi_{th} = 0.36$ м. Таким образом, общее понижение температуры пород при формировании поднятия высотой $h_b = 0.2$ м над прилегающей поверхностью привело к общему понижению температуры пород на 1.5 °С и к началу их многолетнего промерзания с формированием острова ММП.

Из данных табл. 3 следует, что основным фактором охлаждения пород является уменьшение утепляющего влияния снега Δt_{sn} с +5.0 до +2.4 °С, т. е. на 2.6 °С. Поскольку R_{sn} при этом оставалось неизменным, понятно, что сокращение утепляющего влияния снега связано с уменьшением вели-

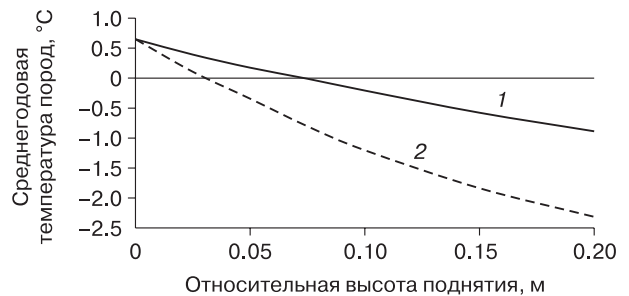


Рис. 8. Изменение среднегодовой температуры пород (на подошве слоев сезонного промерзания–оттаивания) в зависимости от высоты бугра.

1 – вариант I изменения только мощности слоя дренированного торфа, снежный покров не изменяется; 2 – вариант II изменения как мощности сухого торфа, так и снежного покрова в соответствии с высотой поднятия.

чины годового теплооборота, проходящего через снег зимой. Это уменьшение связано с теплоизоляционной ролью дренированного слоя торфа, препятствующего поступлению тепла в породы в летнее время. Теплооборот B уменьшился почти вдвое при высоте бугра 0.20 м (см. табл. 3).

Интересно то, что тенденции понижения температуры пород в данном случае противостоят один важный фактор годового теплообмена в породах, а именно, теплофизическая температурная сдвигка Δt_λ в пределах сезонно-криогенной части разреза.

Эта отрицательная сдвигка имеет максимальные (по модулю) значения в водонасыщенных биогенных образованиях, из-за чего торфяники считаются “холодными” грунтами. В рассматриваемой ситуации температурная сдвигка, изначально имеющая весьма значительную величину $\Delta t_\lambda = -1.37^\circ\text{C}$, с ростом бугра начинает довольно быстро уменьшаться, что сопровождается увеличением среднегодовой температуры пород. При высоте бугра $h_b = 0.2$ м сдвигка уже составляет -0.29°C , т. е. она уменьшилась (по модулю) более чем в 4 раза. Эти изменения связаны с двумя причинами. Во-первых, под дренированным слоем торфа резко уменьшается годовая амплитуда колебаний температур, от которой зависит величина Δt_λ . Во-вторых, мощность обводненного торфяного слоя, где разница теплопроводности в талом и мерзлом состояниях особенно велика, постепенно сокращается с ростом высоты бугра, приводя к уменьшению абсолютного значения Δt_λ . Таким образом, повышение температуры пород в результате уменьшения температурной сдвигки происходит значительно медленнее, чем сокращение отепляющего влияния снега, что приводит к значительному охлаждению и многолетнему промерзанию пород.

В другом варианте расчета (вариант II) к воздействию на температурный режим дренирования торфяных отложений добавляется соответствующее уменьшение мощности снежного покрова над локальными поднятиями (см. табл. 3, рис. 8). Результаты расчетов показывают, что в этом случае общая картина исследуемых изменений качественно не отличается от результатов предыдущего варианта. Однако имеются существенные количественные отличия. Так, среднегодовая температура пород t_ξ перешла через нуль в отрицательную область уже при высоте бугра $h_b = 0.03$ м, а при высоте поднятия $h_b = 0.20$ м температура t_ξ опустилась до -2.31°C (при этом температура пород на окружающих бугор участках по-прежнему остается равной $+0.65^\circ\text{C}$). В целом все перечисленные выше для первого варианта расчета изменения отдельных факторов сохранили ту же тенденцию, однако проявляются более контрастно.

Анализ выполненных расчетов показывает, что даже совсем незначительная высотная дифференциация исходной поверхности (0.05–0.20 м) может привести к радикальному изменению мерзлотных условий на приподнятых участках с формированием островов мерзлых пород (причем достаточно низкотемпературных). Локальное многолетнее промерзание происходит вопреки тренду общего потепления климата.

Представляется, что наиболее вероятный механизм их образования связан с локальным миграционным морозным пучением пород. При этом миграция воды осуществляется с соседних участков, поток движется в талых тонкодисперсных минеральных породах, подстилающих торфяные отложения. Для направленного перемещения воды в зону формирующегося поднятия необходимо наличие здесь некоторой отрицательной температурной аномалии. Эта аномалия, как показано выше, может быть следствием зарождения небольшого (первые сантиметры) поднятия, образовавшегося в определенной мере случайно – в результате локального выдувания снега или в особо холодный год и т. п.

В этом отношении важным результатом выполненных расчетов является то, что с увеличением высоты поднятия односторонне происходит быстрое сокращение мощности СТС. Это означает, что накопившийся за холодный сезон миграционный лед вблизи фронта сезонного оттаивания уже не сможет оттаять полностью в следующее лето, и процесс накопления и консервации льда (и сопутствующий рост бугра) приобретает устойчивый многолетний характер. К этому добавляется миграционное пучение за счет поступления воды из окружающих талых пород, что было отмечено выше (см. рис. 5). Таким образом, локальная интенсификация процессов пучения также может являться следствием неравномерной деградации ММП.

Еще одной причиной высотной дифференциации исходно ровной поверхности может стать процесс деградации ММП, происходящий в условиях современных климатических изменений. Погружение заглубленной кровли мерзлых пород на участках несливающейся мерзлоты или расширение и углубление несквозных таликов может сопровождаться неравномерной просадкой поверхности. Конечно, амплитуда образующихся при этом неровностей невелика, но из выполненных оценок следует, что ее может оказаться достаточно для формирования ММП на отдельных участках. Тем самым реализуется парагенезис новообразования ММП и процесса деградации мерзлоты.

Если действие поверхностных факторов в условиях формирования криогенного микрорельефа направлено на усиление различий температурного режима пород и мерзлотных условий между участ-

ками, то боковое тепловое взаимодействие сглаживает влияние контрастных различий верхних граничных условий на пространственную конфигурацию ММП. В этом случае большую роль играют относительные площади распространения холодных и теплых контуров и температурные различия между ними. Многолетнемерзлые породы под “буграми” представляют собой изолированные острова мерзлых пород. Их мощность будет зависеть от плановых размеров поднятий и среднегодовых температур пород на прилегающих участках (см. рис. 1).

Необходимо отметить, что в термодинамическом отношении рассматривалась конечная стадия оттаивания во вновь сложившихся условиях, на так или иначе сформировавшихся участках с заглубленной кровлей ММП. Такая сложная конфигурация ММП является, тем не менее, вполне равновесной (стационарной), и это достигается именно за счет пространственного теплового взаимодействия между различными участками (талыми и мерзлыми). Разумеется, в случае дальнейшего потепления климата будут происходить и дальнейшие изменения, которые закончатся полным оттаиванием новообразований мерзлых грунтов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Парагенезис оттаивания мерзлых грунтов и их новообразование на фоне положительного климатического тренда является закономерным процессом.

Локальное новообразование ММП связано с формированием неровностей на изначально плоской поверхности. Появление первичных бугорков может быть обусловлено как дифференцированностью пучения по площади, так и неравномерной осадкой поверхности, возникающей при оттаивании сверху (деградации) многолетнемерзлых пород. Первое реализуется как результат сезонного пучения и может трансформироваться в многолетнее промерзание при благоприятном сочетании поверхностных и грунтовых условий. Второе реализуется как закономерный итог многолетней и дифференцированной по площади осадки грунтов в результате деградации ММП.

На возвышенных участках изменяются условия теплообмена пород с внешней средой. Последнее выражается в понижении температуры пород на повышенных участках, достаточном для многолетнего промерзания грунтов и новообразования ММП на фоне положительного климатического тренда. Более того, можно сказать, что сам этот тренд и сопутствующая ему деградация ММП являются причиной указанного новообразования.

Благодарности. Авторы благодарны А.А. Поповой за предоставленные фотографии.

Работа выполнена в ИКЗ ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (“Изучение формирования, структуры, изменчивости и прогнозирования состояния криосферы, в том числе многолетнемерзлых толщ и криогенных ландшафтов”, № FWRZ-2021-0012).

Литература

- Булдович С.Н.** Методика приближенной оценки и прогнозирования геокриологических характеристик – среднегодовой температуры и глубины оттаивания (промерзания) пород // Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях. М., Геоинфо, 2016, с. 87–109.
- Иванова Н.В., Кузнецова И.Л., Пармузин И.С. и др.** Геокриологические условия Шведской Лапландии // Материалы Четвертой конф. геокриологов России (Москва, 7–9 июня 2011 г.). М., Изд-во Моск. ун-та, 2011, т. 1, с. 77–82.
- Климат** Воркуты. 2024. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/23226.htm>
- Орлов В.О., Елгин Б.Б., Железняк И.И.** Морозное пучение грунтов в расчетах оснований сооружений. Новосибирск, Наука, 1987, 133 с.
- Осадчая Г.Г.** Мерзлотно-ландшафтная дифференциация Большеземельской тундры: современное состояние и использование при освоении: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. Москва, 2016, 50 с.
- Программа** расчета теплового взаимодействия инженерных сооружений с вечномерзлыми грунтами WARM: Свидетельство № 940281 / Хрусталев Л.Н., Емельянов Н.В., Пустовоит Г.П., Яковлев С.В. М., РосАПО, 1994.
- Рекомендации** по учету и предупреждению деформаций и сил морозного пучения грунтов. ПНИИИС Госстрой СССР. М., Стройиздат, 1986, 72 с.
- Ривкин Ф.М., Булдович С.Н.** Закономерности новообразования мерзлых пород на фоне положительного климатического тренда // Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 1, с. 15–22.
- Ривкин Ф.М., Власова Ю.В., Пармузин И.С.** Закономерности изменения геокриологических условий в результате осадки мерзлых грунтов при оттаивании // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 6, с. 26–34.
- Seppälä M.** Synthesis of studies of palsa formation underlining the importance of local environmental and physical characteristics // Quat. Res., 2011, vol. 75, p. 366–370.
- Sjöberg Y., Marklund P., Pettersson R., Lyon S.W.** Geophysical mapping of palsa peatland permafrost // Cryosphere, 2015, vol. 9, p. 465–478.
- Väliranta M., Marushchak M.E., Tuovine J.-P. et al.** Warming climate forcing impact from a sub-arctic peatland as a result of late Holocene permafrost aggradation and initiation of bare peat surfaces // Quat. Sci. Rev., 2021, vol. 264, 107022.

References

- Buldovich S.N. Methodology for approximate assessment and prediction of geocryological characteristics – average annual temperature and depth of thawing (freezing) of grounds. In: Osnovy merzlotnogo prognoza pri inzhenerno-geologicheskikh issledovaniyakh [Fundamentals of permafrost forecasting in engineering-geological research]. Moscow, Geoinfo, 2016, p. 87–109 (in Russian).
- Ivanova N.V., Kuznetsova I.L., Parmuzin I.S. et al. Geocryological conditions of Swedish Lapland. In: Materials of the Fourth

Conf. of Geocryologists of Russia (Moscow, June 7–9, 2011). Moscow, Izd-vo MGU, 2011, vol. 1, p. 77–82 (in Russian).

Climate of Vorkuta. 2024. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/23226.htm>

Orlov V.O., Elgin B.B., Zheliznyak I.I. Moroznoe puchenie gruntov v raschetakh osnovanii sooruzhenii [Frost heaving of grounds in calculations of building foundations]. Novosibirsk, Nauka, 1987, 133 p. (in Russian).

Osadchaya G.G. Permafrost-landscape differentiation of the Bolshezemelskaya tundra: current state and use during development: Abstract for the degree of Doctor of Geographical Sciences. Moscow, 2016, 50 p. (in Russian).

Programma rascheta teplovogo vzaimodeistviya inzhenernykh sooruzhenii s vechnomerzlymi gruntami WARM [The Program for calculating thermal interaction of engineering structures with permafrost soils WARM]: Certificate No. 940281 / Khrustalev L.N., Emelyanov N.V., Pustovoi G.P., Yakovlev S.V. Moscow, RosAPO, 1994.

Rekomendatsii po uchetu i preduprezhdeniyu deformatsii i sil moroznogo pucheniya gruntov [Recommendations for account-

ing and prevention of deformations and frost heaving forces in soils PNIIS Gosstroy SSSR]. Moscow, Stroyizdat, 1986, 72 p. (in Russian).

Rivkin F.M., Buldovich S.N. Regularities of new formation of frozen ground against the background of a positive climatic trend. Earth's Cryosphere, 2024, vol. XXVIII, No. 1, p. 15–22.

Rivkin F.M., Vlasova Yu.V., Parmuzin I.S. Study of changes in permafrost conditions caused by frozen ground thaw subsidence. Earth's Cryosphere, 2017, vol. XXI, No. 6, p. 21–29.

Seppälä M. Synthesis of studies of palsa formation underlining the importance of local environmental and physical characteristics. Quat. Res., 2011, vol. 75, p. 366–370.

Sjöberg Y., Marklund P., Pettersson R., Lyon S.W. Geophysical mapping of palsa peatland permafrost. Cryosphere, 2015, vol. 9, p. 465–478. – www.the-cryosphere.net/9/465/2015/

Väliranta M., Marushchak M.E., Tuovine J.-P. et al. Warming climate forcing impact from a sub-arctic peatland as a result of late Holocene permafrost aggradation and initiation of bare peat surfaces. Quat. Sci. Rev., 2021, vol. 264, 107022. – <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.107022>

*Поступила в редакцию 26 июня 2024 г.,
после доработки – 8 августа 2024 г.,
принята к публикации 28 ноября 2024 г.*