

ЗАКОНОМЕРНОСТИ НОВООБРАЗОВАНИЯ МЕРЗЛЫХ ПОРОД НА ФОНЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО КЛИМАТИЧЕСКОГО ТРЕНДА

Ф.М. Ривкин^{1,*}, С.Н. Булдович²

¹ Институт криосферы Земли ТюМНЦ СО РАН, 625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия

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

Представлены результаты исследования закономерностей новообразования мерзлых пород вблизи южной границы распространения многолетнемерзлых пород на фоне положительного климатического тренда. Установлены критерии развития этого процесса на фоне потепления климата. Представлены результаты моделирования и дана количественная оценка новообразования мерзлых пород в результате трансформации рельефа с учетом дренажа почвы и отепляющего влияния снежного покрова.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, оттаивание многолетнемерзлых пород, осадка мерзлых пород при оттаивании, промерзание талых пород, изменение геокриологических условий, инверсия рельефа.

Ссылка для цитирования: 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. EDN: BRODEN.

REGULARITIES OF NEW FORMATION OF FROZEN SOILS AGAINST THE BACKGROUND OF A POSITIVE CLIMATIC TREND

Ф.М. Ривкин^{1,*}, С.Н. Булдович²

¹ Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Malygina St. 86, Tyumen, 625026 Russia

² Lomonosov Moscow State University, Leninskoe Gory 1, Moscow, 119991 Russia

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

The results of a study of the regularities of new formation of frozen soils near the southern border of permafrost distribution against the background of a positive climate trend are presented. Criteria for the potential formation of permafrost in response of climate warming are established. The results of modeling and quantitative assessment of the newly formed permafrost, caused by transformation of landforms during thawing of frozen soils, are presented taking into consideration soil drainage and heating effect of the snow cover.

Keywords: permafrost, thawing of frozen ground, freezing of thawed grounds, changes in permafrost conditions, frozen ground thaw subsidence, relief inversion.

ВВЕДЕНИЕ

Современная направленность динамики климата в Арктике в геокриологическом отношении проявляется, как известно, в повышении температуры мерзлых пород, и в первую очередь в верхней части геологического разреза. В краткосрочной перспективе это ведет к увеличению мощности сезонноталого слоя (СТС) и появлению талого, не промерзающего зимой слоя над кровлей многолетнемерзлых пород (ММП). Дальнейшее повышение температуры воздуха должно было бы способствовать понижению кровли многолетнемерзлых пород и формированию участков с заглубленным положением кровли ММП. Однако благодаря появлению перманентного талого слоя возникает хорошо известный эффект “нулевой завесы” [Геокриологический словарь, 2003; Glossary..., 1988]. Возникновение талого слоя между подошвой се-

зонномерзлого слоя (СМС) и кровлей ММП будет оказывать существенное влияние на структуру годовых теплооборотов. В частности, существенно сократится глубина проникновения годовых колебаний температуры. Формирование в верхней части разреза такого термодинамического барьера само по себе стабилизирует (консервирует на некоторое время) геокриологические условия на новом уровне, даже в случае постоянного повышения температуры воздуха.

Важным фактором, влияющим на формирование геокриологической обстановки в верхней части разреза, является и изменение микрорельефа поверхности из-за осадки пород при их оттаивании. Закономерности этого явления (инверсия рельефа) изучались на участке Сейда, расположенным в Воркутинском районе [Ривкин и др.,

2017]. В результате пространственной неоднородности этого процесса создаются предпосылки к существенной трансформации геокриологических условий в верхней части разреза.

Основные закономерности изменения геокриологических условий в приповерхностной части разреза

Можно выделить несколько этапов (или стадий) трансформации современных геокриологических условий на фоне положительного температурного тренда. На рис. 1 приведена схема изменения соотношения мощности СТС, СМС и кровли ММП в верхней части разреза в результате повышения температуры пород. Выделено три основные стадии трансформации геокриологических условий в зависимости от соотношения мощности СТС, СМС и глубины положения кровли ММП: *а* – стадия равенства СМС и СТС; *б* – стадия увеличения СТС и начала формирования талого слоя, разделяющего подошву СМС и кровлю ММП; *в* – стадия формирования устойчивой несливающейся мерзлоты, глубина положения кровли ММП существенно больше глубины сезонного промерзания. Явление приповерхностной несливающейся мерзлоты (заглубленной кровли ММП) очень распространено на севере Западной Сибири и Европейском Севере и является в зависимости от широтного положения или реликтом климатического оптимума голоцен, или результатом более поздних короткопериодных климатических колебаний. Общим свойством для таких участков является то, что они, как правило, не имеют в естественных условиях выраженной ландшафтной индикации. То есть в пределах микрорайона с однотипным ландшафтом в приповерхностной части

разреза могут существовать и участки с заглубленной кровлей (несквозные талики), и участки с мерзлыми породами сливающегося типа. Современные условия, которые сформировались и существуют на территории такого ландшафтного микрорайона, обеспечивают устойчивое существование таких несквозных таликов в обрамлении массивов мерзлых пород. Таким образом, формируется достаточно устойчивая в термодинамическом отношении геокриологическая система (см. рис. 1, *в*).

Важнейшим геоэкологическим и инженерно-геокриологическим последствием перехода приповерхностной части мерзлых пород в талое состояние является осадка поверхности. Пространственная дифференцированность величины осадки мерзлых пород при оттаивании, предопределенная как пространственной неоднородностью литологического состава и свойств мерзлых пород, так и современным процессом теплообмена на поверхности, существенно влияет на формирование новых ландшафтных условий. Формирование этих условий будет происходить на фоне деградации мерзлых пород и криогенной инверсии рельефа. В первую очередь изменится микрорельеф и гидроморфность (дренированность) современных ландшафтов. Следствием этого будет изменение локальных условий теплообмена на поверхности. В конечном счете это приведет к изменению условий сезонного промерзания и оттаивания, они будут отличаться от существующих ныне условий. На некоторых участках будут созданы условия для глубокого сезонного промерзания, возникновения перелетков и маломощных многолетнемерзлых грунтов. Это происходит и в настоящее время даже на фоне положительного тренда температуры воздуха и температуры ММП [Иванова и др., 2011; Осадчая, 2016; Rivkin et al., 2008].

На рис. 2 приведена схема трансформации приповерхностных условий в результате понижения кровли ММП, осадки поверхности при оттаивании мерзлых пород и относительного повышения локальных участков в результате новообразования маломощных приповерхностных ММП. Стрелками показано направление трансформации рельефа. Прогноз трансформации рельефа и геокриологических условий сделан на основе предполагаемого повышения температуры воздуха в XXI столетии согласно региональной климатической модели HIRHAM4 [Christensen et al., 1996, 2001].

На рис. 2 выделено три основных этапа трансформации рельефа при сохранении положительного климатического тренда в XXI в. Этап 1 соответствует современному состоянию ландшафтно-геокриологических условий. Зона *а* на схеме соответствует достаточно типичному криолитоло-

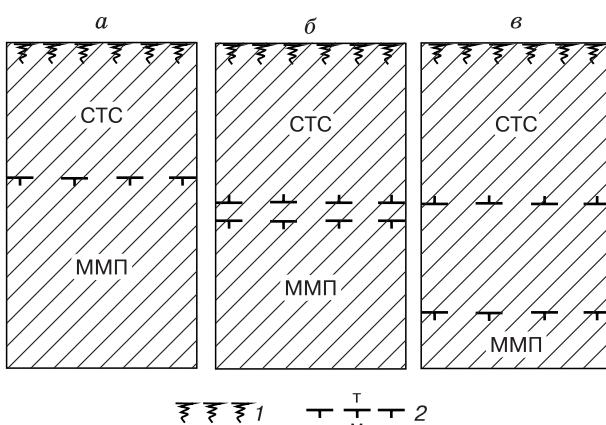


Рис. 1. Принципиальная схема изменения соотношения СТС/СМС/ММП в верхней части разреза в результате повышения температуры пород:

1 – почвенно-растительный слой; 2 – граница раздела мерзлых (м) и талых (т) пород. СТС – сезонноталый слой, СМС – сезонномерзлый слой, ММП – многолетнемерзлые породы.

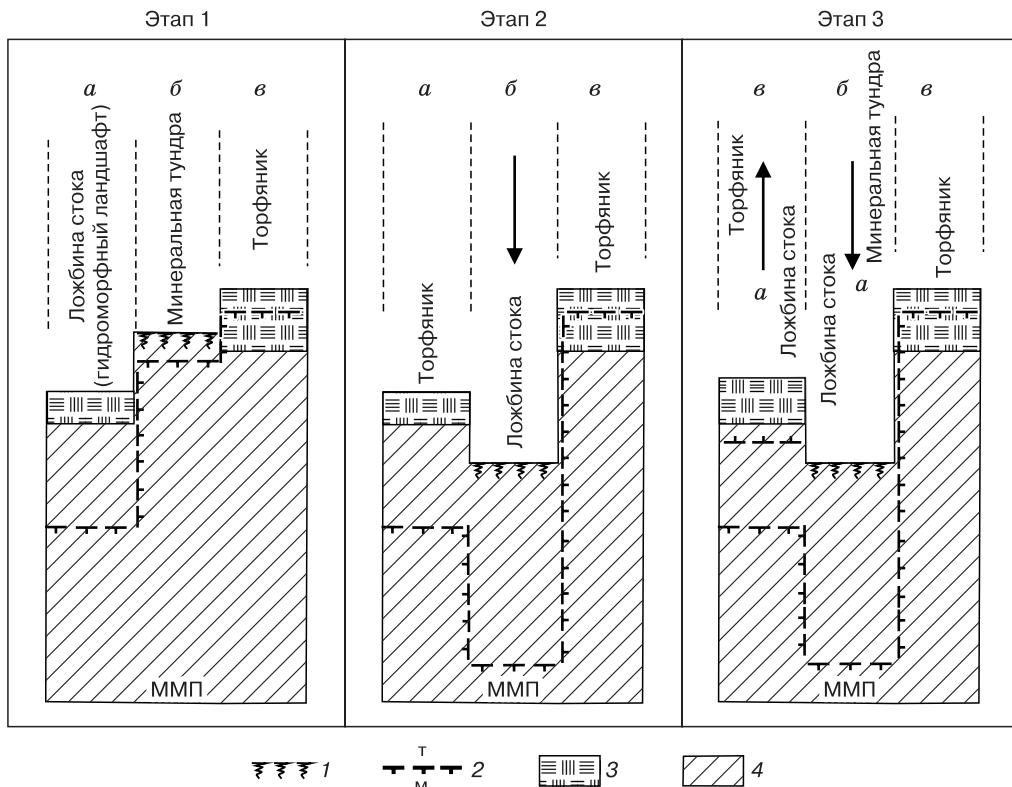


Рис. 2. Принципиальная схема трансформации ландшафтных и геокриологических условий в результате оттаивания ММП.

Этап 1 – современное состояние, этап 2 – трансформация рельефа и ландшафтов в результате осадки грунтов при оттаивании, этап 3 – их трансформация в результате промерзания и новообразования ММП. Стрелками показано направление смещения поверхности. 1 – почвенно-растительный слой; 2 – граница раздела мерзлых (м) и талых (т) грунтов; 3 – торф, 4 – суглинок

тическому разрезу, который характерен для заболоченных понижений (например, ложбины временного стока) на всех геоморфологических уровнях. Верхняя часть разреза на таких переувлажненных участках представлена, как правило, заторфованными отложениями или слаборазложившимся торфом. В силу избыточного поверхностного увлажнения и повышенного снегонакопления здесь обычно формируются несквозные талики. Положение кровли ММП в этом случае понижено, а верхняя часть разреза находится в талом состоянии. На севере Ямала понижение кровли ММП (непромерзающая часть несквозного талика) может составлять всего несколько метров, а иногда не превышать 0.5 м [Ривкин, Левантовская, 2002]. На юге, вблизи южной границы распространения мерзлых пород, кровля ММП в пределах ложбин стока существенно глубже и обычно варьирует от 5 до 10 м [Суходольский, 1982; Геокриология СССР, 1988]. Безусловно, это сильно зависит от ландшафтно-геоморфологических и криолитологических условий участка: ширины долины и глубины ее вреза по отношению к при-

легающей территории, условий снегонакопления, состава пород и т. д. Осадки поверхности из-за оттаивания пород в результате положительного климатического тренда на таких участках не происходит, так как порода уже находится в талом состоянии. Дальнейшее оттаивание и осадка пород будут происходить существенно медленнее и с сильной задержкой во времени. Таким образом, абсолютная отметка поверхности пород останется на прежнем уровне (см. рис. 2, этап 2а) или изменится незначительно в результате консолидации пород при их дренировании. Зоны б и в на рис. 2 (этап 1) соответствуют изначально мерзлым участкам, сложенным в верхней части разреза минеральными, как правило, льдистыми породами б и мерзлым торфом в, подстилаемым мерзлыми минеральными породами.

Геокриологические условия на этапе 2 (см. рис. 2) в целом соответствуют ситуации, формирующейся в результате оттаивания мерзлых грунтов при положительном климатическом тренде. Наибольшие изменения прогнозируются на участках, близких по своим условиям к зоне б (см. рис. 2,

этап 2б). Верхняя часть разреза таких участков представлена льдистыми минеральными породами и перекрыта мохово-растительным слоем относительно небольшой мощности. Оттаивание пород на таких участках будет сопровождаться существенной осадкой поверхности. При понижении кровли ММП на 10 м осадка поверхности может составить 2.5 м и более для глинистых льдистых пород [Ривкин и др., 2017; Rivkin et al., 2008].

Абсолютное положение поверхности пород в зоне *в* (см. рис. 2, этапы 1в, 2в, 3в), сложенных с поверхности торфом большой мощности, останется стабильной на всех этапах развития.

Многолетнее промерзание будет сопровождаться пучением и вследствии этого повышением (как абсолютным, так и относительным, по отношению к прилегающим участкам) поверхности пород, т. е. инверсией рельефа на некоторых участках. На рис. 2 показано, как изменится соотношение положения поверхности пород в зонах *а* и *б* на всех этапах трансформации рельефа. Амплитуда инверсии микрорельефа будет определяться локальными факторами, показывающими степень пучинистости грунтов (влажность, состав, дисперсность, наличие источника воды и т. д.), и глубиной многолетнего промерзания.

Таким образом, заболоченное (сложенное в верхней части торфом) локальное понижение (см. рис. 2, этап 1а) в результате промерзания с поверхности трансформируется в относительно приподнятый талый участок (этап 2а), а затем в мерзлый торфяник (этап 3а). Поверхность нового ландшафтного участка в результате пучения повышается и из пониженного участка рельефа трансформируется в относительно возвышенный: зона *а* (гидроморфное понижение) трансформируется в зону *в* – мерзлый торфяник (см. рис. 2, этап 3). Зона *а*, сложенная с поверхности торфом, будет (в связи с дренированием за счет относительного опускания поверхности соседних участ-

ков) благоприятна для локального многолетнего промерзания, формирования перелетков и маломощной мерзлоты даже на фоне положительного тренда температуры воздуха. Уже в современных условиях это явление часто встречается в виде новообразования мерзлых пород в днищах заболоченных локальных понижений рельефа (рис. 3).

Зона *б* на рис. 2, сложенная льдистыми минеральными породами, при повышении температуры пород будет испытывать другие изменения. На таких участках оттаивание мерзлых пород и осадка поверхности ландшафта при их оттаивании приведут к существенной трансформации ландшафта в целом. Абсолютное положение поверхности пород в зоне *б* понизится на величину осадки при оттаивании (на 2.5–3.0 м при оттаивании мерзлых пород на глубину до 10 м в зависимости от криолитологических условий разреза) [Ривкин и др., 2017]. Таким образом, относительно возвышенный и дренированный в современных условиях ландшафтный участок минеральной тундры (см. рис. 2, этап 1б) в результате оттаивания мерзлых пород и понижения поверхности при осадке пород трансформируется в конечном счете в заболоченное гидроморфное понижение (трансформация зоны *б* в зону *а*, см. рис. 2, этап 3).

Следует отметить, что если понижение поверхности в результате осадки пород при оттаивании и трансформации рельефа относительно дренированных участков минеральной тундры в гидроморфные заболоченные понижения в целом достаточно обоснованно (это закономерно на фоне потепления климата и, как следствие, повышения температуры пород и их оттаивания), то обратный процесс (локальное новообразование мерзлых грунтов на фоне повышения температуры мерзлой толщи в целом) требует более детального исследования. В частности, предполагается, что немаловажную роль при этом может играть понижение влажности биогенных покровов в ходе дренирования участков территории в результате криогенно-преобразования рельефа.

Глубокое сезонное промерзание, как известно, характерно для участков с определенным сочетанием природных факторов: климатических, ландшафтных и литологических. В первую очередь это участки с достаточно низким температурным фоном приземного воздуха, отсутствием кустарниковой и кустарничковой растительности, маломощным снежным покровом или участки, с которых снег постоянно сдувается ветром. С точки зрения криолитологических условий, это участки, сложенные в верхней части геологического разреза породами, коэффициент теплопроводности которых в мерзлом состоянии существенно больше, чем в талом. В мерзлотоведении такое сочетание природных факторов – классиче-



Рис. 3. Новообразование мерзлых грунтов в заболоченном понижении.

Стрелки указывают на участки промерзания и новообразования ММП.

ское условие для формирования перелетков мерзлых пород и многолетнего промерзания.

В слабодренированных понижениях (ложбинах локального стока, озерных понижений, участках обрамления озерных котловин и подобных гидроморфных участках) на всех геоморфологических уровнях условия для глубокого промерзания не самые благоприятные. Верхняя часть разреза на таких гидроморфных участках обычно представлена торфом или сильно оторфованными суглинистыми отложениями, которые перекрыты с поверхности мощным (20–30 см) моховым покровом. Неравномерные локальные условия теплообмена на поверхности, обусловленные естественными неровностями мохового покрова и формирующегося снежного покрова, способствуют и дифференцированности промерзания в пределах одного микрорайона. При благоприятном сочетании сезонных факторов, а именно: раннем установлении отрицательных температур воздуха и позднем установлении снежного покрова, создаются условия для опережающего промерзания в местах пониженного снегонакопления и более интенсивного охлаждения поверхности. В результате формируется небольшой бугор. Уменьшение мощности снега на вершине бугра в результате ветрового перераспределения снега будет способствовать более глубокому промерзанию и формированию перелетка. Подобные явления широко встречаются в настоящее время на участках хасыреев, в межблоковых понижениях бугристых торфяников и на других, аналогичных по гидроморфности и ландшафтным условиям участках (см. рис. 3).

Такое образование перелетков происходит как на территориях с достаточно низким температурным фоном (см. рис. 3), так и на территориях островного и спорадического распространения ММП, в частности, в Шведской Лапландии и на севере Финляндии, где среднегодовая температура воздуха близка к 0 °C, а мерзлые породы приурочены только к бугристым торфяникам и представляют собой “пальса” [Seppälä, 2011; Sjöberg *et al.*, 2015]. Практически повсеместно отмечается новообразование мерзлых пород на гидроморфных участках вокруг озер и в межблоковых понижениях бугристых торфяников [Иванова и др., 2011]. Мерзлые бугристые торфяники в Шведской Лапландии и на севере Финляндии фактически являются результатом вторичного промерзания пород на тех участках, где мерзлые породы ранее оттали. Фоновая среднегодовая температура пород в обрамлении мерзлых участков практически повсеместно выше 0 °C. Тем не менее и в настоящее время здесь создаются условия для промерзания и локального новообразования мало-мощной мерзлоты.

Результаты моделирования возможности новообразования мерзлых грунтов

Для обоснования возможности новообразования мерзлых пород на фоне положительного тренда среднегодовой температуры воздуха выполнено численное моделирование геокриологической ситуации, развивающейся на торфяниках в природных условиях района г. Воркуты. Среднемесячные температуры воздуха приняты по данным метеонаблюдений за последние 75 лет [<http://www.pogodaiklimat.ru/history/23226.htm>] и приведены в табл. 1.

Моделирование геокриологической обстановки осуществлялось путем численного решения тепловой задачи типа Стефана с помощью компьютерной программы “WARM” [Программа..., 1994]. Основным переменным фактором при этом была влажность торфяного покрова. Термическое сопротивление снежного покрова в ходе моделирования также варьировалось в диапазоне реально возможных изменений этой характеристики в природе. Рассматривался двухслойный разрез пород: верхний слой был представлен торфом, который подстипался толщей суглинков. При этом расчеты велись для двух вариантов мощности торфяного покрова. В первом случае мощность торфа принята 0.3 м, что обычно меньше глубин сезонного оттаивания пород (двухслойное строение СТС), во втором случае мощность торфа превышала возможную глубину сезонного оттаивания пород, т. е. все фазовые переходы воды происходили в пределах торфяного слоя (однослойное строение СТС).

Теплофизические характеристики торфа в области изменения его влажности от небольших значений до полного влагонасыщения рассчитывались по известным зависимостям [Гаврильев, 2004]. Содержание незамерзшей воды в торфяном покрове в соответствии с графиками Ф.И. Гаврильева [2004] задавалось равным одной четверти от общего влагосодержания. Плотность скелета торфа равна 0.18 г/см³. В качестве подстилающего слоя рассматривался водонасыщенный су-

Таблица 1. Среднемесячные температуры воздуха по м/с Воркута

| Месяц | Температура, °C |
|-------|-----------------|
| I | -19.9 |
| II | -19.8 |
| III | -15.0 |
| IV | -8.9 |
| V | -2.0 |
| VI | 7.1 |
| VII | 13.0 |
| VIII | 9.8 |
| IX | 4.2 |
| X | -4.0 |
| XI | -13.0 |
| XII | -16.7 |

Таблица 2.

Теплофизические свойства пород, принятые при моделировании

| Показатель | Суглинок | Торф | | | | |
|---|----------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Весовая влажность, д.е. | 0.3 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 4.88 |
| Влажность незамерзшей воды, д.е. | 0.1 | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1 | 1.22 |
| Теплопроводность в талом состоянии, Вт/(м·°C) | 1.65 | 0.14 | 0.22 | 0.32 | 0.44 | 0.55 |
| Теплопроводность в мерзлом состоянии, Вт/(м·°C) | 1.95 | 0.10 | 0.26 | 0.52 | 0.89 | 1.30 |
| Объемная теплоемкость в талом состоянии, кДж/(°C·м ³) | 3310 | 1080 | 1830 | 2590 | 3340 | 4010 |
| Объемная теплоемкость в мерзлом состоянии, кДж/(°C·м ³) | 2685 | 800 | 1270 | 1740 | 2210 | 2630 |
| Теплота фазовых переходов, МДж/(°C·м ³) | 100.56 | 45.25 | 90.50 | 135.76 | 181.01 | 220.83 |
| Плотность скелета, г/см ³ | 1.5 | | | 0.18 | | |

глинок с плотностью скелета 1.5 г/см³, теплофизические свойства которого приняты по данным СП 25.13330.2020 (приложение Б). Используемые в модели теплофизические свойства приведены в табл. 2.

Результаты моделирования показали, что дренирование торфа при его относительном поднятии по отношению к смежным участкам (даже без учета сдувания снега с бугров) приводит к заметному понижению среднегодовой температуры пород и в определенных условиях – к началу их многолетнего промерзания (рис. 4). Как видно на рис. 4, темп понижения температуры пород с уменьшением их влажности примерно одинаков для вариантов с малой и большой мощностью торфа, однако второй вариант оказывается более “холодным”. Многолетнее промерзание начинается при более высокой влажности торфа, когда понижение температуры существенное.

Выявленная закономерность имеет следующее объяснение. Уменьшение влажности торфа за счет его дренирования приводит к уменьшению отрицательной температурной сдвиги и, следовательно, к некоторому повышению среднегодовой температуры пород. В то же время при уменьшении влажности торфа уменьшаются и затраты тепла на фазовые переходы, что приводит к сокра-

щению величины годового теплооборота в породах и сопутствующему резкому снижению отепляющего влияния снега. Причем, как показывают результаты моделирования, это уменьшение отепляющего влияния снега оказывается доминирующим в данной ситуации. Таким образом, среднегодовая температура пород понижается и в определенной природной обстановке создаются условия для многолетнего промерзания. В рассматриваемом случае базовым условием новообразования ММП является уменьшение влажности торфа, вызванное локальным увеличением дренированности участка и в конечном счете провоцирующее уменьшение отепляющего влияния снега. К этому может добавляться снижение отепляющего влияния снега из-за уменьшения его мощности на вершине бугра вследствие ветрового сноса снега.

Формируется вполне прогнозируемая ситуация. На относительно возвышенных участках будет увеличиваться глубина СМС и становится возможным многолетнее промерзание. При мощности торфа более 0.7 м на фоне дренирования торфа [Seppälä, 2011; Sjöberg *et al.*, 2015] и уменьшения отепляющего влияния снега на буграх создаются еще более благоприятные условия для устойчивого новообразования мерзлых пород.

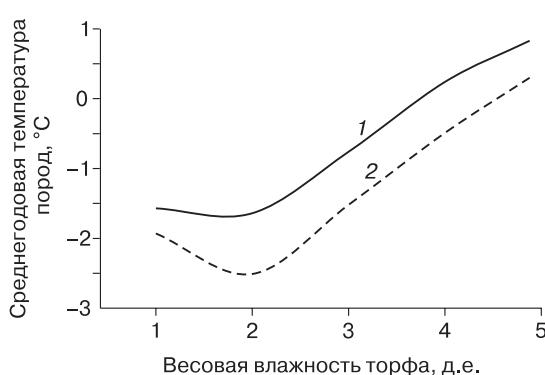


Рис. 4. Зависимость температуры пород от влажности торфа.

1 – торф мощностью 0.3 м, подстилаемый суглинками;
2 – торф мощностью более 0.7 м, подстилаемый суглинками.
Термическое сопротивление снежного покрова 1.6 м²·°C/Вт;

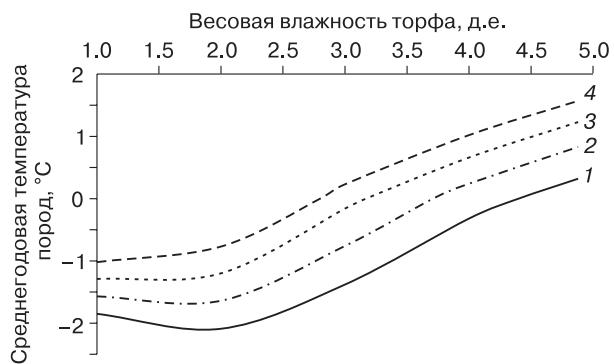


Рис. 5. Среднегодовая температура пород при мощности слоя торфа 0.3 м в зависимости от его влажности и термического сопротивления снежного покрова.

1 – 1.4 м²·°C/Вт; 2 – 1.6 м²·°C/Вт; 3 – 1.8 м²·°C/Вт;
4 – 2.0 м²·°C/Вт.

Прогнозное моделирование температуры пород с учетом дренирования торфа на участках локального повышения рельефа (рис. 5) показало, что даже при мощности слоя торфа всего 0.3 м в результате понижения его влажности при дренировании среднегодовые температуры пород с положительных значений опускаются до $-1\ldots-2$ $^{\circ}\text{C}$. При большей мощности торфа, как отмечалось выше, указанное понижение температуры пород происходит еще быстрее. Заметим, что это происходит при характерных фоновых значениях высоты снежного покрова (диапазон значений термических сопротивлений снега 1.4–2.0 $\text{C m}^2/\text{Вт}$ соответствует среднезимней высоте снежного покрова 0.3–0.5 м). Если же учесть уменьшение мощности снежного покрова на формирующихся буграх за счет ветрового сноса, то понижение температуры пород будет еще более существенным (см. рис. 5). Такая температура обеспечивает глубокое промерзание пород, новообразование ММП, многолетнее пучение и инверсионную трансформацию рельефа.

Это явление будет означать трансформацию талых гидроморфных понижений рельефа (ложбин стока, дренированных озерных котловин и др.) с мощностью торфа более глубины СТС в мерзлые участки (см. рис. 2, этап 3), т. е. агградацию ММП. В пространственном отношении это приведет к тенденции сохранения суммарной площади распространения ММП на фоне положительного тренда потепления климата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях существующей тенденции климатических изменений дифференцированная осадка поверхности при оттаивании ММП приведет к частичной инверсии рельефа. Днища существующих озер и заболоченных котловин, где не будет происходить осадка поверхности, окажутся несколько приподнятыми по отношению к участкам, где осадка при оттаивании будет значительной. Тем самым реализуется инверсия рельефа.

На относительно приподнявшихся в результате дифференцированной осадки при оттаивании участках, сложенных с поверхности торфом мощностью более глубины сезонного оттаивания (0.5–0.7 м), формируются условия для глубокого многолетнего промерзания за счет снижения теплооборотов в породе, уменьшения отепляющего влияния снега на локально возвышенных участках и увеличения отрицательного значения температурной сдвиги за счет разности коэффициентов теплопроводности пород в талом и мерзлом состояниях. На изначально талых участках это приведет к возникновению “пальца”. На участках с заглубленной на первые метры кровлей ММП в течение второй половины XXI в. произойдет смыкание новообразования ММП с современными

мерзлыми породами и сформируются несливающиеся ММП (при прогнозируемом повышении температуры по региональной климатической модели HIRHAM4 [Christensen et al., 1996, 2002]). На участках мерзлых торфяников с мощностью торфа более глубины сезонного оттаивания мерзлые породы могут, при определенных условиях, сохраняться до конца XXI столетия [Ривкин и др., 2017].

Таким образом, новообразование мерзлых пород на фоне положительного тренда температуры воздуха является частью механизма самоконсервации мерзлых пород посредством формирования специфического комплекса новообразований: заглубленной кровли, новообразования ММП на изначально талых заторфованных участках и сохранения ММП на мерзлых торфяниках. В целом это окажет существенное влияние на пространственные (зональные) закономерности динамики ландшафтов и связанные парагенетические процессы, обусловленные климатическими изменениями.

Литература

- Гаврильев Р.И.** Теплофизические свойства компонентов природной среды в криолитозоне. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2004, 145 с.
- Геокриологический словарь** / Г.И. Дубиков, В.И. Аксенов, М.М. Корейша и др. М., ГЕОС, 2003, 140 с.
- Геокриология СССР.** Европейская часть СССР / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Недра, 1988, 356 с.
- 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.
- 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 / Хрусталев Л.Н., Емельянов Н.В., Пустовойт Г.П., Яковлев С.В. Свидетельство № 940281; Опубл. РосАПО, 1994.
- Ривкин Ф.М., Левантовская Н.П.** Динамика подрусловых таликов и формирование газовых гидратов // Криосфера Земли, 2002, т. VI, № 2, с. 36–42.
- 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.
- Суходольский С.Е.** Парагенезис подземных вод и многолетнемерзлых пород. М., Наука, 1982, 152 с.
- Christensen J.H., Christensen O.B., Lopez P. et al.** The HIRHAM4 regional atmospheric climate model // Tech. Rep. 96-4, Danish Meteorol. Inst., Copenhagen, Denmark, 1996, 51 p.
- Christensen J.H., Christensen O.B., Schulz J.P. et al.** 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, 25 p.
- Glossary of permafrost and related ground-ice term** / S.A. Harris, H.M. French, J.A. Heginbottom et al. Ottawa, Ontario, Nat. Res. Council Can. Techn. Mem. No. 142, 1988, 154 p.

Rivkin F.M., Vlasova J.V., Popova A.A. et al. Mesoscale and detailed geocryological mapping as a basis for carbon budget assessment (East European Russian Arctic, CARBO-North project) // Proc. of the Ninth Int. Conf. on Permafrost (Fairbanks, June 29 – July 3, 2008). Fairbanks, Univ. Alaska, 2008, vol. 2, p. 1493–1498.

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. 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. – www.the-cryosphere.net/9/465/2015/

References

- Gavrilyev R.I. Teplofizicheskie svoistva komponentov prirodnoi sredy v kriolitozone [Thermophysical properties of the components of the natural environment in the cryolithozone]. Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2004, 145 p. (in Russian).
- Geokriologicheskii slovar' [Geocryological glossary]. G.I. Dubikiv, V.I. Aksenov, M.M. Koreisha et al. Moscow, GEOS, 2003, 140 p. (in Russian).
- Geokriologiya SSSR [Geocryology of the USSR. European part of the USSR]. E.D. Ershov (ed.). Moscow, Nedra, 1988, 356 p. (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).
- 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).
- Rivkin F.M., Levantovskaya N.P. Dynamics of river-channel taliks and formation of near-surface gas hydrate. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2002, vol. VI, No. 2, p. 36–42 (in Russian).
- Rivkin F.M., Vlasova Ju.V., Parmuzin I.S. Study of changes in permafrost conditions caused by frozen ground thaw subsidence. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2017, vol. XXI, No. 6, p. 26–34 (in Russian).
- Programma rascheta teplovogo vzaimodeistvija ingenernykh sooruzhenii vechomerzlymi gruntami WARM [The program for calculating the thermal interaction of engineering structures with permafrost soils WARM]. Khrustalev L.N., Emelyanov N.V., Pustovoit G.P., Yakovlev S.V. Patent 940281; Published by RosAPO, 1994 (in Russian).
- Sukhodolsky S.E. Paragenezis podzemnykh vod i mnogomerzlykh porod [Paragenesis of groundwater and permafrost]. Moscow, Nauka, 1982, 152 p. (in Russian).
- Christensen J.H., Christensen O.B., Lopez P. et al. The HIRHAM4 regional atmospheric climate model. In: Tech. Rep. 96-4, Danish Meteorol. Inst., Copenhagen, Denmark, 1996, 51 p.
- Christensen J.H., Christensen O.B., Schulz J.P. et al. High resolution physiographic data set for HIRHAM4: An application to a 50 km horizontal resolution domain covering Europe. In: Tech. Rep. 01-15, Danish Meteorol. Inst., Copenhagen, Denmark, 2001, 25 p.
- Glossary of Permafrost and related ground-ice term / S.A. Harris, H.M. French, J.A. Heginbottom et al. Ottawa, Ontario, Nat. Res. Council Can. Techn. Mem. No. 142, 1988, 154 p.
- Rivkin F.M., Vlasova J.V., Popova A.A. et al. Mesoscale and detailed geocryological mapping as a basis for carbon budget assessment (East European Russian Arctic, CARBO-North project). In: Proc. of the Ninth Int. Conf. on Permafrost (Fairbanks, June 29 – July 3, 2008). Fairbanks, Univ. Alaska, 2008, vol. 2, p. 1493–1498.
- 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. 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. – www.the-cryosphere.net/9/465/2015/

Поступила в редакцию 6 мая 2023 г.,
После доработки – 11 ноября 2023 г.,
Принята к публикации 21 декабря 2023 г.