

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗ

УДК 551.340

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ МЕРЗЛЫХ ТОЛЩ  
ПРИ СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ КЛИМАТА

Г.В. Малкова, А.В. Павлов, Ю.Б. Скачков\*

*Институт криосферы Земли СО РАН,  
625000, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия, galina\_malk@mail.ru  
\*Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН,  
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия, skachkov@mpi.ysn.ru*

На основе обобщения метеорологических данных за период с 1965 по 2010 г. проведены оценка и картографирование современных климатических изменений на территории криолитозоны России. Рассмотрены причины отставания трендов среднегодовой температуры верхних горизонтов многолетнемерзлых пород от трендов среднегодовой температуры воздуха. Разработана мелкомасштабная карта термической устойчивости мерзлых толщ при современных изменениях климата.

Потепление климата на Земле отчетливо проявляется в последние 100–110 лет. Начиная с 1995 г. существенно возросла изменчивость климата, стали прослеживаться различные климатические аномалии. На этом фоне в Арктике и прилегающих регионах наметилась тенденция к повышению трендов температуры воздуха, тогда как в ряде субарктических районов темпы потепления климата замедлились, а на отдельных метеопунктах криолитозоны России (Туруханск, Алдан, Олекминск) отмечались приостановка климатического потепления и появление тенденции к похолоданию [Мельников и др., 2007; Павлов, 2008а; Павлов, Малкова, 2010].

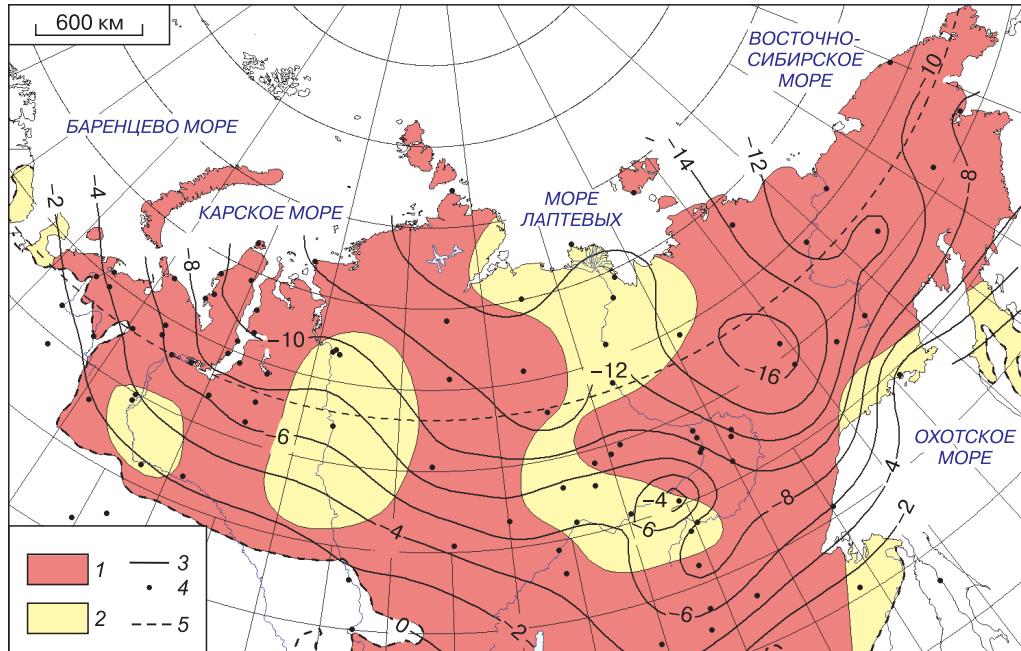
Количественно аномалии современных изменений климата обычно характеризуют путем сравнения метеорологических данных за последний десятилетний интервал с климатической нормой. При этом используются три градации повышений температуры воздуха ( $\Delta t_{вз}$ ): слабые ( $\Delta t_{вз} < 0,7$  °С), умеренные ( $0,7$  °С  $\leq \Delta t_{вз} \leq 1,0$  °С) и сильные ( $\Delta t_{вз} > 1$  °С) [Павлов, Малкова, 2005].

В последнее десятилетие (2000–2010 гг.) для многих регионов характерны аномально высокие среднегодовые температуры воздуха, поэтому на разработанной карте (рис. 1) показаны только две градации повышений среднегодовой температуры воздуха в 2000–2010 гг. относительно нормы (умеренная и сильная) и отсутствует категория слабых повышений температуры. Климатическая норма среднегодовой температуры воздуха показана на рис. 1 изолиниями и изменяется в пределах крио-

литозоны России от  $-2$  до  $-16$  °С. Сильное потепление климата (повышение температуры воздуха более 1 °С) охватывает большую часть территории криолитозоны России. Умеренное потепление климата приурочено к локальным участкам на Европейском Севере, в Западной и Средней Сибири и в Приморье.

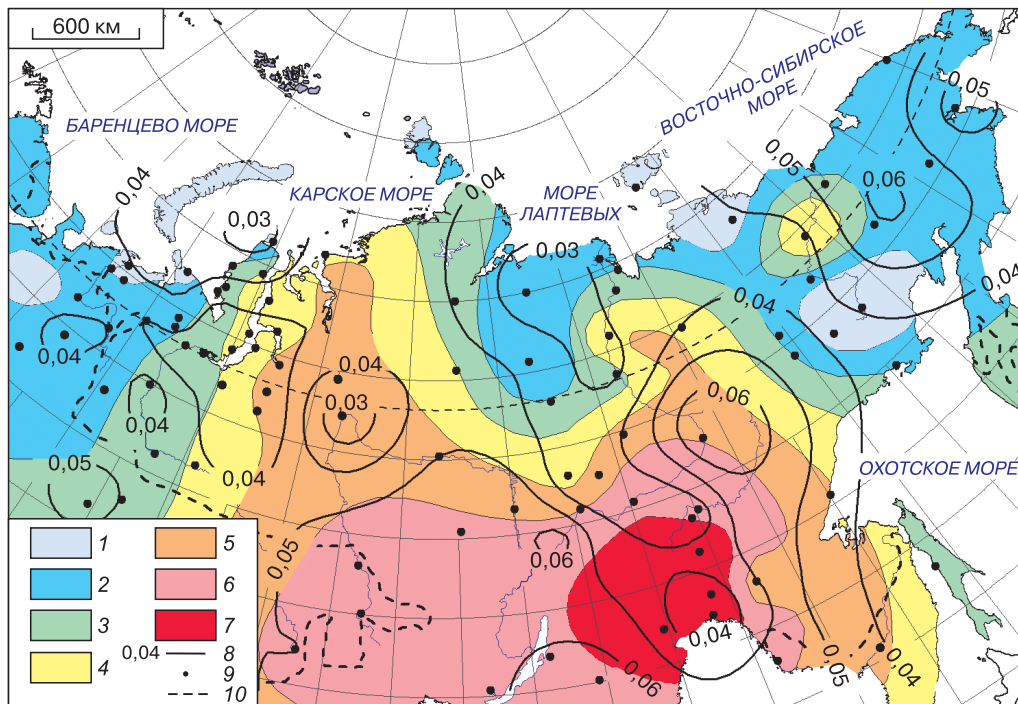
Для того чтобы выявить региональные особенности скорости потепления климата, нужно вычислить тренды среднегодовой температуры воздуха для разных временных интервалов. Базовая карта трендов за период 1965–2000 гг. приво-дилась ранее в работах [Павлов, Ананьева, 2004; Павлов, Малкова, 2005]. Продление рядов наблюдений до 2010 г. позволило проследить современные тенденции изменения климата и сравнить их с базовым периодом. На карте (рис. 2) тренды среднегодовой температуры воздуха за период 1965–2000 гг. разбиты на семь градаций и показаны разным цветом. На рис. 2 отчетливо прослеживаются зоны субмеридиональной направленности изолиний трендов (западный сектор Арктики и Субарктики) и зоны субширотной направленности изолиний трендов (восточный сектор). Наиболее высокие тренды (до 0,08 °С/год) температуры воздуха приурочены к южным районам Сибири, а наиболее низкие (менее 0,03 °С/год) – к Европейскому Северу, северу Средней и Восточной Сибири.

Тренды изменения температуры воздуха за период 1965–2010 гг. отображены на рис. 2 в виде изолиний с шагом 0,01 °С/год. Характер их распространения существенно отличается от базового



**Рис. 1. Изменчивость среднегодовой температуры воздуха на севере России в последнее десятилетие.**

1, 2 – повышение температуры относительно климатической нормы: 1 – сильное ( $\Delta t_{вз} > 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 2 – умеренное ( $0,7\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \Delta t_{вз} \leq 1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ); 3 – изолинии среднегодовой температуры воздуха (климатическая норма); 4 – метеостанции; 5 – южная граница криолитозоны.



**Рис. 2. Тренды среднегодовой температуры воздуха на севере России.**

1–7 – значения тренда ( $^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ) для периода 1965–2000 гг.: 1 – менее 0,02; 2 – 0,02–0,03; 3 – 0,03–0,04; 4 – 0,04–0,05; 5 – 0,05–0,06; 6 – 0,06–0,07; 7 – более 0,07; 8 – изолинии и значения тренда температуры ( $^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ) в период 1965–2010 гг.; 9 – опорные метеостанции; 10 – южная граница криолитозоны.

периода: 1) направленность изолиний трендов сильно изменилась (в их пространственном распределении нельзя проследить каких-либо широтных или субмеридиональных закономерностей); 2) колебания значений трендов в целом заметно уменьшились; 3) очаги минимальных трендов ( $0,03...0,04$  °C/год) сконцентрированы на Лено-Оленекском междуречье, в среднем течении р. Енисей и на севере п-ова Ямал; 4) максимальные тренды ( $0,06$  °C/год и более) зафиксированы на юге Сибири, в Центральной Якутии и на Чукотке.

Учитывая большую изменчивость климата в последнем десятилетии, следует ожидать, что каждый новый год будет вносить очередные коррективы в величину средних линейных трендов температуры воздуха, и изображение на карте существенно изменится.

Результаты геокриологического мониторинга на опорных стационарах за период с конца 1960-х гг. свидетельствуют о повышении температуры многолетнемерзлых пород (ММП) вслед за потеплением климата [Скачков и др., 2005, 2007; Малкова, 2010]. В ходе выполнения работ получен вывод, что в целом на территории криолитозоны России наблюдается большой разброс значений современных трендов среднегодовой температуры верхних горизонтов мерзлых толщ, но при этом их величина, как правило, не превышает двух третых

от трендов потепления климата. Для температуры воздуха характерен интервал изменения трендов от  $0,02$  до  $0,07$  °C/год, а для ММП более широкий диапазон – от  $0,004$  до  $0,050$  °C/год. Наибольшее влияние на термический режим мерзлых толщ оказывается при однонаправленных многолетних изменениях температуры воздуха и высоты снежного покрова [Павлов, 2008б; Павлов, Малкова, 2010; Павлов и др., 2010].

В качестве одного из критериев устойчивости мерзлых толщ и их чувствительности к изменениям климата был предложен безразмерный коэффициент  $K_\alpha = \alpha_{\text{тг}}/\alpha_{\text{тв}}$  – отношение трендов среднегодовой температуры грунтов и воздуха [Павлов, Малкова, 2009].

При значениях  $K_\alpha \leq 0,50$  отмечается высокая термическая устойчивость мерзлых толщ (многолетние изменения температуры грунтов менее чем на 50 % обусловлены потеплением климата, так как тренды среднегодовой температуры ММП более чем в 2 раза отстают от трендов среднегодовой температуры воздуха), при  $0,50 < K_\alpha \leq 0,75$  – средняя устойчивость (тренды среднегодовой температуры ММП в 1,5–2 раза отстают от трендов среднегодовой температуры воздуха) и при  $K_\alpha > 0,75$  – слабая устойчивость мерзлых толщ. С использованием этих градаций составлена карта термической устойчивости верхних горизонтов мерзлых толщ (рис. 3). Наиболь-

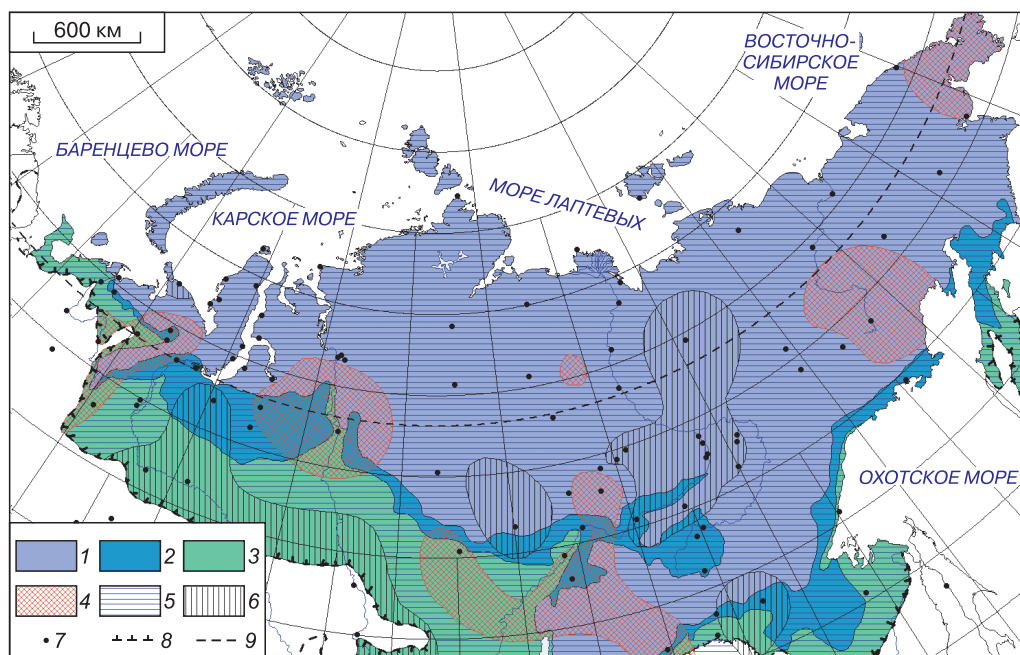


Рис. 3. Карта термической устойчивости мерзлых толщ на территории криолитозоны России.

1–3 – распространение ММП: 1 – сплошное, 2 – прерывистое, 3 – островное и редкоостровное; 4–6 – устойчивость ММП: 4 – слабая ( $K_\alpha > 0,75$ ), 5 – средняя ( $0,50 < K_\alpha \leq 0,75$ ), 6 – высокая ( $K_\alpha \leq 0,50$ ); 7 – метеостанции и стационары; 8 – южная граница криолитозоны; 9 – Северный полярный круг.

шая часть территории криолитозоны России попадает в интервал  $0,50 < K_{\alpha} \leq 0,75$  и обладает средней устойчивостью мерзлых толщ при потеплении климата. Слабая и высокая устойчивость мерзлых толщ наблюдается на локальных участках криолитозоны России.

На юге Якутии, несмотря на сильное потепление климата, сохранилась высокая термическая устойчивость ММП, что объясняется большой изменчивостью толщины снега в последние десятилетия и преимущественной ролью в формировании среднегодовых температур грунтов зимнего охлаждения и характера снегоотложений [Скачков, 2008]. На юге Западной Сибири и в Приамурье на фоне высоких трендов потепления климата пока не происходит синхронного повышения температуры грунтов. Это, очевидно, можно объяснить тем обстоятельством, что на данных территориях развиты высокотемпературные (с температурой, близкой к  $0^{\circ}\text{C}$ ) многолетнемерзлые толщ, и большое количество поступающего от Солнца тепла расходуется на фазовые переходы в грунтах [Павлов, Малкова, 2009]. Но дальнейшее устойчивое потепление климата может привести к повсеместному оттаиванию мерзлых толщ в этом регионе. Наиболее неблагоприятные условия сложились на территории Республики Коми, в среднем течении Енисея и в Прибайкалье, где в условиях островной и высокотемпературной криолитозоны наблюдаются высокие тренды повышения температуры ММП. Здесь мерзлые толщ имеют слабую устойчивость и начали деградировать.

Таким образом, данные мониторинга криолитозоны и мелкомасштабного геоинформационного картографирования весьма эффективны при изучении геокриологических последствий потепления климата. Выполненные исследования позволили разработать серию мелкомасштабных карт и оценить реакцию мерзлых толщ на современные изменения климата, выделив области с различной термической устойчивостью ММП.

## Литература

- Малкова Г.В.** Мониторинг среднегодовой температуры пород на стационаре Болванский // Криосфера Земли, 2010, т. XIV, № 3, с. 3–14.
- Мельников В.П., Павлов А.В., Малкова Г.В.** Геокриологические последствия современных изменений глобального климата // География и природ. ресурсы, 2007, № 3, с. 19–27.
- Павлов А.В.** Мониторинг криолитозоны. Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2008а, 229 с.
- Павлов А.В.** Тренды современных изменений температуры почвы на севере России // Криосфера Земли, 2008б, т. XII, № 3, с. 22–27.
- Павлов А.В., Ананьева Г.В.** Оценка современных изменений температуры воздуха на территории криолитозоны России // Криосфера Земли, 2004, т. VIII, № 2, с. 3–9.
- Павлов А.В., Малкова Г.В.** Современные изменения климата на севере России. Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2005, 54 с.
- Павлов А.В., Малкова Г.В.** Мелкомасштабное картографирование трендов современных изменений температуры грунтов на севере России // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 4, с. 32–39.
- Павлов А.В., Малкова Г.В.** Динамика криолитозоны в условиях меняющегося климата XX–XXI веков // Изв. РАН. Сер. геогр., 2010, № 5, с. 44–51.
- Павлов А.В., Перлыштейн Г.З., Типенко Г.С.** Актуальные аспекты моделирования и прогноза термического состояния криолитозоны в условиях меняющегося климата // Криосфера Земли, 2010, т. XIV, № 1, с. 3–12.
- Скачков Ю.Б.** Оценка современной изменчивости характеристик снежного покрова Якутии // Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения: Материалы Междунар. конф. Тюмень, Экспресс, 2008, с. 271–274.
- Скачков Ю.Б., Скрыбин С.П., Варламов С.П.** Влияние современных изменений климата на многолетнемерзлые породы Центральной Якутии // Материалы Третьей конф. геокриологов России. М., Изд-во Моск. ун-та, 2005, т. 2, с. 146–152.
- Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н., Варламов С.П.** Результаты 25-летних мониторинговых исследований криолитозоны на стационаре Чабыда (Центральная Якутия) // Криогенные ресурсы полярных регионов: Материалы Междунар. конф. Салехард, Изд-во ТюмНГУ, 2007, т. 1, с. 167–170.

Поступила в редакцию  
3 февраля 2011 г.