



## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КРИОГЕННОГО РЕЛЬЕФА, КАК РЕЗУЛЬТАТ ПАРАГЕНЕЗИСА ОТТАИВАНИЯ И ПРОМЕРЗАНИЯ ГРУНТОВ.

✉ Ривкин Ф.М.<sup>1</sup>, Булдович С.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Россия

<sup>2</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

✉ f-rivkin@narod.ru

Рассматриваются закономерности преобразования рельефа и ландшафтов как результат парагенезиса деградационных и аградационных процессов в условиях положительного климатического тренда. Пространственная дифференцированность осадки грунтов при оттаивании приводит формированию новых ландшафтных форм. Некоторые из них становятся благоприятными для новообразования мёрзлых грунтов. Прогнозное моделирование показало, что даже незначительная высотная дифференциация исходно ровной гидроморфной поверхности (0,05-0,2 м) может привести к образованию локальных маломощных, но достаточно низкотемпературных мерзлых пород. Установлено, что комплекс парагенетических процессов оттаивания и промерзания грунтов на фоне положительного климатического тренда способствует специфическому преобразованию рельефа поверхности и образованию новых ландшафтных форм.

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

**Введение.** Современная направленность динамики климата в Арктике и Субарктике и, в первую очередь, вблизи южной границы распространения ММП провоцирует целый комплекс процессов, на первый взгляд разнонаправленных, но тем не менее парагенетических [Ривкин, Булдович, 2024; Ривкин и др., 2025]. Повышение температуры воздуха, обусловленное, современным климатическим трендом, способствует понижению кровли многолетнемерзлых пород. На определённом этапе это приводит к формированию участков с заглублённым положением кровли ММП (участков не сливающейся мерзлоты). Появление перманентного талого слоя между подошвой СМС и кровлей ММП провоцирует хорошо известный эффект «нулевой завесы» [Геокриологический словарь, 2003], который будет оказывать существенное влияние на структуру годовых теплооборотов в верхней части разреза. Формирование в верхней части разреза такого термодинамического барьера консервирует на некоторое время геокриологические условия на новом уровне, даже при условии постоянного положительного тренда температуры воздуха. Но самым важным последствием, такого изменения геокриологической обстановки в верхней части разреза, проявляющемся на поверхности является изменение микрорельефа.

**Результаты и обсуждение.** Осадка грунтов при оттаивании в пространственно-временном отношении весьма дифференцирована. Она существенно зависит условий теплообмена на поверхности, от состава и свойств грунтов и от продолжительности процесса оттаивания. В таблице 1 приведены результаты прогноза осадки грунтов при оттаивании для некоторых ландшафтов в пределах тестового участка на 2050 и 2099 года [Ривкин и др. 2017] при условии реализации климатического принятого сценария HIRHAM4 [Christensen et. al., 2002].

На период середины столетия (2050г) минимальные значения осадки грунтов, и естественно, минимальные изменения высотного положения поверхности, будут приурочены:

- к талым ландшафтам (табл. 1, г);
- к участкам, сложенным с поверхности торфом (табл. 1, а, б).

Осадка при оттаивании на участках не сливающейся мерзлоты и сложенных суглинками будет зависеть от глубины залегания кровли ММП (табл. 1, в), но уже может достигать 1,7м.

Табл. 1 Обобщённые результаты прогноза величины осадки грунтов при оттаивании на ключевом участке.

Ландшафтные условия		Криолитологическая х-ка слоя верхней части разреза	Осадка при оттаивании	
			2050 г	2099 г
а	Плоские и бугристые торфяники	С мощностью торфа более 0,7 м и подстилаемый суглинками льдистыми (мёрзлые участки)	от 0 до 0,1м	от 0 до 0,1м
б	Плоские и бугристые торфяники	С мощностью торфа до 0,7 м и подстилаемый суглинками льдистыми (мёрзлые участки)	до 0,1м	до 2,5м
в	Кочковатая кустарничково-мохово-лишайниковая тундра, относительно дренированная	Суглинки, местами перекрытые торфом мощностью до 0,7 м, подстилаемый суглинками льдистыми (участки заглублённой кровли ММП)	0,5 до 1,7м	от 1,7 до 2,1м
г	Полосы стока с кустарником различной густоты, неравномерно и плохо дренированные заболоченные понижения, травяно-мохово-осоковые	Суглинки, местами перекрытые торфом мощностью до 0,7 м, талые (талики и локальные участки маломощных мёрзлых грунтов)	от 0 - до 0,3м	от 0 до 0,4м

На период конца столетия (2099г):

- максимальные осадки грунтов (и максимальное изменение высотного положения поверхности) будут приурочены к участкам, сложенным льдистыми суглинками (табл. 1, в), даже если они с поверхности перекрыты маломощным торфом (до 0,7м) (табл. 1, б);
- минимальные осадки (и минимальные изменения высотного положения поверхности) будут связаны с участками распространения мощных торфяников (на которых будет отмечаться только некоторое увеличение СТС) (табл. 1, а) и на изначально талых участках (табл. 1, г).

На рисунке 1 показана принципиальная схем трансформации поверхности в результате пространственно-дифференцированной осадки грунтов. Наиболее стабильно положение поверхности в пределах мощных торфяников (участки в, на рис. 1), которые препятствуют глубокому оттаивания и на изначально талых участках (участки а, на рис. 1) в силу отсутствия мёрзлых грунтов. Наибольшее изменение положения поверхности связано с участками, сложенных с поверхности льдистыми суглинками, которые будут подвержены глубокому оттаиванию (участки б, на рис. 1) [Ривкин, Булдович, 2024].

Таким образом, пространственная неоднородность ландшафтных и криолитологических условий создают предпосылки не только к существенному преобразованию геокриологических условий в верхней части геологического разреза, но и к высотной трансформации поверхности ландшафтов и их кардинальному преобразованию. Фактически формируется новый облик местности и новый вариант геокриологических условий в верхней части разреза. Следует отметить, что изначально талые участки (табл. 1, г; участки а, на рис. 1) окажутся в условиях благоприятных

глубокому промерзанию и, естественно, пучению [Ривкин и др., 2025]. То есть прямо обратному процессу. Такие явления происходят и в настоящее время на фоне положительного тренда температуры воздуха и повышения температуры ММП [Иванова и др, 2011; Осадчая, 2016].

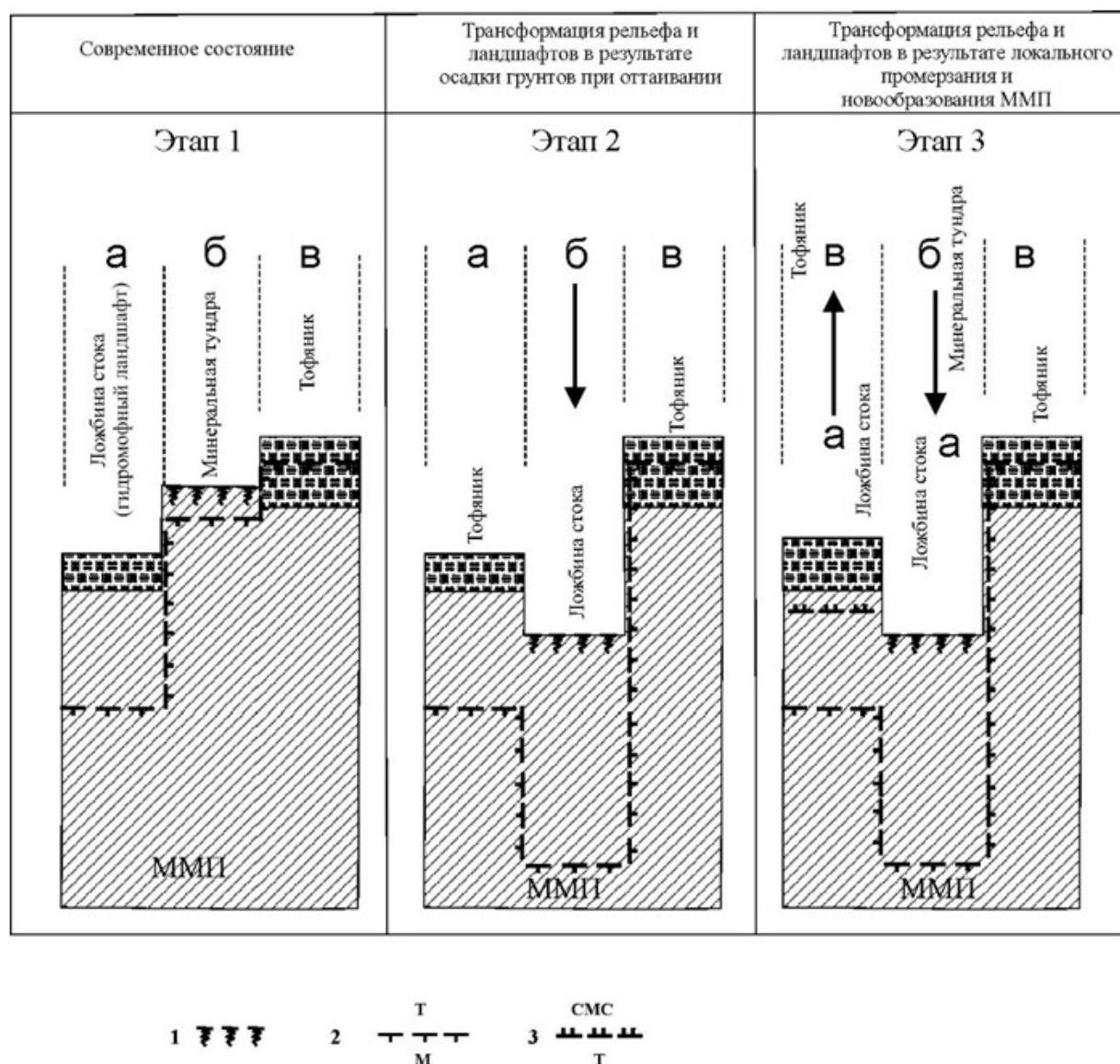


Рис. 1. Принципиальная схема трансформации рельефа при изменении ландшафтных и геокриологических условий в результате оттаивания ММП. Стрелками показано направление смещения поверхности. 1 – почвенно-растительный слой; 2 – граница раздела мёрзлых (М) и талых (Т) грунтов; 3 – глубина многолетнего промерзания (новообразование ММП) [Ривкин, Булдович, 2024].

Исследования трансформации геокриологических условий в верхней части разреза вблизи южной границы распространения ММП показали, что новообразование мёрзлых грунтов на фоне положительного тренда температуры воздуха, вполне закономерны и является частью механизма естественной динамики ММП [Иванова и др, 2011; Seppälä, 2011; Sjöberg et al, 2015; Осадчая, 2016; Ривкин и др, 2017; Minna Väliiranta et al, 2021; Ривкин, Булдович 2024]. Значительные по площади несквозные талики и участки с заглублённой кровлей ММП, расположенные в широких и плоских межблочных понижениях, долинах стока, дренированных озёрных котловинах и других ландшафтах, подвержены локальному промерзанию. При этом, в зависимости от локальных условий формируются и отдельные изолированные участки новообразования ММП, и достаточно

крупные ландшафты, которые хорошо каптируются в крупных масштабах (1:5000 и крупнее) (рис. 2).



Рис. 2. Новообразование ММП в ложбине стока (а) и в обрамлении дренированной озёрной котловины (б) (южный сектор Большеземельской тундры) (Фото: Ф.М. Ривкина (а); А.А.Поповой (б)).



Рис. 3. Останцы грунтово-минеральных сезонных бугров пучения в обрамлении заболоченного гидроморфного понижения (район Кево, Финляндия. Фото Ф.М. Ривкина).

Новообразования устойчивых маломощных приповерхностных ММП существенным образом зависит от сочетания целого комплекса пространственно-временны'х факторов. Наиболее значимыми можно считать следующие:

- сочетание условий на поверхности (температура воздуха, режим снегонакопления, микрорельеф и тд), обеспечивающих быстрое промерзание грунтов на локальном участке;
- грунтовые условия и режим предзимнего увлажнения, обеспечивающие, с одной стороны, глубокое сезонное промерзание и формирование эффективного температурного импульса (температурный импульс, возбуждающий миграцию влаги в промерзающем грунте, и обеспечивает пространственно-дифференцированную миграцию влаги к зоне более интенсивного промерзания грунта [Орлов и др., 1987].

Такое сочетание климатических и грунтовых факторов сезонного цикла промерзания-оттаивания должны обеспечивать сохранения перелетка мёрзлых грунтов. То есть зимнее промерзание не должно компенсироваться летним оттаиванием ( $СМС > СТС$ ).

На рисунке 4 приведён фрагмент результатов режимных наблюдений (в период 2012-2019гг) за температурой в почвенном профиле, показывающих, что на фоне достаточно высоких температур в начале зимнего периода в отдельные годы формируются более низкий температурный фон (2015 г) обеспечивающий достаточно быстрое промерзание. В 2015 году течении трёх суток (с 13 по 16 октябрь) на участке с маломощным снежным покровом произошло полное промерзание сезонно-талого слоя.



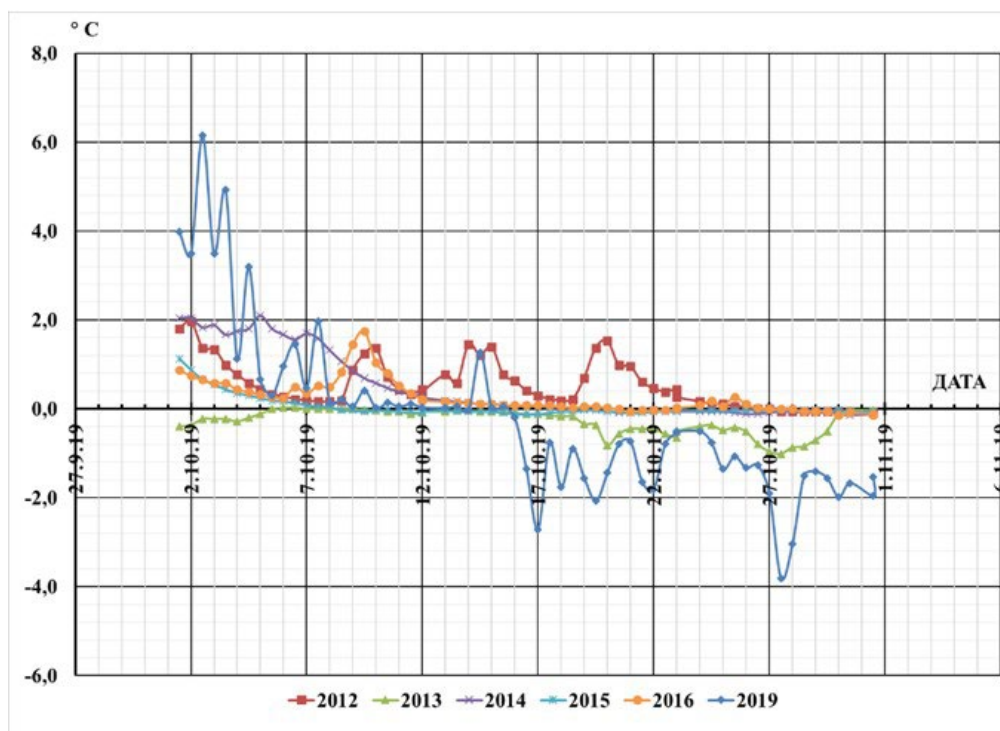


Рис. 4. Температура на поверхности грунта (под растительным слоем по двум отсечкам в сутки 12-00 и 24-00) в период осенней инверсии знака температуры воздуха.

Оптимальным криолитологическим разрезом для опережающего промерзания и созданием ареала для глубокого сезонного промерзания и новообразования ММП можно считать водонасыщенный суглинок, перекрытый слоем торфа мощностью 0,35-0,4 м. Промерзание суглинка обеспечит существенное приращение пучения, а слой торфа мощностью 35-40 см обеспечит сохранение перелетка, так как практически обеспечивает локализацию СТС в пределах торфяного слоя. Для гидроморфных участков, каковыми и являются локальные понижения (ложбины стока и тп), это достаточно типичная ситуация. И в этом случае величина пучения при промерзании суглинка под слоем торфа 0,3 м уже в начале зимнего периода может составить 8-10 см, а с учётом миграционного льдовыделения и более [Ривкин, Булдович, 2024]. То есть создаются условия для формирования первичного бугра, дальнейшее развитие которого может привести к формированию устойчивого новообразования приповерхностных ММП. Именно с этим связана локализация новообразований ММП по периферии дренированных озёрных котловин (рис. 2б) и меж-блоковых гидроморфных понижений (рис. 2а), где чаще встречаются условия, оптимальные для новообразования ММП.

Важным элементом является и то, что в образовавшемся в результате промерзания локального поднятия поверхности (первичного бугра) происходит существенное изменение условий теплообмена. Это обусловлено с целым 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 снижению его утепляющего влияния и понижению температуры пород.
- Во-вторых, дренирование верхней части торфяного слоя в пределах поднятия. Фактически речь идет о возникновении в пределах поднятия дополнительного теплоизолирующего покрова на поверхности со значительным термическим сопротивлением.

Для оценки влияния двух указанных факторов на среднегодовую температуру пород и глубины сезонного оттаивания-промерзания (СТС-СМС) решалась серия одномерных задач в спектре изменения высоты поднятия поверхности и соответствующего изменения свойств покровов. Фактически решалась задача обоснования достаточности

геокриологических и термодинамических условий для начала процесса новообразования ММП как парагенетического с деградацией мёрзлых пород процесса.

Задачи решались с использованием методики аналитического расчёта геокриологических характеристик при двухслойном строении СТС [Булдович, 2016]. Расчёты контролировались численным компьютерным моделированием. Одномерная схема в данном случае является существенным упрощением реальной ситуации, поскольку она не учитывает боковое тепловое взаимодействие «кочки» с окружающими породами. Однако, целью анализа была именно оценка степени воздействия разных факторов теплообмена непосредственно в пределах поднятия и их достаточности для начала новообразования ММП.

Задача решалась в 2х вариантах:

В первом варианте расчёта оценивалось только изменения мощности слоя дренирования торфа при формировании бугра. Мощность снега принималась такой же, как и на прилегающей ровной поверхности. Мощность дренированного слоя торфа была принята равной высоте поднятия (бугра) и увеличивалась по мере роста бугра при пучении.

Во втором варианте расчёта помимо учёта мощности слоя дренирования, учитывалось и изменение высоты снега над поднятиями, как это обычно происходит при ветровом перераспределении снега.

Результаты расчетов показали чрезвычайно высокую чувствительность геокриологических условий к воздействию двух рассмотренных факторов. Сильное влияние высотной дифференциации поверхности, проявилось уже с первых сантиметров относительного роста поднятия. На рисунке 5 приведены результаты расчёта температуры грунтов на подошве слоя сезонного оттаивания и промерзания, которые показывают, что в общая картина для первого и второго вариантов расчёта качественно не отличаются друг от друга. Однако, имеются существенные количественные отличия:



Рис. 5. Изменение среднегодовой температуры пород (на подошве слоев сезонного промерзания – оттаивания) в зависимости от высоты бугра. 1 – вариант учитывается только изменение мощности слоя дренированного торфа, снежный покров не изменяется; 2 – вариант изменения как мощности сухого торфа, так и снежного покрова в соответствии с высотой поднятия

- В первом варианте за счёт увеличения тепляющего влияния дренирования торфа температура грунтов на подошве слоя сезонного оттаивания и промерзания повысилась, но, тем не менее перешла через  $0^{\circ}\text{C}$  и стала отрицательной при высоте бугра около 0,075 м, а при высоте бугра 0,2 м составила уже минус 0,89 $^{\circ}\text{C}$ .

- Во втором варианте, среднегодовая температура пород перешла через ноль в отрицательную область уже при высоте бугра всего 0,03 м, а при высоте поднятия 0,20 м

среднегодовая температура пород опустилась до минус 2,31°C, что обеспечивает достаточно активное промерзание под бугром. При этом температура пород на окружающих бугор участках оставалась ещё положительной и равной 0,65°C.

Анализ выполненных расчётов показывает, что даже совсем незначительная высотная дифференциация исходной поверхности – порядка 0,05-0,2 м - может привести к радикальному изменению мерзлотных условий на приподнятых участках с формированием островов мерзлых пород (причем достаточно низкотемпературных), а локальное многолетнее промерзание может происходить вопреки тренду общего потепления климата.

**Заключение.** Парагенезис оттаивания мёрзлых грунтов и их новообразование на фоне положительного климатического тренда является закономерным явлением, широко представлен, и является важным фактором формирования современного рельефа и криогенных ландшафтов.

Локальное новообразование ММП так или иначе 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 результат многолетней и дифференцированной по площади осадки грунтов в результате деградации ММП.

**Финансирование.** Работа выполнена институтом криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема: “Изучение формирования, структуры, изменчивости и прогнозирование 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. В кн. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях. М., 2016. С.87-109.

Геокриологический словарь / Г.И. Дубиков, В.И. Аксенов, М.М. Корейша, В.Э. Мурзаева, В.Л. Познанин, Ф.М. Ривкин и др. М., ГЕОС, 2003, 140 с. ISBN 5-89118-338-2.

*Иванова Н.В., Кузнецова И.Л., Пармузин И.С., Ривкин Ф.М., Сороковиков В.А.* 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.

*Осадчая Г.Г.* Мерзлотно-ландшафтная дифференциация Большеземельской тундры: современное состояние и использование при освоении: Автореф. дис. д-ра геогр. наук. Москва. 2016. 50 с.

*Орлов В.О., Елгин Б.Б., Железняк И.И.* Морозное пучение грунтов в расчётах оснований сооружений. Новосибирск: Сиб. отд-ние, 1987. 133 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. doi: 10.15372/KZ20240102

*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

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.

Christensen J.H., Christensen O.B., Schulz J.P., Hage-mann S., Botzet M. High resolution physiographic data set for HIRHAM4: An application to a 50 km horizontal resolution domain covering Europe // Tech. Rep. 01-15, Danish Meteorol. Inst., Copenhagen, Denmark, 2001. P. 25.

Minna V., Marushchak M.E., Tuovine J.-P., Lohila A., Biasi C., Voigt C. 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 // Quaternary Science Reviews. 2021. Vol. 264, 107022. doi:10.1016/j.quascirev.2021.107022

Seppälä M. Synthesis of studies of palsa formation underlining the importance of local environmental and physical characteristics // Quaternary Research. 2011. Vol. 75. Is. 2. P. 366–370. doi:10.1016/j.yqres.2010.09.007.

Sjöberg Y., Marklund P., Pettersson R., Lyon S.W. Geophysical mapping of palsa peatland permafrost // The Cryosphere. 2015. Vol. 9. P. 465–478. doi:10.5194/tc-9-465-2015

## REGULARITIES OF CRYOGENIC RELIEF FORMATION AS A RESULT OF PARAGENESIS OF THAWING AND FREEZING OF GROUNDS

Rivkin F.M.<sup>1</sup>, Buldovich S.N.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre of Siberian Branch RAS, Tyumen, Russia

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Patterns of relief and landscape transformation are examined as a result of the paragenesis of degradation and aggradation processes in soils under a positive climate trend. Spatial differentiation of soil settlement during thawing leads to the formation of new landscape forms. Some of these become favorable for the new frozen grounds formation. Predictive modeling has shown that even minor altitudinal differentiation of an initially flat hydromorphic surface (0.05-0.2 m) can lead to the formation of frozen soils. It has been established that the complex of paragenetic processes of soil thawing and freezing against a background of a positive climate trend contributes to specific transformations of the surface topography and the formation of new landscape forms.

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

### REFERENCES:

Buldovich S.N. Methodology for approximate assessment and prediction of geocryological characteristics - average annual temperature and depth of thawing (freezing) of grounds. In the book Fundamentals of permafrost forecasting in engineering-geological research. M., 2016. P.87-109. (in Russian).

Geocryological glossary / Compiled G.I. Dubikov, V.I. Acsenov, M.M. Koreisha, V.E. Murzaeva, V.L.Poznanin, F.V.Rivkin. M.: GEOS. 2003. 140 p. ISBN 5-89118-338-2 (in Russian)

Ivanova N.V., Kuznetsova I.L., Parmuzin I.S., Rivkin F.M., Sorokovikov V.A. 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).

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).

Orlov V.O., Elgin B.B., Zheliznyak I.I. Frost heaving of grounds in calculations of building foundations. Novosibirsk: Sib. Branch. 1987. p.13. (in Russian)

Rivkin F.M., Buldovich S.N. Regularities of new formation of frozen grounds against the background of a positive climatic trend // Earth's Cryosphere. 2024. Vol. 28. № 1. P. 15-22. doi: 10.15372/KZ20240102

Rivkin F.M., Buldovich S.N., Kaverin D.A. Paragenesis of degradation and aggradation processes in frozen ground // Earth's Cryosphere. 2025. Vol. 29. № 1. P. 25–36. doi: 10.15372/KZ20250103



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

*Christensen J.H., Christensen O.B., Schulz J.P., Hage-mann S., Botzet M.* High resolution physiographic data set for HIRHAM4: An application to a 50 km horizontal resolution domain covering Europe // *Tech. Rep. 01-15, Danish Meteorol. Inst., Copenhagen, Denmark*, 2001. P. 25.

*Minna V., Marushchak M.E., Tuovine J.-P., Lohila A., Biasi C., Voigt C. 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 // *Quaternary Science Reviews*. 2021. Vol. 264, 107022. doi:10.1016/j.quascirev.2021.107022

*Seppälä M.* Synthesis of studies of palsa formation underlining the importance of local environmental and physical characteristics // *Quaternary Research*. 2011. Vol. 75. Is. 2. P. 366–370. doi:10.1016/j.yqres.2010.09.007.

*Sjöberg Y., Marklund P., Pettersson R., Lyon S.W.* Geophysical mapping of palsa peatland permafrost // *The Cryosphere*. 2015. Vol. 9. P. 465–478. doi:10.5194/tc-9-465-2015