

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗ

УДК 551.345

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-6(26-34)

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ
В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСАДКИ МЕРЗЛЫХ ПОРОД ПРИ ОТТАИВАНИИ**

Ф.М. Ривкин, Ю.В. Власова, И.С. Пармузин

ОАО “Фундаментпроект”, 125080, Москва, Волоколамское шоссе, 1, кор. 1, Россия; f-rivkin@narod.ru

Приведены данные исследований изменения геокриологических условий в результате деградации мерзлых пород на ключевом участке в районе пос. Сейда (европейский Север России). На основе анализа прогноза изменения температурного режима пород к 2050 и 2099 гг. и оценки величины осадки мерзлых пород при их оттаивании оценены количественные показатели изменения геокриологических условий в пределах области исследования. Представлены результаты количественной оценки осадки грунтов при оттаивании, ее пространственные закономерности и закономерности новообразования мерзлых грунтов вследствие инверсии рельефа.

Многолетнемерзлые породы, оттаивание многолетнемерзлых пород, осадка мерзлых пород при оттаивании, изменение геокриологических условий, инверсия рельефа

**STUDY OF CHANGES IN PERMAFROST CONDITIONS CAUSED
BY FROZEN GROUND THAW SUBSIDENCE**

F.M. Rivkin, Yu.V. Vlasova, I.S. Parmuzin

“Fundamentproject” OJSC, 1, Volokolamskoe highway, Moscow, 125080, Russia; f-rivkin@narod.ru

The changes in geocryological conditions caused by the permafrost degradation were investigated at the key-site at Seyda settlement area, European North of Russia. The forecast analysis of soil temperature regime variability until 2050 and 2099 and the estimated extent of subsidence upon the anticipated thawing of frozen ground served as the basis for quantitative indicators of changes in the geocryological conditions. The paper provides quantitative estimation of thaw subsidence and its spatial distribution patterns, and discusses patterns of permafrost aggradation resulting from the relief inversion.

Permafrost, thawing of frozen ground, frozen ground thaw subsidence, changes in permafrost conditions, relief inversion

ВВЕДЕНИЕ

Распространение, состояние и свойства мерзлых пород, а также опасные криогенные процессы и образования – важнейшие факторы, определяющие сложность как всех аспектов инженерной деятельности в Арктике, так и геоэкологических изменений в арктических регионах.

Современные тенденции изменения климата в Арктике предопределяют динамику геокриологической обстановки. Проявляется это в первую очередь в повышении температуры мерзлых пород в верхней части геологического разреза. На фоне повышения температуры мерзлых пород происходит увеличение глубины сезонноталого слоя (СТС) и глубины залегания кровли толщи многолетнемерзлых пород (ММП). В дальнейшем это приводит к формированию “заглубленной кровли ММП”, т. е. к образованию постоянного слоя талых пород между подошвой слоя сезонного про-

мерзания и кровлей ММП. Увеличение мощности талого слоя между подошвой слоя сезонного промерзания и кровлей ММП при сохранении тенденции к повышению температуры воздуха приведет к концу XXI в. к частичному оттаиванию мерзлых пород в верхней части разреза. Прежде всего это относится к районам, расположенным вблизи южной границы распространения ММП, и проявится не только в изменении температуры и состояния пород, но и в пространственно-временной изменчивости ландшафтных и геокриологических условий в целом.

Важным последствием перехода мерзлых пород в талое состояние является осадка поверхности. Пространственная дифференцированность величины осадки мерзлых пород при оттаивании, предопределенная пространственной неоднородностью состава, льдистости и температуры мерз-

лых пород, существенно изменит ландшафтные условия на поверхности. В первую очередь изменятся микрорельеф поверхности и гидроморфность современных ландшафтов. Часть участков, имеющих тенденцию к относительному понижению поверхности, будет заболачиваться, другие, оставшиеся в мерзлом состоянии, наоборот, имеют тенденцию к относительному повышению поверхности. Это разнонаправленное “движение” поверхности различных ландшафтных участков, в свою очередь, повлечет за собой целую цепочку взаимно обусловленных изменений.

В настоящей работе приведены результаты оценки изменения поверхностных условий в результате оттаивания мерзлых пород в верхней части разреза (до глубины 10 м). Исследования выполнены на основе и в развитие результатов

детальных геокриологических обследований тестового участка в рамках проекта EU 6FP CARBO-North project (Contract Nr 036993). В качестве региональной модели изменения климата использована модель HIRHAM5 [Christensen et al., 1996, 2001; Hugelius et al., 2011] для XXI в., что соответствует сценарию A1B IPCC SRES по выбросам парниковых газов. При этом динамика выбросов парниковых газов связывается, в частности, с динамикой оттаивания мерзлых пород и уменьшением площади их распространения.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились на северо-западе европейской части России на левобережье р. Седьха в районе пос. Сейда в северной лесотундре (рис. 1). Площадь тестового участка составляет

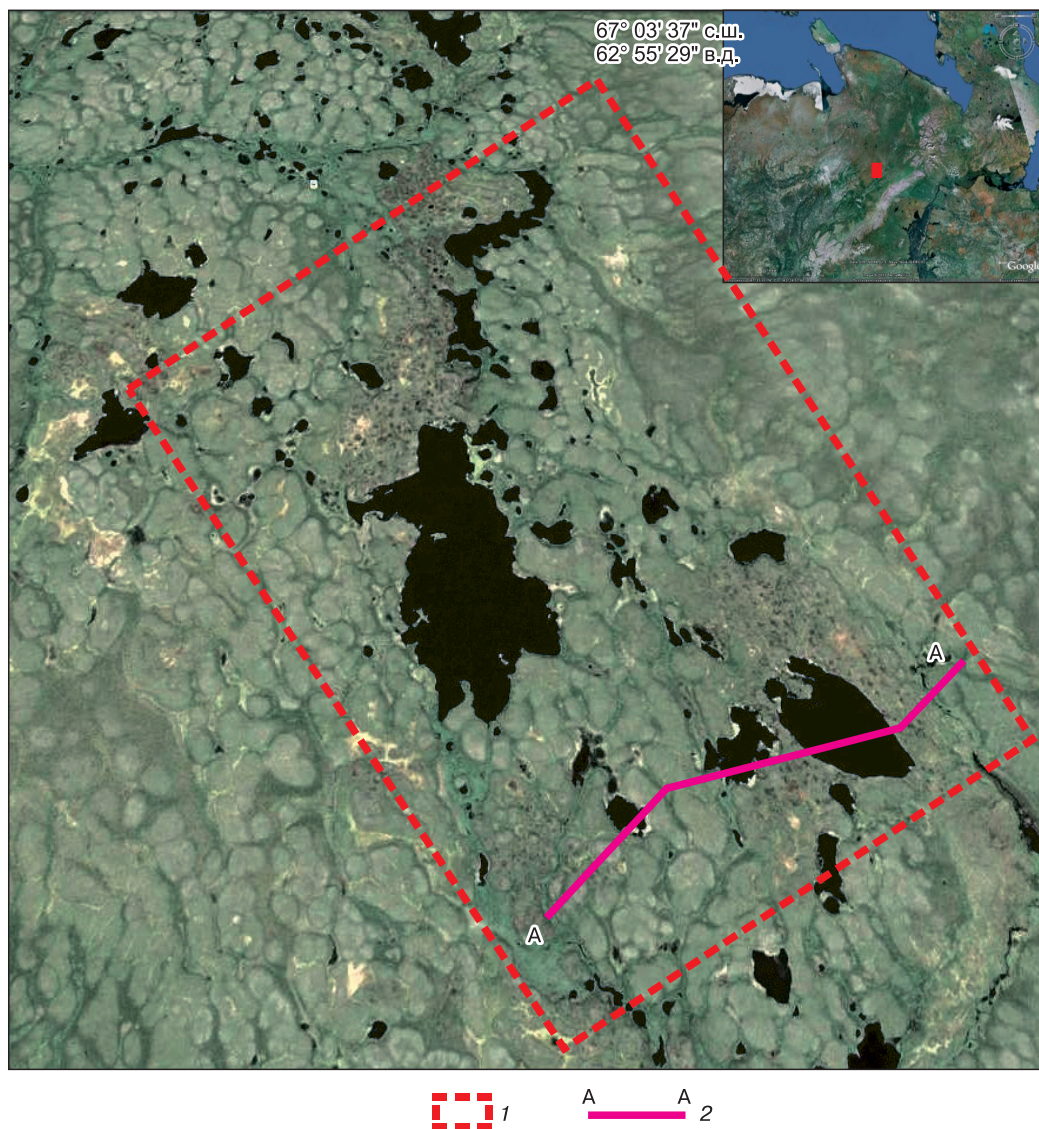


Рис. 1. Схема расположения ключевого участка:
1 – границы ключевого участка; 2 – линия разреза.

около 4 км². Исследования выполнялись на глубине 10–12 м.

Участок расположен в днище позднеплейстоценовой заболоченной и заозеренной котловины, “прорезанной” долинами ручьев и полосами стока. Котловина обрамлена ледниковыми позднеплейстоценовыми (gIII²) увалами с абсолютными отметками вершин 120–130 м. Абсолютные отметки поверхности днища котловины составляют 80–90 м. Таким образом, глубина относительного вреза днища долины 30–50 м. Рельеф участка полигональный с приподнятыми блоками полигонов, которые покрыты кустарничково-мохово-лишайниковой растительностью. Блоки разделены заболоченными ложбинами стока, сформировавшимися в результате термокарста по повторно-жильным льдам (ПЖЛ). Часто такие понижения относительно дренированы, и в этом случае они покрыты густой кустарниковой растительностью.

Многолетнемерзлые породы залегают в пределах участка преимущественно под слоем сезонного оттаивания. Это типично для приподнятых участков пятнистой мелкокочковатой тундры и для торфяников, где мерзлые породы располагаются непосредственно под слоем сезонного оттаивания.

В заболоченных понижениях, ложбинах стока, подножиях склонов, а также на пологих закустаренных склонах озерной котловины кровля мерзлых пород залегают на глубинах от 5 до 10 м. На таких участках между подошвой сезонномерзлого слоя (СМС) и кровлей ММП в зимний период существует слой талых пород. Мощность этого слоя сокращается в периоды похолодания, что обусловлено увеличением глубины сезонного промерзания. В периоды потепления мощность этого слоя увеличивается как за счет уменьшения глубины сезонного промерзания, так и из-за дальнейшего опускания кровли ММП в результате их оттаивания. Талики мощностью более 10 м расположены под озерами и в крупных заболоченных понижениях шириной более 10 м.

Температура мерзлых пород варьирует от –0.1...–0.2 °С в заболоченных понижениях и до –2.1 °С на вершинах торфяных бугров.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Количественная оценка изменения геокриологических условий выполнена на основе прогноза деградации многолетнемерзлых пород под влиянием изменения климата. Как отмечено выше, в качестве региональной модели изменения климата использована модель NIRHAM5 для XXI в., что соответствует сценарию A1B IPCC SRES по выбросам парниковых газов [Hugelius et al., 2011]. Этот сценарий повышения температуры воздуха в

рамках данной климатической модели выглядит, по мнению авторов, излишне агрессивным по сравнению с другими [Фотиев, 2000]. Однако использование такого сценария позволяет оценить максимальные изменения геокриологических условий и выявить основные закономерности их пространственной изменчивости в течение XXI в. Кроме того, прогнозная оценка изменения геокриологических условий может быть основой для выбора регионов-аналогов, т. е. таких, где в настоящее время существуют условия, которые могут сформироваться в будущем на исследуемом участке в результате реализации данного сценария климата.

Основные методические этапы исследования:

1. Разработка ландшафтно-геокриологической модели ключевого участка.
2. Прогноз положения кровли ММП на 2050 г. (середина столетия) и 2099 г. (конец столетия) и оценка потенциальной осадки поверхности в пределах современных ландшафтов.
3. Количественная оценка пространственной трансформации ландшафтно-геокриологических условий на 2050 и 2099 гг.

Разработка ландшафтно-геокриологической модели ключевого участка

Базовая картографическая модель современных ландшафтно-геокриологических условий основана на анализе факторов природной среды, определяющих формирование современной геокриологической обстановки. При ее разработке применялись геосистемный принцип и метод ландшафтно-индикационного картографирования, позволяющие создать пространственную ландшафтно-геокриологическую модель области исследования. Анализ факторов был выполнен в матричной форме [Власова и др., 2011; Rivkin et al., 2008].

Вся территория тестового участка расположена в пределах одного геоморфологического уровня (водно-ледниковая равнина). Здесь было выделено два геолого-генетических комплекса отложений: ледниковый и озерно-болотный. В пределах этих геолого-генетических комплексов отложений выделено пять типовых криолитологических разрезов (табл. 1). Данные табл. 1 используются как одна из информационных осей в системе матричного анализа ландшафтно-геокриологических условий.

На основе анализа рельефа, растительности, глубины залегания грунтовых вод, распространения и температуры ММП, мощности СТС и СМС в пределах участка выделено семь ландшафтных микрорайонов, характеристика которых приведена в табл. 2, также являющейся одной из информационных осей в системе анализа.

Таблица 1. Геолого-генетический комплекс оглознений и характеристика основных криолитологических разрезов (горизонтальная ось в результирующей таблице матричного анализа)

Геолого-генетический комплекс оглознений	Водно-ледниковая равнина				
	Ледниковые отложения	Озерно-болотные, подстилаемые ледниковыми, отложения			
Криолитологический разрез	gПЗ	ЫП–IV			
Суглинки с включениями щебня	Суглинки мощностью до 0,5 м, суглинки, подстилаются ледниковыми отложениями (суглинки, супеси, пески с включениями гравия, дресвы и щебня)	Суглинки, местами перекрытые торфом мощностью до 0,4 м	Торф 0,4–1,0 м, ниже суглинки	Торф 1,0–4,5 м, ниже суглинки	
Талые	Талые	Мерзлые, малольдистые, льдистые	Мерзлые, льдистые, сильнольдистые	Мерзлые, льдистые, льдистые, малольдистые	
Мерзлые, малольдистые	Мерзлые, малольдистые	Талые	Талые	Талые	
Индекс	1	2	3	4	5

Таблица 2. Ландшафтно-геокриологическая характеристика участка (вертикальная ось в результирующей таблице матричного анализа)

Ландшафтная характеристика	Распространение ММП, %	Уровень грунтовых вод, м	Температура тура пород, °С	Мощность СТС (СМС), м	Экзогенные процессы и образования	Индекс
Торфяники плоские, мелкопочковатые, неравномерно дренированные, на буграх кустарничково-мохово-лишайниковый покров, в мочажинах – мох, осока	Прерывистое (ММП с поверхности 70–90 % площади, 10–30 % – участки с заглублением кровли ММП на 2–6 м)	0–0,5	–0,5...–2,1	0,5–1,1	Термокарст, термоэрозия, редкие деградирующие остатки ПЖЛ, местами пятнистый микрорельеф	a
Мелкопочковатая, местами пятнистая кустарничково-мохово-лишайниковая тундра, относительно дренированная	То же	0,5–1,5	–0,5...–1,7	0,5–1,6	Пятнистый микрорельеф, полигональное растрескивание, сезонное пучение	b
Торфяники бугристые сильноэродированные, на буграх – хорошо дренированная кустарничково-мохово-лишайниковая тундра, в понижениях – осоково-моховое болото	Массивно-островное (ММП с поверхности около 50 % площади, 50 % – заглубленная кровля ММП на 2–10 м)	0–0,5	0...–2,1	0,5–1,1 (0,4–1,0)	Термокарст, термоэрозия, местами пятнистый микрорельеф	c
Болота осоково-моховые с останками бугристых торфяников, с кустарничково-мохово-лишайниковой растительностью, хасырен	Островное (ММП с поверхности 20–30 % площади, 70–80 % – заглубленная кровля ММП на 2–10 м)	0–0,3	0...–1,0	0,5–1,1 (0,4–1,0)	Заболачивание, многолетнее пучение	d
Средне- и крупнопочковатая кустарничково-мохово-лишайниковая тундра (кустарники высотой до 1,2 м), неравномерно дренированная	Талые с поверхности, кровля ММП заглублена на 2–6 м	0–2	0...–0,5	(0,5–1,2)	Сезонное пучение	e
Полосы стока с кустарником различной густоты высотой до 2,5 м, неравномерно дренированные, заболоченные понижения травяно-мохово-осоковысые, плохо дренированные	Талые 70–80 %, 10–30 % – заглубленная кровля ММП на 5–10 м	0–1	0...–0,2	(0,5–1,2)	Заболачивание, перелетки мерзлых грунтов, пучение	f
Редины с кустарником различной густоты	Талые	1–3	>0	(0,5–1,2)	Сезонное пучение	g

Таблица 3. Результирующая таблица матричного анализа ландшафтно-геокриологических условий

Ландшафтно-геокриологическая характеристика (см. табл. 2)	Геолого-генетические комплексы отложений и характеристика основных криолитологических разрезов (см. табл. 1)				
	1	2	3	4	5
Индекс					
a				4a	5a
b	1b	2b	3b		
c				4c	5c
d				4d	
e	1e	2e	3e		
f	1f	2f	3f		
g	1g				

Примечание. 1b–5c – индекс ландшафтно-геокриологического района.

Сочетание выделенных в пределах исследуемого участка ландшафтных микрорайонов и типовых разрезов геолого-генетических комплексов (см. табл. 1, 2) позволяет выделить 35 потенциальных типологических районов, 15 из которых были идентифицированы на территории ключевого участка. Выделенные типологические районы отображают весь спектр (для масштаба 1:5 000) существующих геокриологических и ландшафтных условий (табл. 3). Таблица 3 является результирующей таблицей матричного анализа ландшафтных и геокриологических условий и основным элементом легенды к базовой ландшафтно-геокриологической карте.

Таким образом, базовая геокриологическая модель тестового участка “Сейда” (см. табл. 1–3) содержит комплексную ландшафтно-геокриологическую информацию по верхнему горизонту геологического разреза участка (до глубины 10–12 м). Именно в этом интервале глубин в пределах выделенных ландшафтов были исследованы закономерности трансформации геокриологических условий и рельефа в результате современных изменений климата.

Прогноз положения кровли ММП на 2050 и 2099 гг. и оценка потенциальной осадки поверхности в пределах современных ландшафтов

Прогноз положения кровли ММП и температурного поля пород (до глубины 10 м) выполнен С. Марченко [Hugeius et al., 2011] с учетом наших результатов изучения геокриологических условий участка [Rivkin et al., 2008] и принятого сценария изменения климата на 2050 и 2099 гг. Среднегодовая температура воздуха на указанные периоды с учетом принятого климатического сценария составляет $-0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (к 2050 г.) и $+1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ к концу столетия. Такой сценарий выглядит, по мнению авторов, излишне агрессивным. Современная среднегодовая температура воздуха для исследуемой территории составляет $-5.4\text{ }^{\circ}\text{C}$. В результате реализации такого климатического сценария неизбежно произойдет увеличение глубины сезонного оттаивания и образование участков с заглубленной кровлей мерзлых пород на участках, где в настоящее время грунты СМС полностью промерзают и смыкаются с ММП.

Рисунок 2 демонстрирует динамику изменения геокриологических условий: соотношения площади таликов (участки с положением кровли ММП глубже 10 м), участков с заглубленной кровлей ММП (участки с положением кровли ММП глубже подошвы СМС, но менее 10 м) и участков распространения ММП непосредственно под СТС. В настоящее время в пределах тестового участка площадь мерзлых пород с поверхности составляет 60.7 %, территория участков с заглубленной кровлей 33.5 %, а талики – около 6 % площади. К середине столетия это соотношение изменится и будет составлять 38.1, 35.7 и 26.2 %, а к концу столетия – 8.3, 10.4 и 81.3 % соответственно. Следует обратить внимание, что при всем разнообразии динамики геокриологических условий суммарная площадь распространения ММП в верхней части разреза (это участки с распространением мерзлых пород с поверхности и участки с “заглубленной кровлей” ММП) к середине столетия изменится

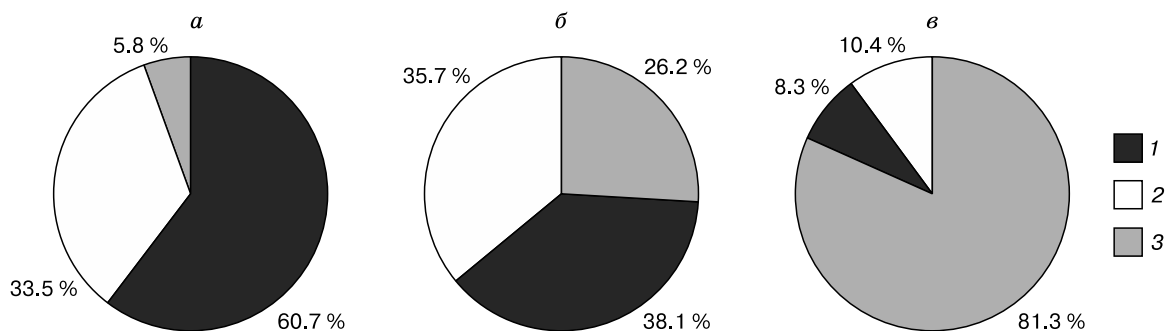


Рис. 2. Динамика соотношения площади распространения ММП (1), участков заглубленной кровли (2) и таликов (3) в настоящее время (а), к 2050 г. (б) и к 2099 г. (в).

незначительно. Она составит около 74 %, но к концу столетия при реализации сценария климата уже не будет превышать 19–20 %.

Количественная оценка пространственной трансформации ландшафтно-геокриологических условий на 2050 и 2099 гг.

Результаты моделирования показывают, что в целом хорошо прослеживается вполне ожидаемая тенденция зависимости глубины многолетнего оттаивания пород от ландшафтных условий и льдистости пород в верхней части разреза (табл. 4).

Наибольшая глубина многолетнего оттаивания ММП (т. е. наибольшее понижение их кровли) к середине столетия будет формироваться на участках, сложенных с поверхности глинистыми грунтами с небольшим содержанием льда. Это соответствует ландшафтам с индексами b, e, f, g и геокриологическим разрезам с индексами 1, 2, 3 (см. табл. 4). Величина осадки ММП при оттаивании весьма дифференцирована во времени и пространстве. Если к 2050 г. максимальные значения осадки поверхности ожидаются на участках с заглубленной кровлей ММП (участки 2e, 3e, 3f), то к 2099 г. максимальных значений следует ожидать на участках 2b и 4a, 4c, 4d, для которых в настоящее время характерно сплошное распространение ММП. Кровля ММП на этих участках совпадает с подошвой СТС, и до середины столетия здесь будет отмечаться только повышение температуры пород до температуры начала оттаивания грунта (–0.2...–0.3 °С).

Оттаивание мерзлых пород будет, естественно, сопровождаться осадкой современной поверхности. Наименьшее изменение геокриологических условий отмечается на участках, верхняя часть которых сложена торфом мощностью более 1 м: 5a, 5c. Мощность торфа, обладающего высокой льдистостью и вследствие этого большой теплоемкостью, является здесь основным “консервирующим” фактором. К концу столетия многолетне-мерзлые породы в пределах ландшафтно-геокриологических районов 4a, 4c, 4d, сложенных с поверхности торфом толщиной до 1.0 м, оттаивают до глубины 9.5 м, а максимальная осадка поверхности составит здесь 2.5 м.

На участках с мощностью торфа от 1.0 до 4.5 м (плоские и бугристые торфяники, районы 5a, 5c) температура пород останется наиболее низкой – от –0.3 до –0.8 °С. Эти участки будут находиться в достаточно стабильном состоянии до конца столетия. Фактически только они останутся в мерзлом состоянии и будут относительно приподняты и заметно выделены в рельефе на фоне прилегающих участков, которые в силу осадки поверхности в результате оттаивания ММП будут испытывать тенденцию к относительному понижению поверхности.

Анализ результатов моделирования показывает, что пространственная дифференцированность осадки поверхности к концу столетия приведет к существенному изменению условий формирования ландшафтов. На рис. 3 приведены результаты прогнозной оценки осадки поверхности

Таблица 4. Результаты моделирования деградации ММП

Индекс ландшафтно-геокриологического района	Август 2007 г.		Август 2050 г.			Август 2099 г.		
	Глубина положения кровли ММП, м	Температура грунта, °С	Глубина положения кровли ММП, м	Температура грунта, °С	Осадку грунтов при оттаивании, м	Глубина положения кровли ММП, м	Температура грунта, °С	Осадку грунтов при оттаивании, м (суммарная)
1b	1.8	–1.7	6.0	–0.2	0.2	>10	>0	0.4
1e	2.0	–0.5	8.0	–0.1	0.3	>10	>0	0.4
1f	5.0	–0.2	10	0	0.2	>10	>0	0.2
1g	>10	>0	>10	>0	0	>10	>0	0
2b	0.5	–1.7	1.7	–0.8	0.4	>10	>0	2.6
2e	2.0	–1.0	6.0	–0.2	1.4	>10	>0	2.0
2f	5.0	–0.2	7.0	–0.1	0.5	>10	>0	1.0
3b	1.7	–1.0	3.5	–0.9	0.5	>10	>0	2.1
3e	5.2	–0.5	6.0	–0.2	1.4	>10	>0	2.0
3f	5.0	–0.2	10	0	1.7	>10	>0	1.7
4a	0.4	–1.8	0.7	–1.2	0.1	9.5	–0.1	2.5
4c	0.5	–1.8	0.7	–1.2	0.1	9.5	–0.1	2.5
4d	0.4	–1.0	0.7	–1.2	0.1	9.5	–0.1	2.5
5a	0.5	–2.1	0.7	–1.7	0.1	0.8	–0.8	0.1
5c	0.5	–1.9	0.7	–1.7	0.1	0.8	–0.3...–0.8	0.1

- Участки распространения ММП
- Участки с заглубленной кровлей мерзлых грунтов
- Талики

вследствие деградации мерзлых пород к 2050 г. и к концу столетия. На рис. 3, Б видно, что в результате частичного оттаивания ММП и формирования новых участков с “заглубленным” положением кровли ММП произошло опускание поверхности. Это провоцирует заболачивание и увеличение ко-

личества и площади озер. На рис. 3, В (состояние к 2099 г.) видно, что ММП сохранились только на участках плоских и бугристых торфяников (районы 5а, 5с). На остальной территории существенно изменились (в сторону увеличения гидроморфности) поверхностные условия.

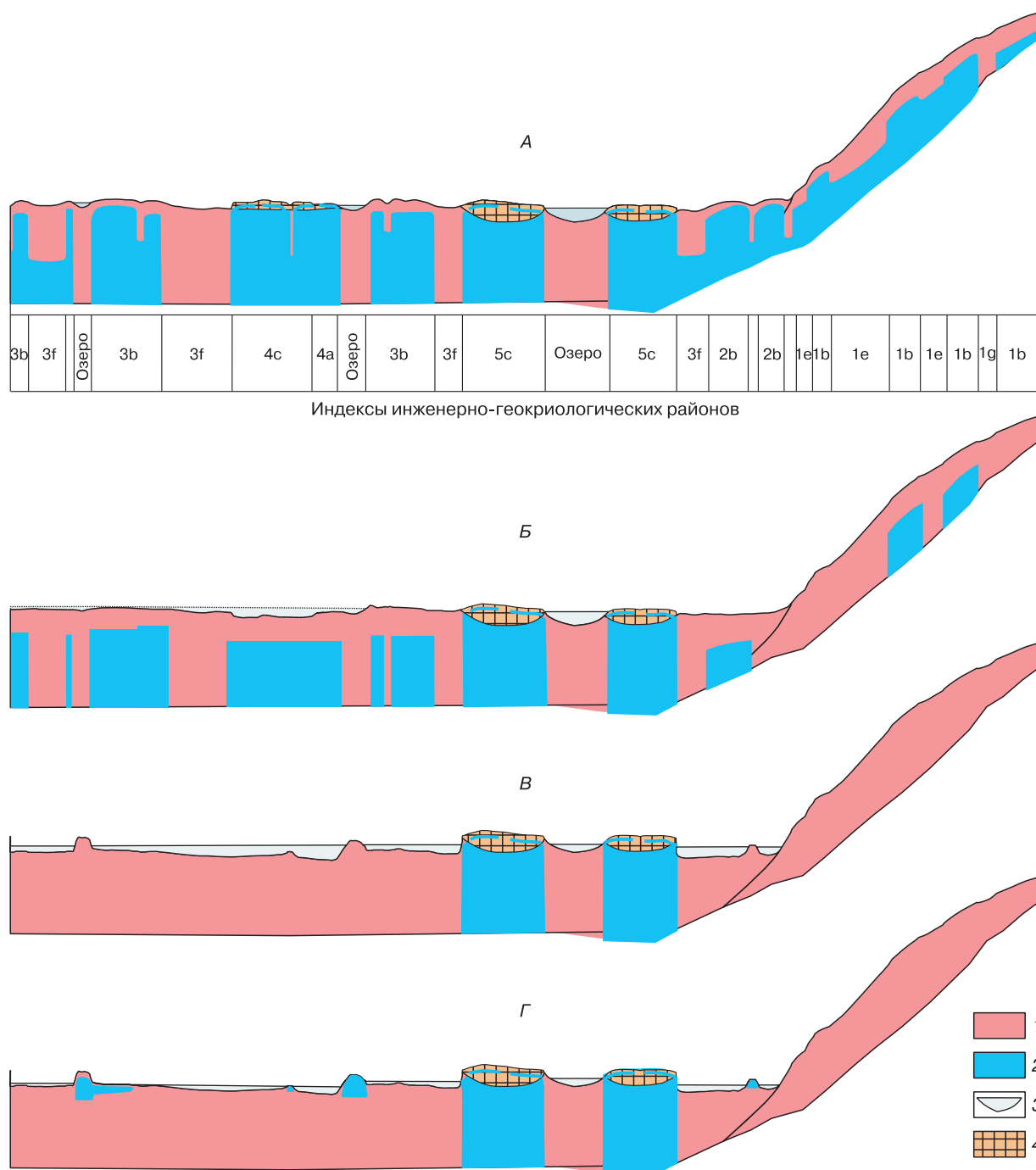


Рис. 3. Изменение геокриологических условий в результате оттаивания ММП (разрез по линии А–А, см. рис. 1):

А – современное состояние; Б – состояние к 2050 г.; В – состояние к 2099 г.; Г – состояние к концу столетия с учетом инверсии рельефа и новообразования маломощных ММП; 1 – талые породы; 2 – ММП; 3 – озера; 4 – торф.

Пространственная дифференцированность осадки поверхности грунта в результате оттаивания мерзлых пород фактически приведет к инверсии рельефа. Абсолютное положение поверхности участков, которые в настоящее время находятся в талом состоянии, не будет испытывать изменений, а поверхность соседних, мерзлых участков может существенно понизиться. На рис. 3, В хорошо видно, что поверхность некоторых участков (в частности, днища современных озер), в настоящее время занимающих отрицательные формы рельефа, к концу столетия будет располагаться выше прилегающих участков. Здесь на поверхности и выше прилегающих участков при определенном сочетании природных факторов будет происходить новообразование мерзлых пород (см. рис. 3, Г), а именно: установление низких температур воздуха в начале осенне-зимнего периода, выпадение снега после установления отрицательной температуры воздуха, уменьшение мощности снега на возвышенных участках в результате ветрового переноса и т. д. [Пономарева и др., 2012].

Процесс изменения геокриологических условий имеет фактически трансцендентный характер. С одной стороны, оттаивание ММП и осадка поверхности стимулируют повышение гидроморфности современных ландшафтов (заболачивание, заозеривание). С другой стороны, относительное повышение положения поверхности современных гидроморфных ландшафтов будет способствовать новообразованию мерзлых пород, т. е. стимулировать обратный процесс: новообразование мерзлых пород на фоне общей тенденции к их оттаиванию. Из рис. 3, Г следует, что на относительно возвышенных участках произойдет формирование маломощных ММП. Новообразование ММП существенно изменит соотношение площади распространения мерзлых и талых участков. К концу столетия площадь распространения мерзлых пород, распространение участков с заглубленной кровлей и площадь таликов с учетом новообразования мерзлых пород будут составлять 35, 10 и 55 % соответственно (рис. 4). Без эффекта инверсии рельефа суммарная площадь ММП, как показано выше, составила бы только 19–20 %. С учетом эффекта инверсии рельефа и новообразования маломощных ММП суммарная площадь распространения мерзлых пород (участки с распространением мерзлых пород с поверхности и участки с “заглубленной кровлей”) составит 45 %.

Локализация мерзлых пород под торфяными массивами постепенно приведет к появлению образований типа “пальса”, широко распространенных в северной части Финляндии, Шведской Лапландии и северо-восточной части Норвегии. Геокриологические условия Шведской Лапландии

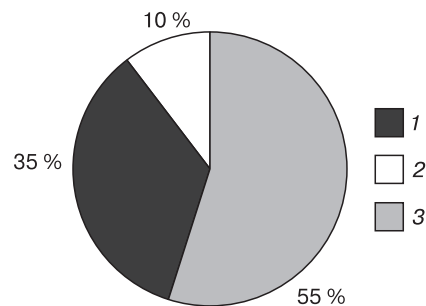


Рис. 4. Прогнозное распространение по площади мерзлых грунтов (1), участков заглубленной кровли (2) и таликов (3) к 2099 г. с учетом инверсии рельефа и возможности новообразования маломощных ММП.

можно, с некоторыми допущениями, рассматривать как пространственные аналоги прогнозируемых геокриологических условий тестового участка “Сейда” к концу XXI в. при условии реализации принятой модели изменения климата.

Анализ динамики температуры воздуха Шведской Лапландии показывает, что в период 1976–1989 гг. среднегодовая температура воздуха (метеостанция Кируна) была отрицательной и варьировала от -0.92 до -3.18 °C [Иванова и др., 2011]. В последующие 20 лет среднегодовая температура воздуха часто становилась положительной и изменялась от $+0.68$ до -1.49 °C. Начиная с 2003 г. среднегодовая температура воздуха уже не опускалась ниже 0 °C. Эти показатели достаточно близки к температурам, принятым для прогноза на 2050 и 2099 гг. в данной работе. В настоящее время в Шведской Лапландии мерзлые породы связаны только с участками распространения торфяников (плоскобугристых и бугристых). Температура пород на таких участках составляет $-0.1...-0.2$ °C [Иванова и др., 2011]. Тем не менее на сниженных заболоченных участках (обычно в периферийной части озерных котловин) отмечено новообразование мерзлых пород. Как правило, это участки с наличием торфа (даже маломощного) в верхней части разреза. Новообразование мерзлых пород связано с периодическим формированием (на локальных участках) благоприятного соотношения климатических факторов и сопровождается появлением в рельефе относительно небольших по площади “подпученных” участков. Относительное превышение таких участков над прилегающей поверхностью весьма незначительно и составляет обычно $0.3-0.5$ м. В результате общая площадь распространения мерзлых пород увеличивается, несмотря на достаточно высокий температурный фон среднегодовой температуры воздуха [Иванова и др., 2011].

ВЫВОДЫ

Установлено, что в результате повышения температуры воздуха до -0.8°C к середине XXI столетия в пределах ключевого участка кровля толщи ММП к 2050 г. понизится и будет располагаться на глубинах от 3.5 до 6–8 м. К концу века при сохранении тренда на повышение среднегодовой температуры воздуха (до $+1.2^{\circ}\text{C}$) кровля толщи ММП опустится ниже 10 м. Осадка поверхности при оттаивании ММП будет дифференцирована на различных участках и составит соответственно от 0.2 до 1.7 м в середине и 2.1–2.6 м к концу века.

Результаты прогноза показывают, что к концу столетия ММП на участках, сложенных с поверхности торфом толщиной до 1 м, полностью оттают, а на участках, на которых толщина торфа превышает 1 м, останутся в мерзлом состоянии.

Максимальная осадка ММП при оттаивании будет происходить на участках, сложенных до глубины 10 м суглинками или суглинками, перекрытыми слоем торфа мощностью до 1 м.

На участках, перекрытых торфом мощностью более 1 м, породы останутся в мерзлом состоянии, температура пород на таких участках повысится с -2.1°C в настоящее время до $-0.7...-0.8^{\circ}\text{C}$ к концу столетия.

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. В ряде случаев это может привести к аградации мерзлых пород на локальных участках.

Оттаивание ММП и осадка поверхности приведут к изменению современных ландшафтов, повлияют на условия формирования баланса парниковых газов в области распространения ММП. Поэтому все прогнозные построения баланса парниковых газов должны выполняться только с учетом количественной оценки площади распространения талых и мерзлых пород.

Работа выполнена на основе и в развитие результатов геоэкологических исследований тестового участка в рамках проекта EU 6FP CARBO-North project (Contract Nr. 036993).

Литература

Власова Ю.В., Кюхри П., Мажитова Г.Г., Марченко С., Пармузин И.С., Ривкин Ф.М. Геоэкологическое карти-

рование участка “Сейда” в рамках проекта “CARBO-NORTH” // Материалы Четвертой конф. геоэкологов России (Москва, 7–9 июня 2011 г.). Т. 2. Ч. 5. Региональная и историческая геоэкология. М., Унив. книга, 2011, с. 37–40.

Vlasova, Ju.V., Kyuhri, P., Mazhitova, G.G., Marchenko, S., Parmuzin, I.S., Rivkin, F.M., 2011. Geocryological mapping of Seida site within the scope of CARBO-NORTH project, in: Proceedings of the 4th Conference of Russian Geocryologists (Moscow, June 7–9, 2011). Vol. 2, Pt 5. Regional and historical geocryology. Universitetskaya kniga, Moscow, pp. 37–40. (in Russian)

Иванова Н.В., Кузнецова И.Л., Пармузин И.С., Ривкин Ф.М., Сороковиков В.А. Геоэкологические условия Шведской Лапландии // Там же, с. 77–82.

Ivanova, N.V., Kuznetsova, I.L., Parmuzin, I.S., Rivkin, F.M., Sorokovikov, V.A., 2011. Permafrost conditions in Swedish Lapland, in: Proceedings of the 4th Conference of Russian Geocryologists (Moscow, June 7–9, 2011). Vol. 2, Pt 5. Regional and historical geocryology. Universitetskaya kniga, Moscow, pp. 77–82. (in Russian)

Пономарева О.Е., Гравис А.Г., Бердников Н.М. Современная динамика бугров пучения и плоскобугристых торфяников в северной тайге Западной Сибири (на примере Надымского стационара) // Криосфера Земли, 2012, т. XVI, № 4, с. 21–30.

Ponomareva, O.E., Gravis, A.G., Berdnikov, N.M., 2012. Modern dynamics of frost-heave mounds and peatland plateaus in the northern taiga zone of Western Siberia (by example from the Nadym area). Earth's Cryosphere, XVI (4), 21–30. (in Russian)

Фотиев С.М. Возможные изменения геотермического поля криогенной области России при глобальном потеплении климата // Криосфера Земли, 2000, т. IV, № 3, с. 14–29.

Fotiev, S.M., 2000. Potential changes in the geothermal field of Russia's permafrost zone during global warming. Earth's Cryosphere, IV (3), 14–29. (in Russian)

Christensen, J.H., Christensen, O.B., Lopez, P., van Meijgaard, E., Botzet, M. The HIRHAM4 regional atmospheric climate model // Tech. Rep. 96-4, Danish Meteorol. Inst., Copenhagen, Denmark, 1996, p. 51.

Christensen, J.H., Christensen, O.B., Schulz, J.P., Hagemann, 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.

Hugelius, G., Virtanen, T., Kaverin, D., Pastukhov, A., Rivkin, F., Marchenko, S., Romanovsky, V., Kuhry, P. High-resolution mapping of ecosystem carbon storage and potential effects of permafrost thaw in periglacial terrain, European Russian Arctic // J. Geophys. Res., 2011, vol. 116, p. 1–14, G03024, DOI: 10.1029/2010JG001606.

Rivkin, F.M., Vlasova, J.V., Popova, A.P., Mazhitova, G., Kuhry, P., Parmuzin, I.S., Chelina, I.V. Mesoscale and detailed geocryological mapping as a basis for carbon budget assessment (east European Russian arctic, CARBO – NORTH project) // Proc. of the 9th Intern. Conf. Permafrost (June 29–July 3, 2008), Fairbanks, USA, Univ. of Alaska, 2008, vol. 2, p. 1493–1498.

*Поступила в редакцию
18 мая 2016 г.*