

ЦИФРОВЫЕ КАРТЫ КРИОЛИТОЗОНЫ И ОЦЕНКА СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В КРИОСФЕРЕ

Дроздов Д.С.
Институт криосферы Земли СО РАН
Российский государственный
геологоразведочный университет
(МГРИ-РГГРУ)

Тюменский научный центр СО РАН
Тюменский государственный
университет
Тюменский индустриальный
университет

Малкова Г.В.
Институт криосферы Земли СО РАН
Тюменский индустриальный
университет

Романовский В.Е.
Институт криосферы Земли СО РАН
Тюменский государственный
университет
Geophysical Institute, University of
Alaska Fairbanks, Fairbanks, Alaska

Васильев А.А.
Институт криосферы Земли СО РАН

Брушков А.В.
Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова,
Геологический факультет

Лейбман М.О., Садуртдинов М.Р.
Институт криосферы Земли СО РАН

Пендин В.В., Горбцов Д.Н.
Российский государственный
геологоразведочный университет
(МГРИ-РГГРУ)

Устинова Е.В.
Институт криосферы Земли СО РАН
Тюменский индустриальный
университет

Коростелев Ю.В.
Институт криосферы Земли СО РАН

Стрелецкий Д.А.
Институт криосферы Земли СО РАН
Department of Geography,
George Washington University,
Washington, D.C.

Слагода Е.А.
Институт криосферы Земли СО РАН
Тюменский государственный
университет
Тюменский индустриальный
университет

**Скворцов А.Г., Гравис А.Г.,
Бердников Н.М., Орехов П.Г.**
Институт криосферы Земли СО РАН

Лаухин С.А.
Институт криосферы Земли СО РАН
Российский государственный
геологоразведочный университет
(МГРИ-РГГРУ)

Царёв А.М.
Институт криосферы Земли СО РАН

Пономарева О.Е.
Институт криосферы Земли СО РАН
Российский государственный
геологоразведочный университет
(МГРИ-РГГРУ)

Фалалеева А.А.
Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова,
Геологический факультет

Железняк М.Н.
Институт мерзлотоведения
им. П.И. Мельникова СО РАН

ВВЕДЕНИЕ

Существование и строение земной криосферы обусловлено положением Земли в Солнечной системе и определяется соотношением потоков тепла, приходящих от Солнца и из недр. В тропосфере содержится до 90 % атмосферной влаги, значительная часть которой находится в мерзлом состоянии. Поверхностная криосфера (ледники, морской лед) и подземная криосфера (вечномерзлые или многолетнемерзлые горные породы) сосредоточена в основном в Арктике и Антарктике и лишь ограничено — в горных районах умеренных и низких широт. Общие закономерности распространения мерзлоты теоретически обоснованы и известны, локальная изменчивость весьма высока, зависит от местных условий и требует детального изучения. Хорошо изученные площади на территории криолитозоны России являются собой своеобразные «ключевые участки», позволяющие экстраполировать и интерполировать информацию с использованием геосистемного подхода. Соответствующая картографическая модель для любой точки территории с заданной точностью и надежностью должна давать информацию о фоновых

и текущих природных и техногенных условиях, а также быть основой для прогноза изменений криолитозоны. Режимные наблюдения обеспечивают итерационную корректировку карт-моделей криолитозоны.

Общее направление изменения климатических параметров неблагоприятно для существования многолетнемерзлых пород. Так, на некоторых режимных площадках в Западной Сибири, образующих региональный трансект от северной тайги до высокоарктической тундры, зафиксировано как увеличение средних годовых температур (воздух и грунты) и высоты снежного покрова, так и последовавшее за этим увеличение мощности деятельного слоя вплоть до образования участков с мерзлотой неслющающегося типа в северной тайге и лесотундре.

ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ ОХВАТ, МОЩНОСТИ И ЛЬДИСТОСТИ ММП КРИОЛИТОЗОНЫ РОССИИ

Согласно модельным прогнозам, в северных регионах России и в том числе на Ямале среднегодовая температура воздуха может повыситься к 2030 г. на 1,5...2,5 °С, к середине XXI в. — на 4 °С, а в конце XXI в. — более чем на 5 °С! Одно- временно прогнозируется повышение количества осадков к 2030 г. на 10–15 % и возрастание снежного покрова. В сумме это значимо снизит прочность грунтов и устойчивость ландшафтов. Уже сейчас для криолитозоны севера Западной Сибири фиксируется снижение несущей способности грунтов на 5–30 %, причем максимальное снижение соответствует дуге вдоль основных городов региона (Салехард, Надым, Новый Уренгой и далее в направлении Норильска). Это свидетельствует о том, что у сооружений, построенных примерно 25–40 лет назад с запасом прочности 1,2–1,4, запас

по грунту практически исчерпан, так как температуры минеральных горных пород основания приблизились к -0 °С. На южном обрамлении криолитозоны идет оттаивание островов мерзлоты под торфяниками и буграми пучения, что существенно скажется на устойчивости линейных сооружений.

Эти изменения отображаются на разномасштабных картах криолитозоны. Основные, существенные для Арктической зоны РФ, отображены в «Национальном атласе Арктики» под редакцией Н.С. Касимова (М.: Роскартография, 2017. — 496 с.), разработанном по поручению В.В. Путина. Вице-президент РФО Артур Чилингаров назвал выход атласа знаменательным событием. В состав комплекта вошли мерзлотные карты:

- Распространение, мощность и льдистость многолетнемерзлых пород.
- Температуры многолетнемерзлых пород и экзогенные процессы в криолитозоне.

• Районирование криолитозоны по условиям хозяйствования.

- Тенденции изменения мерзлотных условий в XXI в. при умеренном сценарии потепления климата.

Комплект карт атласа сопровождается пояснительной запиской, отражающей современные представления о строении и закономерностях криолитозоны России. Созданные цифровые карты улучшены по сравнению с оригинальной Геокриологической картой СССР масштаба 1:2 500 000, составленной авторским и редакторским коллективом под руководством Э.Д. Ершова и К.А. Кондрагевой в МГУ [1991]. На новых опубликованных картах для некоторых контуров в легенду добавлены пояснительные таблицы (для криогенных процессов и явлений) или буквенные обозначения таких параметров мерзлых толщ, как мощность, льдистость

или температура ММП, которые дополняют цвет или штриховку, являющиеся основным изобразительным средством. Данные улучшения существенно облегчают чтение тематических геокриологических карт. При необходимости путем наложения любых векторных тематических слоев цифровая версия карты может менять свое содержание в зависимости от конкретных задач и целей. Пример одной из разработанных мерзлотных карт атласа показан на рис. 1.

Атлас характеризует деятельный слой горных пород. В криолитозоне происходит как сезонное оттаивание ММП, так и сезонное промерзание на немерзлых участках в областях прерывистой и островной мерзлоты. Процессы сезонного протаивания и промерзания пород определяются условиями теплообмена на поверхности Земли, которые контролируются наклоном и экспозицией поверхности, литологическим составом и свойствами верхнего горизонта пород, их температурным и влажностным режимами, растительным, почвенным, снежным и водным покровами, зимними и летними осадками, заболоченностью.

Основные закономерности распространения различных типов сезонного оттаивания и промерзания в целом по криолитозоне определяются устойчивостью мерзлоты, которую можно выразить через среднегодовую температуру пород, тип климата и годовую амплитуду температур на поверхности (рис. 2). В пределах каждого типа, в силу изменчивости местных условий, всегда есть участки с аномальными промерзанием или оттаиванием, свойственными более северным или более южным территориям. Для горных районов характерна большая изменчивость протаивания-промерзания, связанная с высотной поясностью.

районах Европейского Севера, Западной Сибири, на Дальнем Востоке и по южному обрамлению криолитозоны.

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ АРКТИЧЕСКИХ ТЕРРИТОРИЙ

Глобальные климатические флуктуации находят свое отражение в трансформации арктических ландшафтов и их мерзлотных характеристик. На территории Уренгойского газоконденсатного месторождения (стационар Уренгойский), охватывающей ландшафты от северной тайги до южной тундры, завершено 40-летний цикл съёмочных, режимных и картографических работ, позволивший построить серию временных карт-срезов, фиксирующих температуру ММП территории приблизительно на 1977, 1997, 2007 и 2017 гг. (рис. 4). Установлено, что суммарное повышение температуры грунтов на Уренгойской площади за 40 лет в зависимости от ландшафта составило от 1 до 2,5...3 °С, при этом продолжились расширяться участки опущенной кровли мерзлоты в северной лесотундре, а также неслявающаяся мерзлота появилась в южной тундре, расширилось продвижение на север предтундровых редколесий [Дроздов и др., 2017].

ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ КРИОЛИТОЗОНЫ ПРИ ПОТЕПЛЕНИИ КЛИМАТА

Реакция многолетней мерзлоты на глобальные климатические изменения оценивается математическим моделированием и по методу палеоаналогов. И тот и другой методы используются для прогноза изменения геокриологических условий в будущем. Температура воздуха задается на поверхности грунта и снежного покрова (зимой) или включается

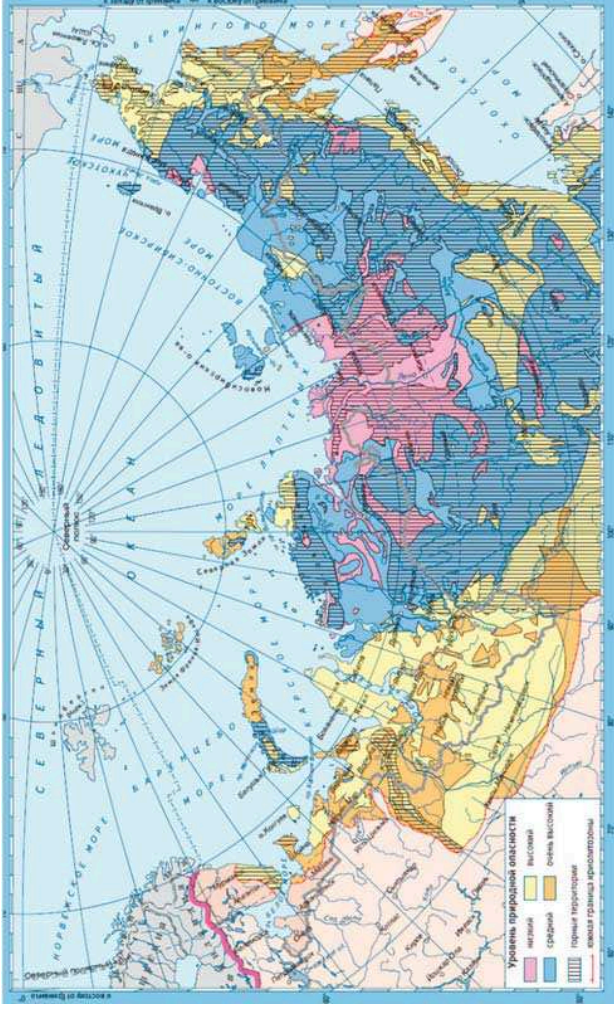


Рис. 3. Карта районирования криолитозоны России по условиям хозяйствования [Национальный атлас Арктики, 2017]

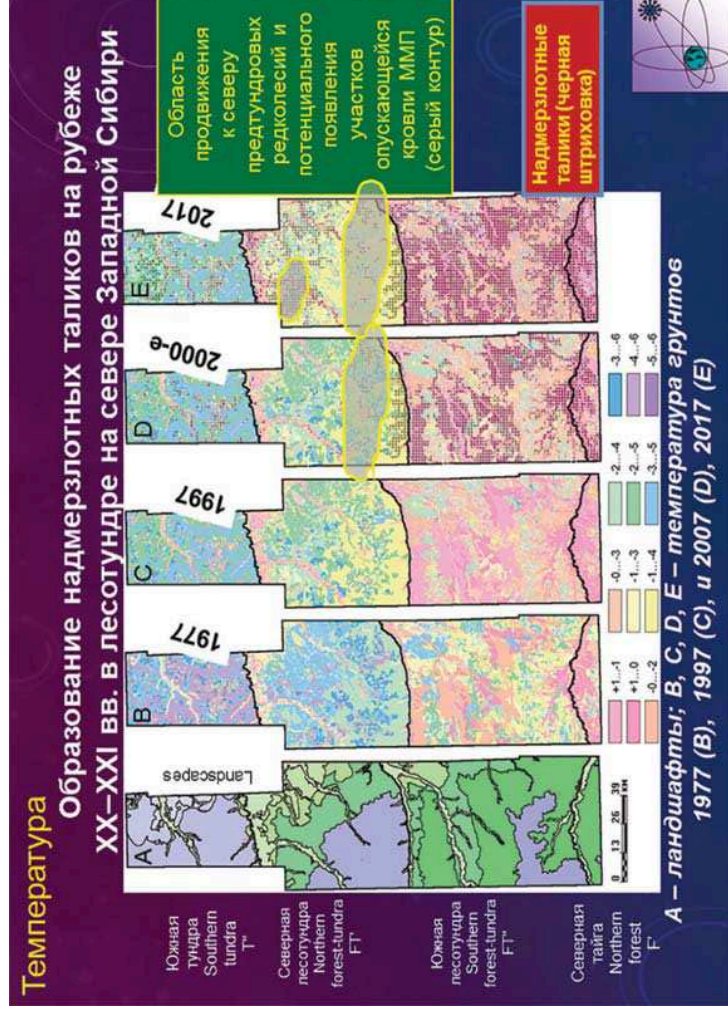
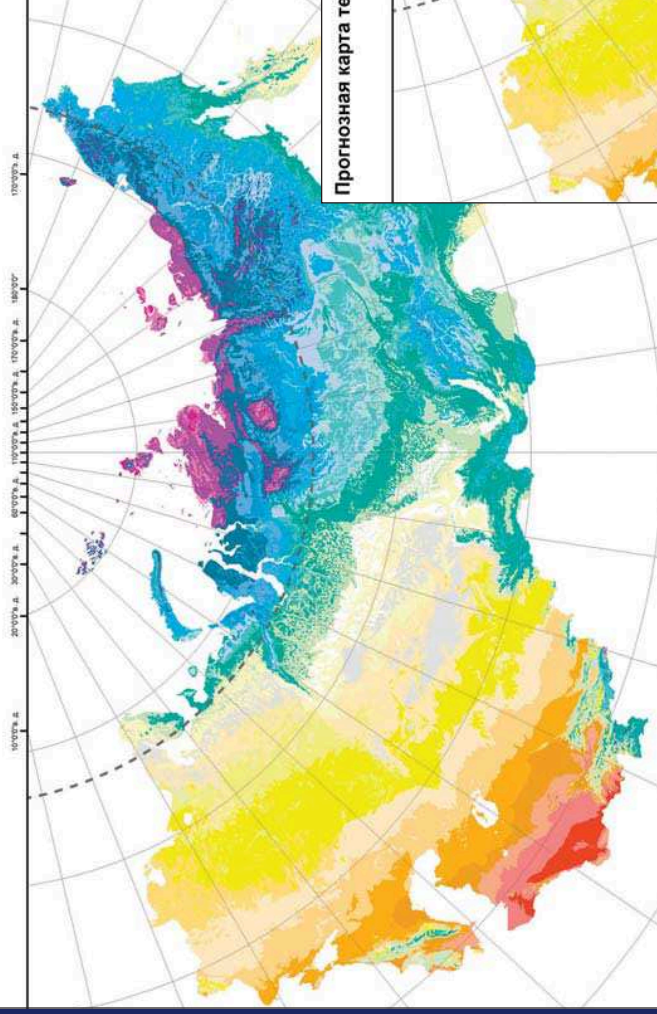


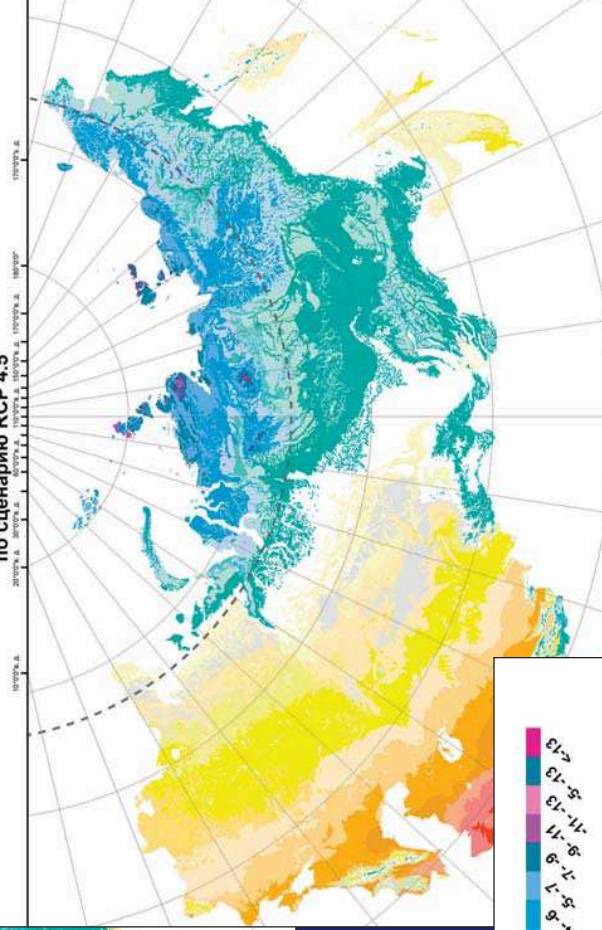
Рис. 4. Образование надмерзлотных таликов на рубеже XX–XXI вв. в лесотундре на севере Западной Сибири

Карта температуры многолетнемерзлых пород в криолитозоне России (2000 год)



Изменение температуры вечной мерзлоты к середине XXI в. (2000–2050)

Прогнозная карта температуры многолетнемерзлых пород в криолитозоне России (2050 год) по сценарию RCP 4.5



Температура многолетнемерзлых пород, °С



в граничное условие 3-го рода в расчетную формулу [Павлов и др., 2010]. Таким способом выполнены прогнозные оценки для ряда районов Российского Севера [Павлов, Малкова, 2009; Клименко и др., 2007; Хрусталев, Давыдова, 2007], обобщенные результаты моделирования которых приведены в таблице.

Согласно выполненным прогнозам, в городах Воркута, Надым и Мирный температура пород до конца XXI столетия сохраняет отрицательные значения, причем расчетное повышение температуры грунта получилось близким к ро-

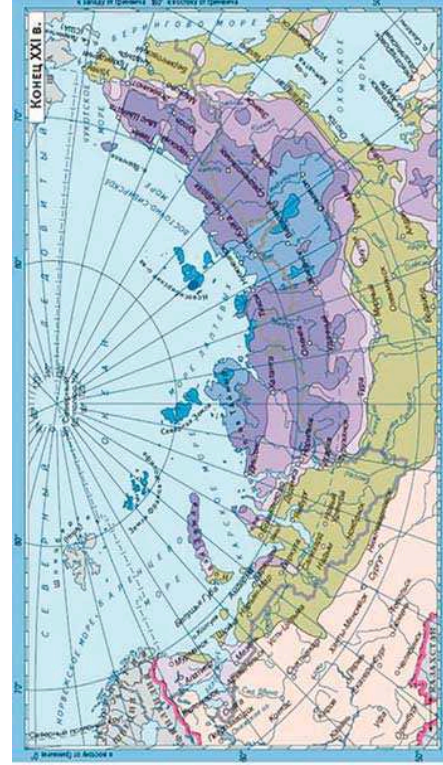
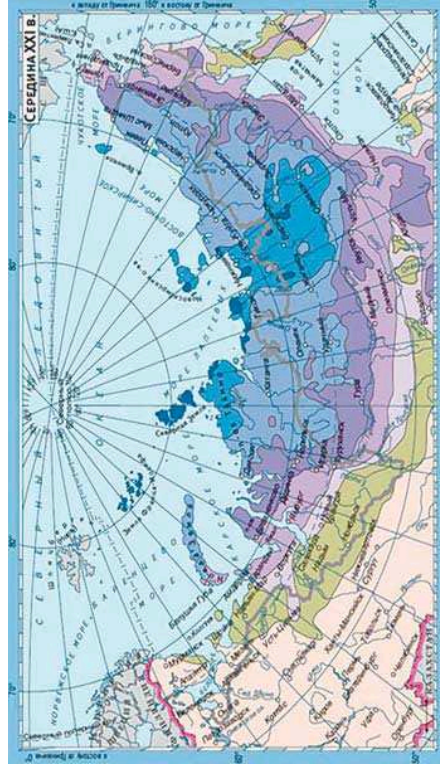
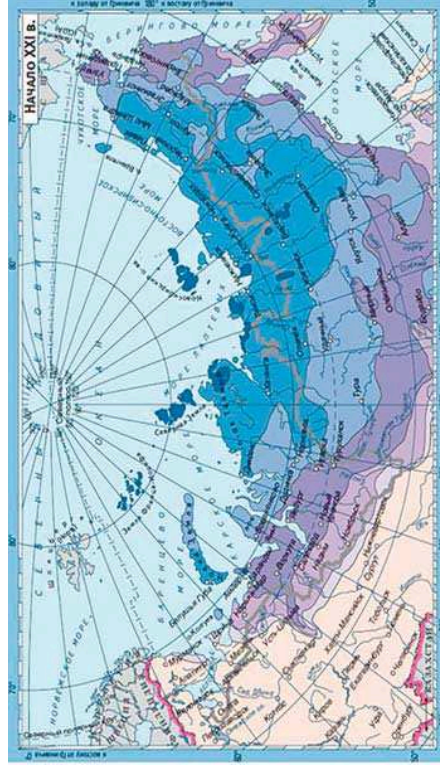
сту температуры воздуха. При этом глубина сезонного оттаивания за первую половину XXI в. изменится не более чем на 20 %. Для условий Якутска, где отмечается значительное потепление современного климата, к 2050 г. прогнозируется повышение температуры верхних горизонтов мерзлых пород на 1,5 °С, к 2100 г. — на 3,0 °С [Павлов, 2008].

Применен метод моделирования вечной мерзлоты, основанный на ансамблевом усреднении параметров многолетнемерзлых пород с учетом пространственной изменчивости термических

свойств снежного покрова, растительности, слоистых грунтов верхних горизонтов ММП и их влажности (GIRL2, Геофизический ин-т Университета Аляски), учитывающий 5 усредненных IPCC моделей глобальной циркуляции атмосферы (ESNAM5, GFDL2.1, CCSM, HADcm3 и CCCMA для сценария A1B). С его помощью при условии потепления климата на 2 °С к середине XXI в. и на 4 °С к концу XXI в. [Romanovsky et al., 2010] составлены прогнозные карты температуры ММП российской криолитозоны для сроков 2050 и 2010 гг. (рис. 5).

Прогнозные изменения температуры воздуха (Твз) и грунтов (Тг) в XXI в.
 [Павлов и др.: Хрусталева, Давыдова, 2007]

Годы	Мерзлотно-климатические параметры				
	Т _{вз} , °С	Т _г , °С	Глубина сезонного протаивания, м	Мощность криолитозоны, м	ΔТ _г /ΔТ _{вз}
<i>Воркута</i>					
2000–2010	-5,4	-0,94	0,92	71,90	-
2040–2050	-4,6	-0,28	0,98	71,78	0,825
2090–2100	-4,1	-0,07	1,26	71,37	0,67
<i>Надым</i>					
2000–2010	-5,4	-1,15	0,59	91,00	-
2040–2050	-4,5	-0,22	0,64	90,83	1,03
2090–2100	-3,9	-0,04	1,50	90,22	0,74
<i>Мирный</i>					
2000–2010	-6,3	-1,99	1,95	301,9	-
2040–2050	-4,6	-0,56	2,33	301,7	0,84



Условные обозначения:

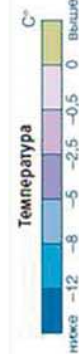


Рис. 5. Распространение и температура многолетнемерзлых пород при климатическом сценарии А1В для сроков 2000, 2050, 2100 гг. (модель по G1PL2)

При принятом сценарии область оттаивания мерзлоты с поверхности будет постепенно увеличиваться, а температура ММП на остальной части криолитозоны — повышаться. К середине XXI в. талые породы с положительной среднегодовой температурой будут развиты на большей части Европейского Севера, за исключением Югорского полуострова и северных

районов Республики Коми. В Западной Сибири граница распространения островов ММП с поверхности будет проходить практически по северному полярному кругу. Полностью оттают острова ММП на юге Красноярского края, в Приамурье и на Камчатке. К концу XXI в. уже практически 50 % площади современной криолитозоны будет занято полностью оттаявшими

с поверхности ММП. Низкотемпературные ММП сохранятся только в Средней Сибири и на Таймыре. Тем не менее такого отрезка времени будет недостаточно для полного оттаивания толщ ММП — кровля мерзлоты опустится на некоторую глубину в Европеейской части РФ, и на юге Западной Сибири по-прежнему сохранится реликтовая мерзлота.

Работа выполнена благодаря программам фундаментальных исследований РАН, проект IX.135.2.2, и СО РАН, грантам РФФИ (№ 16-05-00249, № 16-45-890257-ЯНАО, № 18-55-11005 АФ-т-КлимЭко, № 18-05-60222-Арктика, № 18-05-60004, № 18-55-11003), РНФ (№ 16-17-00102), соглашению с Минобрнауки № 14.587.21.0048 (УИС RFMEFI58718X0048), международным программам TSP, CALM, GTN-P, PEEH, SWIPA, GCW, SODEEP, Администрации ЯНАО, Российской ТПП, предприятиям ГазпромДобычаНадым, ГазпромДобычаУренгой, Нортгаз

ЛИТЕРАТУРА

1. Геокриологическая карта СССР масштаба 1:2 500 000 / Мингео СССР, Гидро-спецгеология, МГУ; под ред. Э.Д. Ершова. — М.: ГУГК, 1991. — 16 л.
2. Геокриология СССР. Т. 1 / под ред. Э.Д. Ершова. — 1988. — С. 15.
3. Дроздов Д.С. и др. Цифровые карты криолитозоны и оценка современных тенденций изменений в криосфере / Д.С. Дроздов, Г.В. Малкова, В.Е. Романовский и др. // Мат. XI Междунар. симп. по проблемам инж. мерзлотоведения, г. Магадан (Россия), 5-8 сент. 2017 г.: тез. докл. — Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2017. — С. 32-33 (англ.), 233-234 (рус.).
4. Клименко В.В. и др. Изменения климата и динамика толщ многолетнемерзлых пород на северо-западе России в ближайшие 300 лет / В.В. Клименко, Л.Н. Хрусталев, О.В. Микушина // Криосфера Земли. — 2007. — Т. XI, № 3. — С. 3-13.
5. Национальный атлас Арктики / ред. Н.С. Касимов. — М.: Роскартография, 2017. — 496 с.
6. Павлов А.В. Мониторинг криолитозоны. — Новосибирск: Гео, 2008. — 229 с.
7. Павлов А.В. и др. Мелкомасштабное картографирование трендов современных изменений температуры грунтов на севере России / А.В. Павлов, Г.В. Малкова // Криосфера Земли. — 2009. — Т. XIII, № 4. — С. 32-39.
8. Павлов А.В. и др. Актуальные аспекты моделирования и прогноза термического состояния криолитозоны в условиях меняющегося климата / А.В. Павлов, Г.З. Перльштейн, Г.С. Тиленко // Криосфера Земли. — 2010. — Т. XIV, № 1. — С. 3-12.
9. Хрусталев Л.Н. и др. Прогноз потепления климата и его учет при оценке надежности оснований зданий на вечномёрзлых грунтах / Л.Н. Хрусталев, И.В. Давыдова // Криосфера Земли. — 2007. — Т. XI, № 2. — С. 68-75.
10. Romanovsky V.E. et al. Thermal State of Permafrost in Russia / V.E. Romanovsky, D.S. Drozdov, N.G. Oberman et al. // Permafrost and Periglacial Processes. — 2010. — Vol. 21. — Pp. 136-155.