

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗ

УДК 551.340

**МЕЛКОМАСШТАБНОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ТРЕНДОВ
СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ГРУНТОВ
НА СЕВЕРЕ РОССИИ**

А.В. Павлов, Г.В. Малкова

*Институт криосферы Земли СО РАН, 625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия,
alexpav30@yandex.ru, galina_malk@mail.ru*

Рассмотрено формирование современных трендов температуры грунтов в условиях меняющегося климата и разнообразия ландшафтной обстановки. В результате систематизации и анализа данных климатического мониторинга и мониторинга криолитозоны определены локальные и уточнены региональные тренды современных изменений температуры грунтов на Севере. Соотношение между локальными трендами изменений температуры грунтов и трендами изменений температуры воздуха практически не выходит за пределы 0,2–1,2, при осреднении данных по регионам этот интервал может быть заметно сужен. Разработаны две мелкомасштабные электронные карты: карта линейных трендов изменений среднегодовой температуры грунтов на севере России за 1965–2005 гг. и карта отношений трендов температуры грунтов к трендам температуры воздуха. Результаты исследований могут быть использованы при ретроспективных оценках эволюции состояния криолитозоны и прогнозе ее изменений в XXI веке.

Климат, криолитозона, ландшафтные условия, многолетние изменения, мониторинг, ретроспективные оценки, температура воздуха, температура грунтов, тренд

**SMALL-SCALE MAPPING OF TRENDS OF THE CONTEMPORARY
GROUND TEMPERATURE CHANGES IN THE RUSSIAN NORTH**

A.V. Pavlov, G.V. Malkova

*Earth Cryosphere Institute SB RAS, 625026, Tyumen, Malygina str., 86, Russia,
alexpav30@yandex.ru, galina_malk@mail.ru*

Formation of the contemporary ground temperature trends under the varying climate and the diversity of landscape conditions is considered. The local and regional trends of contemporary changes of ground temperature in the north are determined and specified as a result of classification and analysis of the climatic and permafrost monitoring data. The relation between the local trends of ground temperature changes and the trends of air temperature changes does not exceed the value of 0.2–1.2. These limits can be noticeably narrower due to the data smoothing throughout the regions. Two small-scale geoinformation maps are developed: The Map of linear trends of ground temperature changes in the north of Russia for 1965–2005 and The Map of ground and air temperature trend ratio. Results of these researches can be used in retrospective analysis of the evolution of permafrost zone and in the forecast of its expected changes in the XXI century.

Climate, permafrost zone, landscape conditions, retrospective analysis, long-year changes, monitoring, air and ground temperature, trend

ВВЕДЕНИЕ

Потепление климата в Северном полушарии, отмечаемое с середины 1960-х гг., наиболее отчетливо выражено в субарктических широтах. Оно может сопровождаться повышением температуры мерзлых грунтов и активизацией негативных криогенных процессов, а в южных районах криолитозоны, особенно в сочетании с техногенной нагрузкой, может вызвать оттаивание многолетнемерзлых грунтов. В формировании отклика криолитозоны

на изменения климата существенную роль играют ее исходное термическое состояние и ландшафтные условия. Для получения достоверных результатов необходимо проводить осреднение данных о температуре грунтов по территории наблюдаемых объектов мониторинга криолитозоны. Наибольшие современные термические изменения в верхних горизонтах криолитозоны происходят при однонаправленных повышениях температуры воз-

духа и высоты снежного покрова. Если тенденции к изменению температуры воздуха и теплоизолирующего влияния снега не совпадают, наблюдается стабилизация термического состояния криолитозоны. Влияние других метеорологических факторов, в частности летних осадков, на криолитозону, как правило, менее выражено. Наибольшая чувствительность мерзлых пород к изменению климата обычно характерна для зоны тундры, где снежный покров формируется плотным и поэтому не обладает достаточно высокими теплозащитными свойствами.

Тренды изменений температуры грунтов являются важным показателем скорости переформирования термического состояния криолитозоны при изменениях современного климата. Мелкомасштабное геоинформационное картографирование, надежно опробованное для оценки региональных мерзлотно-климатических изменений [Павлов, Малкова, 2005], позволяет наглядно изучить закономерности пространственных изменений трендов температуры грунтов на всей территории криолитозоны России и учесть их в оценочных прогнозах.

ОБЗОР ИЗУЧЕННОСТИ ТРЕНДОВ ИЗМЕНЕНИЯ СРЕДНЕГОДОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ГРУНТОВ ПРИ ПОТЕПЛЕНИИ КЛИМАТА

Эволюция термического состояния криолитозоны тесно связана с многолетними изменениями температуры воздуха. Изменения температуры воздуха в XX в. имели ритмический и достаточно согласованный в смежных регионах характер при общем хорошо выраженном тренде потепления [Анисимов и др., 1999; Кондратьев, 2004; Павлов, Малкова, 2005; Мельников, Павлов, 2006]. В Северном полушарии потепление климата началось во второй половине 1960-х – начале 1970-х гг. и продолжается уже почти полвека. Наибольшая скорость его отмечалась в 1980-е гг. [Павлов, 2003; Павлов, Малкова, 2005; Мельников, Павлов, 2006]. Устойчивое потепление климата сохранялось до середины 1990-х гг. и в ряде пунктов превышало 2 °С. Максимальное потепление климата (1,8–2,7 °С) отмечалось не в арктических, а в субарктических и умеренных широтах; оно характерно для континентальных районов Якутии, Забайкалья, Западной Сибири. Минимум потепления (до 0,7 °С) приходился в основном на Северо-Восток, окраинные районы Европейского Севера и Западной Сибири [Павлов, 2003]. С 1990–1995-х гг. тренды потепления климата и криолитозоны на большей части территории Севера заметно уменьшились, при этом возросла изменчивость во времени климатических факторов. В конце XX – начале XXI в. четкое повышение температуры воздуха сохранилось примерно на трети всех метеостанций

Севера, в ряде мест отмечается приостановка климатического потепления и даже тенденция к его похолоданию [Павлов и др., 2007; Павлов, Малкова, 2008]. Все выбранные в качестве опорных метеостанции севера России можно условно разделить на три группы по интенсивности изменения климата за последние 15–18 лет (с 1990 г.). К первой группе отнесены метеостанции, где потепление продолжается (Усть-Цильма, Воркута, Марре-Сале и др. – всего 66 % от общего числа опорных метеостанций). Во вторую группу (со слабыми изменениями климата) объединены метеостанции, где отмечается заметное снижение темпов потепления за последние 15–18 лет (Салехард, Ханты-Мансийск, Тикси и др. – 25 % метеостанций). К третьей группе отнесены метеостанции, по данным которых тренды изменения среднегодовой температуры воздуха за последние годы близки к 0 °С/год или являются отрицательными, т. е. либо фиксируется приостановка потепления климата, либо начинается похолодание (Туруханск, Олекминск, Алдан и др. – 9 % метеостанций).

Массовые наблюдения за температурой почвы (грунтов) на метеостанциях (до глубины 1,6–3,2 м) начались в России в 1930–1950-х гг. Наибольший объем наблюдений за температурой грунтов в условиях сплошной криолитозоны выполнен в Якутии и на Северо-Востоке, а в условиях прерывистой криолитозоны – в средней части Западной Сибири, в Забайкалье и Приамурье. Данные этих наблюдений после тщательной проверки достоверности можно эффективно использовать при оценке термических изменений в верхних горизонтах криолитозоны [Васильев, 1999; Гиличнский и др., 2000; Дучков и др., 2000; Чудинова и др., 2003; Павлов, 2008а,б]. Наиболее полные данные (по 34 метеорологическим станциям, относительно равномерно распределенным на севере России) использованы в работах Ю.А. Израэля с соавт. [2002, 2006]. Интерпретация этих данных свидетельствует о возникновении тенденций к современному повышению температуры верхних горизонтов мерзлых грунтов вслед за потеплением климата [Израэль и др., 2002, 2006; Павлов и др., 2007]. За 1961–2003 гг. температура грунтов на глубине 1,6 м повысилась по сравнению с нормой на 0,1–1,2 °С. Средние региональные значения линейных трендов изменений температуры грунтов на севере России укладывались в пределы 0,018–0,034 °С/год [Павлов, 2008б].

Использование данных мониторинга криолитозоны, полученных на геофизиологических стационарах, представляет широкие возможности для уточнения этих результатов. Однако реакция (отклик) температуры грунтов на изменения климата в значительной мере зависит от ландшафтных условий территории наблюдательных объектов, поэтому возникает необходимость пространственно-го осреднения натуральных измерений. В результате

осреднения получают локальные тренды изменений температуры грунтов примерно с той же частотой пространственного покрытия, что и для трендов температуры воздуха.

Достоверность информации повышается при переходе от локальных оценок к региональным.

Тренды изменений температуры воздуха ($\alpha_{ТВ}$) и грунтов ($\alpha_{ТГ}$) могут существенно варьировать в зависимости от рассматриваемого интервала времени. Более устойчивым показателем современных мерзлотно-климатических изменений является соотношение между этими трендами – коэффициент K_α ($K_\alpha = \alpha_{ТГ}/\alpha_{ТВ}$). Это соотношение позволяет рассчитывать тренды изменений температуры грунтов, исходя из трендов изменений температуры воздуха, которые существенно лучше изучены. По данным Ю.А. Израэля с соавт. [2006], значение K_α изменяется для условий севера России от 0,21 (Чита) до 1,6 (Жиганск). В среднем для севера России коэффициент K_α , по этим метеорологическим данным, составил 0,78, т. е. примерно соответствовал данным геокриологических стационаров (0,6–0,8) [Павлов и др., 2002; Павлов, 2008б].

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ И СОПОСТАВЛЕНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ И ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ТРЕНДЫ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГРУНТОВ

Наиболее эффективные оценки современных изменений термического состояния верхних горизонтов криолитозоны можно получить при рассмотрении взаимодополняющих данных о температуре грунтов, наблюдаемой как на метеостанциях, так и на геокриологических стационарах. В исследованиях авторами использованы данные 65 метеорологических станций (в основном за 1965–2005 гг.) и восьми геокриологических стационаров (с 1970 по 2005 г.). Отбирались данные метеорологических станций о температуре грунтов на глубине 3,2 м (при их отсутствии – на глубине 1,6 м), а геокриологических стационаров – на глубине 10 м. Натурные данные геокриологических стационаров [Павлов, 2003, 2008а] и результаты численных экспериментов [Надежина и др., 2008] показывают, что коэффициент линейного тренда современных изменений температуры криолитозоны убывает с глубиной, т. е. возмущающий на поверхности тепловой импульс затухает. Скорость этого затухания зависит от темпа потепления климата, ландшафтной дифференциации территории, литологического разреза, исходного термического состояния грунтов и других природных факторов. Оценки данных геокриологических стационаров показывают, что при достаточной продолжительности наблюдений (например, за 1970–2000 гг.) тренды изменений среднегодовой температуры

грунтов на глубине 3 и 10 м обычно сопоставимы между собой. Это дает основание при изучении трендов современных изменений температуры грунтов комбинировать данные метеорологических станций и геокриологических стационаров.

Из достаточно развитой в конце XX в. наблюдательной сети мониторинга криолитозоны к настоящему времени сохранилось только 12–15 полигонов, стационаров и режимных участков [Павлов, 2008б]. Более половины этих наблюдательных объектов (Воркутинский мерзлотный полигон, стационары Болванский, Марре-Сале, Надым, Чабыда, Якутск, режимные участки Уренгой, Дионисия) непрерывно функционируют в течение 20–35 лет и более, что в ряде случаев оказывается достаточным для выполнения ретроспективных оценок и прогнозов ожидаемых изменений термического состояния криолитозоны [Павлов и др., 2002; Павлов, 2003; Оберман, 2006, 2007; Малкова, 2007; Скачков и др., 2007; Васильев и др., 2008; Рузанов, 2008]. Отклик температуры грунтов на современные изменения климата существенно зависит от ландшафтных условий. Поэтому на каждом информационном объекте мониторинга криолитозоны было организовано по несколько экспериментальных площадок (пунктов наблюдений) в пределах определенной местности или ландшафта [Павлов и др., 2002], при этом одна из площадок соответствовала доминантному типу ландшафтных условий. Вычисления дают широкий диапазон трендов изменения температуры грунтов не только на стационарах в различных регионах, но и на разных экспериментальных площадках одного и того же геокриологического стационара.

В табл. 1 приведена оценка пространственных вариаций трендов изменений температуры грунтов для ряда экспериментальных площадок нескольких стационаров [Павлов и др., 2002, 2007; Скачков и др., 2005, 2007; Оберман, 2006, 2007; Малкова, 2007; Васильев и др., 2008]. Соотношение между максимальными и минимальными трендами изменений температуры грунтов в пределах стационара может достигать 8–10-кратных значений. Поэтому при организации экспериментальных площадок необходимо охватить не только доминантный тип природных комплексов, но и все разнообразие ландшафтных условий, характерное для этого места. В результате осреднения данных были получены значения локальных трендов современных изменений температуры грунтов для всех наблюдательных объектов.

При разработке карт вычислялись осредненные линейные тренды изменений среднегодовых значений температуры воздуха ($\alpha_{ТВ}$) и грунтов ($\alpha_{ТГ}$) для отдельных точек наблюдений (метеостанций и стационаров), а в ряде случаев и для нескольких близкорасположенных пунктов (например, для Якутской группы объектов – Якутск,

Таблица 1. Площадные вариации годовых линейных трендов изменений температуры грунтов на глубине 5–10 м за 1970–2005 гг. на ряде наблюдательных объектов мониторинга криолитозоны России

Объект мониторинга	Значения тренда, 10 ⁻² °С/год			Источник
	макс.	мин.	сред.	
Стационар Болванский	2,0	0,3	1,0	[Малкова, 2007]
Воркутинский полигон	3,0	2,4	2,7	[Оберман, 2006, 2007]
Стационар Марре-Сале	4,6	0,3	2,5	[Павлов и др., 2007; Васильев и др., 2008; Павлов, 2008a]
Стационар Надым	3,4	0,5	1,9	[Павлов и др., 2002; Васильев и др., 2008]
Стационар Чабыда	5,4	-0,8	2,3	[Скачков и др., 2005, 2007]

Чабыда, Чурапча, Намцы, Ытык-Кель). Вычисления показали, что преобладающая часть локальных трендов современных изменений температуры грунтов на севере России не выходила за пределы 0,004–0,05 °С/год (за исключением метеостанции Амга, где тренд оказался даже отрицательным, в связи с чем данные не использовались в расчетах и подлежат проверке). Наибольшие локальные тренды повышений температуры грунтов (до 0,05 °С/год) в целом отмечаются для условий севера Западной Сибири, Центральной Якутии и Красноярского края. Однако в этих регионах, несмотря на сильное потепление климата, криолитозона сохраняет высокую устойчивость в отношении стабильности термических показателей грунтов. Наименьшие локальные тренды изменений температуры грунтов характерны для Европейского Севера и Северо-Востока (0,008–0,021 °С/год). Расширение в данной статье по сравнению с работой А.В. Павлова [2008б] объема использованной информации позволило уточнить средние региональные значения температурных трендов (табл. 2). Уточнения в основном касаются Европейского Севера и севера Западной Сибири (в меньшей мере северо-востока России), где тренды несколько возросли. Осредненное для севера России в целом значение тренда температуры грунтов составило 0,03 °С/год при тренде температуры воздуха 0,044 °С/год.

Таблица 2. Уточненные региональные значения годовых линейных трендов изменений температуры грунтов за 1965–2003 (2005) гг. на севере России

Регион	Значение тренда, 10 ⁻² °С / год	
	уточненное	из работы [Павлов, 2008б]
Европейский Север	2,4	1,8
Север Западной Сибири	3,1	2,5
Средняя Сибирь	2,5	2,5
Якутия	3,3	3,3
Юг Сибири	2,2	2,2
Прибайкалье, Забайкалье	3,4	3,4
Северо-Восток	2,4	2,2
Север России	3,0	2,7

Соотношение между локальными трендами изменений температуры грунтов и воздуха, т. е. коэффициент K_α ($K_\alpha = \alpha_{\text{гт}}/\alpha_{\text{ТВ}}$), характеризующее чувствительность криолитозоны к изменениям климата, варьирует для севера России в очень широких пределах (от 0,1 до 1,19), а в среднем для всей криолитозоны составляет 0,68 (около 2/3). На формирование отклика криолитозоны на изменения климата значительное влияние оказывают ландшафтные условия, но механизм этого влияния не совсем выяснен в количественном отношении. Решение этой проблемы позволит проводить адекватное моделирование изменений термического состояния грунтов для широкого спектра природных комплексов.

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ КАРТ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ТРЕНДЫ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ГРУНТОВ

Ранее была разработана серия мелкомасштабных карт трендов изменений среднегодовой температуры воздуха на севере России за периоды 1965–2000 гг. [Павлов, Малкова, 2005] и 1965–2005 гг. [Павлов, Малкова, 2008]. Сопоставление этих двух карт позволило выявить большую изменчивость данного климатического показателя как в пространстве, так и во времени. Последняя карта (тренды за 1965–2005 гг.) показывает отсутствие широтной и субмеридиональной направленности изолиний изменения среднегодовой температуры воздуха ($t_{\text{вз}}$). Современные изменения линейных трендов $t_{\text{вз}}$ на территории криолитозоны России в основном не выходят за пределы 0,03–0,07 °С/год. Очаги минимальных трендов изменения $t_{\text{вз}}$ сконцентрированы в устье р. Лены (Тикси), в Туруханском районе и к востоку от Печорской низменности (Амдерма). Максимальные тренды современных изменений $t_{\text{вз}}$ зафиксированы на юге Западной и Восточной Сибири, а также на Лено-Алданском междуречье. Дальнейший анализ изменчивости среднегодовой температуры грунтов проводился в сопоставлении с трендами изменения среднегодовой температуры воздуха,

показанными на базовой карте [Павлов, Малкова, 2008], дополненной несколькими метеопунктами и незначительно видоизмененной для наглядности. На разработанной карте (рис. 1) тренды изменения среднегодовой температуры воздуха отображаются площадной заливкой разного оттенка серого цвета с интервалами: менее 0,03; 0,03–0,05, более 0,05 °С/год.

Карта трендов современных изменений температуры грунтов на севере России (см. рис. 1) была разработана на основе методики, ранее использованной при картографировании многолетних изменений ряда климатических параметров [Павлов, Малкова, 2005; Мельников и др., 2007; Павлов и др., 2007]. Для построения изолиний применялось специальное приложение к ГИС-пакету ГеоГраф1.5 – программа ГеоФит, которая позволяет при заданных координатах точек и значениях в них искомой величины осуществить автоматическое проведение изолиний с любым выбранным шагом. Основой программы ГеоФит является метод

обратных расстояний (Inverse Distance to a Power) с заданным сглаживающим параметром. Это высокоточный метод интерполяции, устойчивый при любой степени неоднородности структуры исходной сети и обеспечивающий равномерное приближение в исходных узлах с любой наперед заданной или определенной автоматически точностью.

При картографировании климатических изменений в качестве информационной основы были использованы данные метеорологических наблюдений (опорные точки) примерно по 100 метеостанциям. При картографическом обобщении данных по трендам изменения температуры грунтов пришлось столкнуться с рядом трудностей. Во-первых, уменьшилось число расчетных точек (было отобрано только 65 пунктов – метеостанций и геокриологических стационаров). Во-вторых, из 65 точек наблюдений за температурой грунтов на долю мониторинга криолитозоны, где изучались тренды температуры для широкого спектра ландшафтных условий, приходится всего восемь пунк-

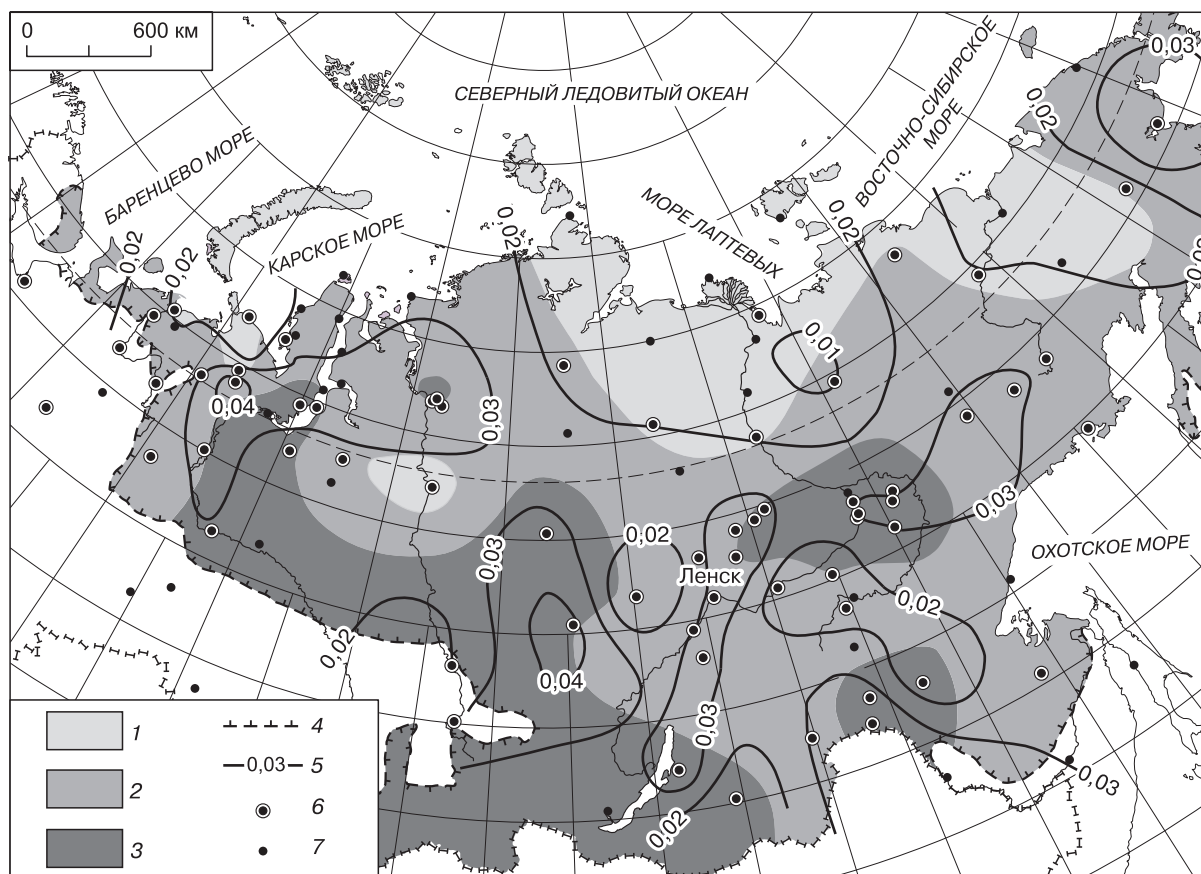


Рис. 1. Карта линейных трендов изменений среднегодовой температуры грунтов (за 1965–2005 гг.) на севере России.

1–3 – тренды повышения среднегодовой температуры воздуха, °С/год (1 – менее 0,03, 2 – 0,03–0,05, 3 – более 0,05); 4 – южная граница криолитозоны; 5 – изолинии тренда изменений среднегодовой температуры грунтов и их значения, °С/год; 6, 7 – метеостанции и стационары, на которых ведутся наблюдения за температурой воздуха и грунтов (6) и за температурой воздуха (7).

тов (геокриологических стационаров). В-третьих, ряды наблюдений на объектах мониторинга криолитозоны в целом короче, чем на метеостанциях.

Тренды изменения температуры грунтов варьируют в пределах от 0,004 до 0,05 °С/год и отображены на карте с помощью изолиний, проведенных через 0,01 °С/год. Особо следует отметить преимущественное совпадение областей минимальных или максимальных трендов климатического потепления и потепления грунтов. Минимальные тренды изменения температуры воздуха и грунтов характерны для Европейского Севера, севера Средней Сибири и Колымской низменности. Совпадение высоких трендов потепления воздуха и грунтов наблюдается в центральной части Западной Сибири, в Якутии, на юге Красноярского края. В то же время наблюдаются обширные области (юг Западной Сибири, Забайкалье, Приамурье), где на фоне высоких трендов потепления климата не происходит синхронного повышения температуры грунтов. Это, очевидно, можно объ-

яснить тем обстоятельством, что на данных территориях развиты высокотемпературные (с температурой, близкой к 0 °С) многолетнемерзлые грунты и большое количество поступающего от Солнца тепла расходуется на фазовые переходы в грунтах. Это области островной криолитозоны, где при современном потеплении климата происходит постепенное оттаивание пород сверху и сокращение площадей островов мерзлоты.

Карта наглядно показывает, что в целом для территории криолитозоны России характерны более низкие современные тренды повышения среднегодовой температуры грунтов по сравнению с трендами потепления климата.

Соотношение между трендами современных изменений среднегодовой температуры грунтов ($\alpha_{гр}$) и воздуха ($\alpha_{ТВ}$) ранее было выражено через безразмерный коэффициент K_{α} . Характер пространственных вариаций данного коэффициента отображает карта, представленная на рис. 2, также построенная с использованием изолиний поверх

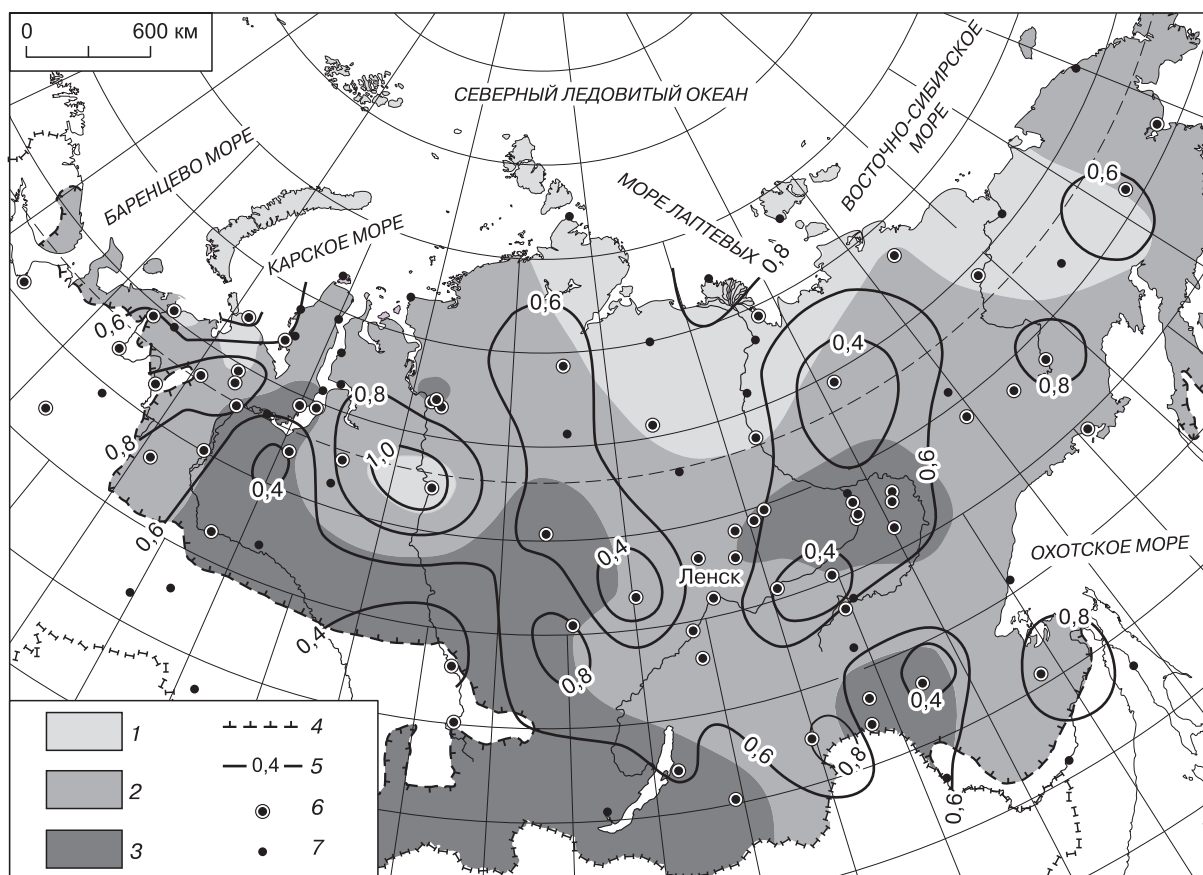


Рис. 2. Карта отношений между трендами средней годовой температуры грунтов и температуры воздуха.

1–3 – тренды повышения среднегодовой температуры воздуха, °С/год (1 – менее 0,03, 2 – 0,03–0,05, 3 – более 0,05); 4 – южная граница криолитозоны; 5 – изолинии относительного коэффициента K_{α} и их значения; 6, 7 – метеостанции и стационары, на которых ведутся наблюдения за температурой воздуха и грунтов (6) и за температурой воздуха (7).

базового слоя трендов изменений среднегодовой температуры воздуха. На рис. 2 видно, что темпы повышения температуры грунтов существенно отстают от темпов потепления климата. Только на локальном участке вблизи Туруханска темпы повышения температуры грунтов сравнимы с изменениями среднегодовой температуры воздуха, причины такого явления пока не выяснены.

В ряде регионов коэффициент K_α понижается до 0,4 и ниже. Сюда относятся территории Югорского п-ова, юга Западной Сибири, Якутии, Приамурья. Во всех случаях низкие значения коэффициента K_α определяются локальными условиями конкретной территории. Одна из причин объяснена ранее (увеличение количества тепла на фазовые переходы при оттаивании пород). Вследствие этого низкие значения коэффициента ($K_\alpha = 0,4$ и ниже) наблюдаются на юге Западной Сибири и в Приамурье. Медленные темпы потепления пород в Якутии на фоне высоких трендов потепления климата (и соответственно низкие значения K_α) объясняются снижением высоты снежного покрова в данном регионе [Скачков и др., 2005].

ВЫВОДЫ

1. Интенсивное потепление климата, начавшееся во второй половине 1960-х–начале 1970-х гг., не было постоянным на всем севере России. В последние 18–20 лет на значительном числе метеостанций стали наблюдать слабые изменения климата, приостановку потепления и даже его похолодание. Современные изменения климата привели к формированию тенденций к повышению температуры грунтов на Севере.

2. Комплексный анализ данных метеостанций и геокриологических стационаров позволяет получить наиболее эффективные оценки трендов изменений температуры грунтов. Согласно этим оценкам, для севера России возможные изменения трендов температуры грунтов охватывают широкий диапазон – от 0,004 до 0,05 °C/год (средние для всего региона значения тренда составляют 0,03 °C/год).

3. Отмечается преимущественное совпадение областей как максимальных, так и минимальных трендов климатического потепления и потепления грунтов. Высокие тренды потепления грунтов, так же как и воздуха, наблюдаются в центральной части Западной Сибири, в Якутии и на юге Красноярского края. Минимальные тренды изменения температуры воздуха и грунтов характерны для Европейского Севера, севера Средней Сибири и Колымской низменности.

4. В районах с высокотемпературными многолетнемерзлыми грунтами (юг Западной Сибири, Забайкалье, Приамурье) сильное потепление кли-

мата не приводит к синхронному формированию высоких трендов изменений среднегодовой температуры грунтов вследствие значительных затрат тепла на фазовые переходы при оттаивании.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 08-05-00421-а, 09-05-10030-к), в рамках интеграционных программ ИКЗ СО РАН за 2009 г.

Литература

- Анисимов О.А., Нельсон Ф.Э., Павлов А.В. Прогнозные сценарии эволюции криолитозоны при глобальных изменениях климата в XXI веке // Криосфера Земли, 1999, т. III, № 4, с. 15–25.
- Васильев А.А., Дроздов Д.С., Москаленко Н.Г. Динамика температуры многолетнемерзлых пород Западной Сибири в связи с изменениями климата // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 2, с. 10–18.
- Васильев И.С. Реакция термического режима почвогрунтов Якутии на современные изменения климата // Метеорология и гидрология, 1999, № 1, с. 98–104.
- Гиличинский Д.А., Быховец С.С., Сороковиков В.А. и др. Использование данных метеорологических станций для оценки тенденций многолетних изменений температуры почв на территории сезонной и многолетней криолитозоны России // Криосфера Земли, 2000, т. IV, № 3, с. 59–66.
- Дучков А.Д., Соколова Л.С., Павлов А.В. Оценка современных изменений температуры воздуха и грунтов в Западной Сибири // Криосфера Земли, 2000, т. IV, № 1, с. 51–58.
- Израэль Ю.А., Павлов А.В., Анохин Ю.А. Эволюция криолитозоны при современных изменениях глобального климата // Метеорология и гидрология, 2002, № 1, с. 10–18.
- Израэль Ю.А., Павлов А.В., Анохин Ю.А. и др. Статистические оценки изменения элементов климата в районах вечной мерзлоты на территории Российской Федерации // Метеорология и гидрология, 2006, № 5, с. 27–38.
- Кондратьев К.Я. Неопределенности данных наблюдений и численного моделирования климата // Всемирная конф. по изменению климата (Москва, 29 сент.–3 окт. 2003 г.): Труды. М., МГУ, 2004, с. 196–215.
- Малкова Г.В. Обобщение результатов температурных измерений на геокриологическом стационаре Болванский // Материалы Междунар. конф. “Криогенные ресурсы полярных регионов”. Салехард, 2007, т. I, с. 140–143.
- Мельников В.П., Павлов А.В. Изменение климата на севере России и геоэкологические последствия // Возможные предотвращающие изменения климата и его негативные последствия. Проблемы Киотского протокола: Материалы Совета-семинара при Президенте РАН. М., Наука, 2006, с. 341–352.
- Мельников В.П., Павлов А.В., Малкова Г.В. Геокриологические последствия современных изменений глобального климата // География и природ. ресурсы, 2007, № 3, с. 19–26.
- Надеждина Е.Д., Школьник И.М., Павлова Т.В. и др. Реакция вечной мерзлоты на потепление климата: оценки с помощью региональной климатической модели // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 3, с. 3–11.
- Оберман Н.Г. Многолетние тенденции естественной эволюции криолитозоны Европейского северо-востока // Материалы Междунар. конф. “Теория и практика оценки состояния криосферы Земли и прогноз ее изменений”. Тюмень, 2006, т. I, с. 93–101.

- Оберман Н.Г.** Некоторые особенности современной деградации криолитозоны Печоро-Уральского региона // Материалы Междунар. конф. "Криогенные ресурсы полярных регионов". Салехард, 2007, т. I, с. 96–99.
- Павлов А.В.** Мерзлотно-климатические изменения на севере России: наблюдения, прогноз // Изв. РАН. Сер. геогр., 2003, № 6, с. 39–50.
- 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., Дроздов Д.С. и др.** Мониторинг сезонноталого слоя и температуры мерзлого грунта на севере России // Криосфера Земли, 2002, т. VI, № 4, с. 30–39.
- Павлов А.В., Малкова Г.В.** Современные изменения климата на севере России. Альбом мелкомасштабных карт. Новосибирск, Акад. изд-во "Гео", 2005, 54 с.
- Павлов А.В., Малкова Г.В.** Изменения климата в 1965–2005 гг. на севере России и геофизиологические последствия // Материалы Междунар. конф. "Криогенные ресурсы полярных и горных регионов". Тюмень, 2008, с. 263–266.
- Павлов А.В., Малкова Г.В., Скачков Ю.Б.** Современные тенденции в эволюции термического состояния криолитозоны при изменениях климата // Материалы Междунар. конф. "Криогенные ресурсы полярных регионов". Салехард, 2007, т. I, с. 34–38.
- Рузанов В.Т.** Геофизиологический стационар Дионисия (Чукотка): результаты 20-летнего мониторинга температуры и сезонного протаивания грунтов // Материалы Междунар. конф. "Криогенные ресурсы полярных и горных регионов". Тюмень, 2008, с. 269–271.
- Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н., Варламов С.П.** Влияние современных изменений климата на многолетнемерзлые породы Центральной Якутии // Материалы Третьей конф. геофизиологов 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) // Материалы Междунар. конф. "Криогенные ресурсы полярных регионов". Салехард, 2007, т. I, с. 167–170.
- Чудинова С.М., Быховец С.С., Сороковиков В.А. и др.** Особенности изменения температуры почв России в период последнего потепления климата // Криосфера Земли, 2003, т. VII, № 3, с. 23–30.

*Поступила в редакцию
12 марта 2009 г.*