

ТРЕНДЫ СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЧВЫ НА СЕВЕРЕ РОССИИ

А.В. Павлов

Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия, kriozem@gmail.com

Данные метеорологических станций и геокриологических стационаров широко используются при составлении оценок и прогнозов современной эволюции криолитозоны. Рассмотрены методы мерзлотно-климатического мониторинга температуры почв и пород. Наибольшие термические изменения в мерзлых породах происходят при однонаправленных повышении температуры воздуха и высоты снежного покрова. Для крупных северных регионов установлены региональные тренды температуры почвы в сравнении с трендами температуры воздуха. На основе трендовых оценок дан прогноз ожидаемых в XXI в. изменений климата и температуры почвы в арктических условиях.

Статью в целом следует рассматривать как систематизацию сведений и развитие представлений о формировании трендов изменений температуры верхних горизонтов криолитозоны в период современного потепления климата.

Климат, криолитозона, многолетние изменения, мониторинг, температура воздуха, температура почвы, тренд

TRENDS OF CONTEMPORARY CHANGES OF SOIL TEMPERATURE IN NORTHERN RUSSIA

A.V. Pavlov

Earth Cryosphere Institute SB RAS, 625000, Tyumen, P/O box 1230, Russia, kriozem@gmail.com

The data of meteorological and geocryological stations are widely used for making evaluations and forecasting of contemporary permafrost evolution. The methods of permafrost-climatic monitoring of temperature soils and rocks are considered. The largest thermal changes in permafrost occur under unidirectional increasing of air temperature and depth of snow cover. Regional trends of soil temperature compared with air temperature trends are established for large northern regions. The forecast of the expected changes of climate and of soil temperatures in northern Russia is given for XXI century on the basis of trend evaluations.

Overall, the article ought to be regarded as the systematization of information and the development of concepts about formation of the trends of temperature changes of permafrost upper horizons in the period of contemporary climate warming.

Climate, permafrost, perennial changes, monitoring, air temperature, soil temperature, trend

1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАССИВА ДАННЫХ О ТЕРМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ ПОЧВЫ НА СЕВЕРЕ РОССИИ

Информационной основой для выполнения оценок и прогноза изменений термического состояния почв и горных пород на Севере являются, в первую очередь, данные режимных геокриологических исследований. Их становление началось в период проведения III Международного геофизического года (1957/59). В 1960–1980-х гг. изучение режима геокриологических условий получило в России широкое региональное развитие в связи с открытием и разработкой ряда крупнейших месторождений полезных ископаемых на Севере и его общим освоением. Наиболее рациональной формой организации исследований явились геокриологические стационары, в структурном отношении напоминающие метеорологические станции. На каждом из стационаров оборудовали обычно по 5–10 и более наблюдательных площадок, включая фоновые и техногенные, и по 5–30 термометрических скважин глубиной 10–20 м [Павлов, 1975]. На

ряду стационаров изучаемая глубина достигала 80–100 м. Унифицированную систему наблюдений за состоянием криолитозоны – оценку, контроль и прогноз ее изменений под воздействием природно-климатических и техногенных факторов – стали определять как мониторинг криолитозоны (МКР) [Павлов, 1996]. В 1990-х гг. в связи с перестройкой организационных форм различных хозяйственных отраслей страны большая часть информационных объектов МКР не получила финансирования и была закрыта (или законсервирована). Усилиями ряда организаций и отдельных специалистов удалось сохранить лишь единичные наблюдательные объекты. Из достаточно разветвленной наблюдательной сети МКР [Павлов, Малкова, 2005] к настоящему времени сохранилось всего 12–15 полигонов, стационаров и режимных участков (Воркутинский мерзлотный полигон, стационары Болванский, Марре-Сале, Надым, Чабыда и др.)

Таблица 1. Общая характеристика долговременных информационных объектов мониторинга криолитозоны на территории России

Объект мониторинга	Местоположение	Температура воздуха*, °С	Природная зона	Тип мерзлоты	Глубина температурных скважин, м	Годы наблюдений
<i>Европейский Север</i>						
Стационар Болванский	Мыс Болванский, устье Печоры	-4,7	Южная тундра	Сплошная	10–20	1984–2007
Воркутинский мерзлотный полигон	В 35 км от Воркуты	-6,5	То же	То же	10–20	1970–2007
<i>Север Западной Сибири</i>						
Стационар Марре-Сале	Западный Ямал	-8,0	Северная тундра	Сплошная	10–12, до 100 м	1978–2007
Стационар Надым	В 30 км от Надыма	-5,9	Северная тайга	Островная	10–12	1972–2007
Участок Хадутте	Уренгойское месторождение	-7,5	Южная тундра	Сплошная	10–12	1974–2007
Участок Таб-Яха	Там же	-7,5	Северная лесотундра	То же	10	1975–2007
Участок УКПГ-5	Там же	-7,5	Южная лесотундра	Прерывистая	10	1975–2007
<i>Центральная Якутия</i>						
Стационар Якутский	Якутск	-10,2	Северная тайга	Сплошная	10–20	1963–1979, 1995–2007
Стационар Чабыда	В 20 км от Якутска	-10,2	То же	Прерывистая	10–20	1980–2007
Группа скважин в Центральной Якутии	Правобережье р. Лены (на широте Якутска)	-10,2	»	Сплошная	10–20	1987–2007
Режимные участки Кардуген, Рожа	Центральная Якутия	–	»	То же	До 10 м	1980–2007
Наблюдательные скважины в районе Тынды	Амурская область	–	Светлохвойные горные леса	»	До 60 м	1975–2001

* Среднегодовые значения за многолетний период.

(табл. 1). Большая часть этих наблюдательных объектов непрерывно функционирует на протяжении 25–35 и более лет, что в ряде случаев оказывается достаточным для выполнения ретроспективных оценок и прогнозов ожидаемых изменений термического состояния криолитозоны [Павлов, Гравис, 2000; Павлов и др., 2002; Павлов, 2003; Оберман, 2006, 2007; Малкова, 2007; Скачков и др., 2007].

Проведение режимных наблюдений в системе мониторинга криолитозоны, как геоинформационной системе изучения северных регионов, характеризуется следующими преимуществами: 1) использование, как правило, высокочувствительных электрических датчиков и дистанционных методов измерений; 2) высокая достоверность и точность получаемых данных (0,1 °С в отношении температуры грунтов) и значительная глубина (до нескольких десятков метров) изучения; 3) тесная увязка динамики геоэкологических показателей с изменениями во времени комплекса ландшафтных условий; 4) учет влияния ожидаемых техногенных воздействий при организации и проведении экспериментов [Павлов, 1975, 1996]. К сожалению, накопленный за ряд лет большой массив данных по МКР хранится в основном на бумажных носителях (полевые дневники, журналы, тетради, публикации). Только начиная с 1990–1995 гг. в России началось внедрение компьютерных технологий для

сбора и обработки режимных геоэкологических данных.

Для оценки термических изменений в криолитозоне используют также данные метеорологических станций по измерению температуры почвы (до глубины 1,6–3,2 м) [Димо, 1972; Шкадова, 1979; Васильев, 1999; Гилчичинский и др., 2000; Дучков и др., 2000; Чудинова и др., 2001; Израэль и др., 2002]. Массовые наблюдения за температурой почвы на метеостанциях начались в России в 1930–1950-х гг. Наибольший объем наблюдений за температурой почвы в условиях сплошной криолитозоны выполнен на метеостанциях Якутии и Северо-Востока, прерывистой криолитозоны – на метеостанциях средней части Западной Сибири, Забайкалья и Приамурья. Основные преимущества получаемой информации: 1) широкий и относительно равномерный охват наблюдениями всей территории криолитозоны; 2) наличие длительных рядов наблюдений (до векового периода времени), полученных с соблюдением единой методики выполнения работ.

Отмеченные достоинства изучения температуры почвы на метеорологических станциях, к сожалению, нередко перекрываются их недостатками [Павлов, 1975, 2006]. Большое число факторов способствует возникновению неоднородностей в рядах наблюдений. К ним относятся: перенос площадки наблюдений в сторону (даже на несколько метров),

изменения в отложении снега в пределах площадки наблюдений, наличие систематических погрешностей измерений при использовании почвенно-вытяжных термометров в обсадных трубах. Как показывают анализ и тестирование данных, среднегодовая температура почвы, полученная по результатам срочных наблюдений на северных метеостанциях, нередко оказывается завышенной по сравнению с данными более точных измерений. Имеются также общие причины, приводящие к возникновению погрешностей измерений температуры почвы как на геокриологических стационарах, так и на метеостанциях: локальные нарушения растительности и микрорельефа на площадке наблюдений, повышение уровня грунтовых вод и развитие заболоченности, возникновение техногенно обусловленной засоленности почвы.

Таким образом, основной массив данных о температурном режиме почвы и подстилающих пород на территории криолитозоны России является в зависимости от методов наблюдений достаточно разнородным, и для соблюдения достоверности результатов исследований требуются адекватные методы систематизации и анализа. Не следует противопоставлять результаты наблюдений за температурой почвы на метеорологических станциях и на геокриологических стационарах. Наоборот, наблюдения на стационарах позволяют вскрыть, объяснить и учесть недостатки измерений температуры почвы на метеостанциях. Вероятно, погрешностями измерений можно объяснить и тот факт, что на одной и той же метеостанции в ограниченном диапазоне глубин (0,4–3,2 м) фиксируются разнонаправленные тренды изменений температуры почвы. Эти тренды могут характеризоваться разной статистической значимостью. Как показали оценки, достоверность линейных трендов изменений температуры почвы возрастает с глубиной [Чудинова и др., 2003], поэтому для стационаров, на которых глубина изучения больше, она может быть выше, чем для метеостанций.

Среднегодовая температура почвы не всегда адекватно реагирует на современное потепление климата. Так, на территории геокриологического стационара Чабыда (20 км от Якутска), несмотря на заметное повышение средней годовой температуры воздуха в 1987–2005 гг., в целом не отмечалось возрастания температуры почвы, наблюдалось даже ее понижение [Скачков и др., 2007]. Это было обусловлено в основном снижением высоты снежного покрова, которое отмечалось в Центральной Якутии с начала 1980-х до конца 1990-х гг. Особенно заметно происходит уменьшение высоты снежного покрова в первой половине зимы (ноябрь, декабрь). Таким образом, в районе стационара Чабыда за последние 20–25 лет тепляющее влияние снежного покрова на термическое состояние пород существенно уменьшилось, особенно в первой по-

ловине зимы. На большей части территории криолитозоны снежный покров и температура воздуха в комплексе являются чувствительными индикаторами современных изменений температуры пород. Наиболее тесная корреляция между температурой воздуха и пород отмечается в районах с высокой плотностью снежного покрова, особенно в тундре.

В ряде регионов севера России отчетливо выражена тенденция к потеплению мерзлых грунтов за период с конца 1970-х до второй половины 1990-х гг. Так, на стационаре Марре-Сале (Западный Ямал) прослеживается заметное повышение среднегодовой температуры грунтов на глубине 10 м за 1978–1995 гг., которое в различных ландшафтных условиях оценивается за рассматриваемый период в 0,1–1,0 °С. Наибольшие термические изменения в мерзлых грунтах следует ожидать для однонаправленных повышений температуры воздуха и высоты снежного покрова.

2. МЕТОДЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ

В системе МКР для удобства проведения автоматизированной статистической обработки результатов наблюдений данные по каждому информационному объекту (геокриологический стационар, метеорологическая станция) представлялись в формате Excel. Выполнялось сглаживание (с 5- и 10-летним интервалом) временных рядов наблюдений. При оценке современных изменений климата и термического состояния верхних горизонтов криолитозоны использовался корреляционный и регрессионный анализ. В последние годы получили также развитие создание мелкомасштабных карт, характеризующих пространственно-временные изменения климата и криолитозоны [Павлов, Малкова, 2005], и разработка прогнозных сценариев ожидаемых мерзлотно-климатических изменений в XXI в. [Павлов, 1996, 2003; Павлов и др., 2002, 2007; Мельников, Павлов, 2006].

Большой объем работ по сбору, систематизации и анализу метеорологических данных для оценки изменений температуры почвы в условиях меняющегося климата выполняется в Институте мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Институте физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Институте глобального климата и экологии и других организациях [Гиличинский и др., 2000; Чудинова и др., 2001, 2003; Варламов и др., 2002; Израэль и др., 2002; Скачков и др., 2007]. В ряде работ Ю.А. Израэля с соавт. [2006, 2007] проведен анализ изменений метеорологических элементов по ряду северных метеостанций за 1961–2003 гг. К сожалению, обычно рассматривают укороченные ряды наблюдений, не охватывающие весь период современного потепления климата, в частности последние годы, когда заметно потепление приостановилось. Так, в работах И.С. Васильева [1999], Д.А. Гиличинского с соавт. [2000],

С.М. Чудиновой с соавт. [2001, 2003] анализ данных наблюдений ограничен 1987–1990 гг. Естественные многолетние изменения метеорологических параметров и их тренды, особенно наибольшей высоты снежного покрова, оказываются во многих случаях статистически незначимыми. Таким образом, при оценках и прогнозах не всегда используется достаточно корректная информация. Достоверность информации обычно увеличивается при переходе от локальных оценок к региональным. Наиболее эффективной оценки изменений термического состояния верхних горизонтов криолитозоны можно ожидать при рассмотрении взаимодополняющих данных о температуре почв и пород, полученных как на метеостанциях, так и на гео-криологических стационарах.

Изучение трендов изменения среднегодовой температуры почвы ($\alpha_{\text{ти}}$) в сравнении с трендами средней годовой температуры воздуха ($\alpha_{\text{тв}}$) проведено по данным 34 метеорологических станций* в основном за 1961–2003 (2005) гг. и по данным семи гео-криологических стационаров (1970–2005 гг.). Данные метеорологических станций отбирались на глубинах 1,6 м, а гео-криологических стационаров – на 10 м. Оценка современной динамики климата и криолитозоны проведена с помощью коэффициентов линейных трендов изменений среднегодовых значений температуры воздуха ($\alpha_{\text{тв}}$) и почвы ($\alpha_{\text{ти}}$) и соотношения между ними $K_{\alpha} = \alpha_{\text{ти}}/\alpha_{\text{тв}}$. Это соотношение позволяет рассчитывать тренды температуры почвы исходя из трендов температуры воздуха, которые намного лучше изучены. Данные, когда K_{α} меньше 0,25 и больше 1,25, считались недостоверными и не учитывались в последующем анализе. Ретроспективный анализ данных МКР показал, что значение K_{α} можно ориентировочно принять равным 0,8 для низкотемпературной (тундровой) криолитозоны Западной Сибири, 0,7 для лесотундры и 0,6 для районов высокотемпературной криолитозоны региона (тайга) [Павлов, 2003].

3. ОЦЕНКА РЕГИОНАЛЬНЫХ ТРЕНДОВ СРЕДНЕГОДОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЧВЫ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА

Сведения о современных повышениях среднегодовой температуры воздуха и трендов ее повышений на севере России по состоянию на 2000–2005 гг. приведены в ряде публикаций [Израэль и др., 2006, 2007; Мельников и др., 2007; Павлов и др., 2007]. Метеорологические наблюдения отчетливо свидетельствуют, что современное потепление климата в Северном полушарии началось преимущественно во второй половине 1960-х – середине 1970-х гг. Наибольшая скорость потепления приходится на 1980-е гг. Тенденции к потеплению клима-

та и эволюции криолитозоны отмечались почти повсеместно, но проявлялись с разной интенсивностью. В частности, в арктических районах потепление климата было выражено достаточно слабо. Повышение температуры воздуха за 1965–1995 гг. на территории севера России в целом составило 1,1–1,2 °С (в отдельных пунктах более 2 °С), тогда как повышение глобально осредненной температуры составило 0,5–0,6 °С [Павлов и др., 2007]. Во второй половине 1990-х гг. темпы потепления климата снизились, на Европейском Севере отмечена даже тенденция к некоторому понижению температуры воздуха, тогда как в районах криолитозоны с континентальным климатом (Центральная Якутия, Забайкалье и др.) потепление продолжалось. Общая тенденция возрастания с 1960–1970-х гг. среднегодовых температур воздуха сохранилась и в начале XXI в. Температура воздуха в 2001–2005 гг. повысилась в отдельных пунктах на Европейском Севере и севере Западной Сибири, но не более чем на 0,3–0,4 °С. В среднем по всему северу России потепление климата оценивается за 2001–2005 гг. как очень слабое (около +0,1 °С за пять лет). Наибольшие региональные тренды повышения среднегодовой температуры воздуха за 1965–2003 (2005) гг. характерны для Средней Сибири, Якутии, Южной Сибири, Прибайкалья и Забайкалья (0,042–0,046 °С/год) [Павлов и др., 2007].

Изменение среднегодовой температуры почвы в 1961–1995-х гг. в основном соответствовало изменению среднегодовой температуры воздуха. В 1961–2005 гг. на всей территории криолитозоны отмечались положительные тренды как температуры воздуха, так и почвы. Пространственная изменчивость трендов температуры почвы определяется не только соответствующей изменчивостью климатических факторов, но и различным составом почвы на объектах наблюдений. Наибольшие локальные тренды повышений температуры почвы за 1961–2005 гг. (0,035–0,060 °С/год) отмечаются для условий севера Западной Сибири и Центральной Якутии. Однако в этих регионах, несмотря на сильное потепление климата, криолитозона сохраняет высокую устойчивость в отношении стабильности термических показателей грунтов. Наименьшие локальные тренды температуры почвы характерны для Европейского Севера и Северо-Востока (0,008–0,032 °С/год).

Дальнейшая систематизация информации о трендах температуры почвы проведена по семи крупным физико-географическим регионам (Европейский Север, север Западной Сибири, Средняя Сибирь, Якутия, Южная Сибирь, Прибайкалье и Забайкалье, Северо-Восток) с числом объектов наблюдений в каждом из них от 3 до 10. Осредненные данные по регионам позволяет уменьшить по-

* Данные по шести метеостанциям из 40 были отбракованы в результате экспертной оценки и не учитывались в анализе.

Таблица 2. Годовые линейные тренды температуры воздуха ($\alpha_{\text{ТВ}}$) и температуры почвы ($\alpha_{\text{ТП}}$) за 1961–2003 (2005) гг. на севере России по данным мониторинга климата и криолитозоны

Регион	Число пунктов наблюдений	Повышение $T_{\text{в}}$ за 1965–2005 гг.	Тренды $T_{\text{в}}$, $T_{\text{п}}$, $10^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ /год		$K_{\alpha} = \alpha_{\text{ТП}}/\alpha_{\text{ТВ}}$
			$\alpha_{\text{ТВ}}$	$\alpha_{\text{ТП}}$	
Европейский Север	6	1,2	2,6	1,8	0,69
Север Западной Сибири	6	1,8	4,0	2,5	0,63
Средняя Сибирь	7	1,8	4,5	2,5	0,56
Якутия	10	2,1	4,6	3,3	0,72
Южная Сибирь	4	2,0	4,5	2,2	0,49
Прибайкалье, Забайкалье	3	1,7	4,2	3,4	0,81
Северо-Восток	5	1,7	3,6	2,2	0,61
Весь Север	41	1,8	4,1	2,7	0,66

Примечание. $T_{\text{в}}$, $T_{\text{п}}$ – среднегодовая температура воздуха и почвы соответственно.

грешности наблюдений. В ряде работ [Павлов, Малкова, 2005; Мельников, Павлов, 2006] при оценке современного потепления климата и криолитозоны оказалось целесообразным разграничить Якутию на Северную ($\geq 65^\circ$ с.ш.) и Южную ($< 65^\circ$ с.ш.), а также выделить Дальний Восток, однако имеющихся данных оказалось недостаточно, и число изучаемых регионов пришлось сократить. Наибольшие региональные значения $\alpha_{\text{ТП}}$ определены для Якутии в целом, Прибайкалья и Забайкалья (0,033–0,034 $^\circ\text{C}/\text{год}$) (табл. 2). Для указанных в табл. 2 регионов севера России значение $\alpha_{\text{ТП}}$ изменялось от 0,018 до 0,034 $^\circ\text{C}/\text{год}$, а отношение K_{α} – от 0,49 до 0,81, для Севера в целом оно составило 0,66.

4. ПРОГНОЗ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ПОЧВЫ В АРКТИКЕ В XXI ВЕКЕ

В работе А.В. Павлова с соавт. [2005] приведены результаты прогноза ожидаемых в XXI в. изменений среднегодовой температуры воздуха и почвы, выполненного с использованием трех нетрадиционных моделей: регрессионно-аналитической модели, модели авторетроспективного анализа, инерционно-трендовой модели. Согласно прогнозу, повышение температуры воздуха в условиях Арктики составит в среднем 0,6 $^\circ\text{C}$ в 2025 г., 1,6 $^\circ\text{C}$ в 2050 г. и 2 $^\circ\text{C}$ в 2100 г. В данном прогнозе применена только инерционно-трендовая модель, основанная на экстраполяции современного тренда изменений температуры. Использование в модели продолжительных метеорологических и геокриологических рядов наблюдений дает возможность осуществлять ретроспективные прогнозы мерзлотно-климатических условий в XXI в. вне гипотез генезиса совре-

Таблица 3. Прогнозные значения повышений температуры воздуха и почвы в Арктике в первой половине XXI в.

Годы	Повышение температуры, $^\circ\text{C}$	
	воздуха	почвы
2025	0,6	0,4
2050	1,6	1,0

менных изменений климата (возрастание концентрации парниковых газов в атмосфере, увеличение вулканической активности и др.). В отличие от ранее выполненного прогноза [Павлов и др., 2005], прогноз температуры воздуха с использованием инерционно-трендовой модели проведен здесь только до 2050 г., чтобы сократить упреждение периода с повышениями температуры воздуха и почвы и тем самым уменьшить погрешность моделирования. По результатам прогноза, ожидаемые изменения температуры почвы в 1,5–1,6 раза меньше, чем воздуха (табл. 3), и для арктических условий не превысят 1 $^\circ\text{C}$. В Надымгазпроме принято, что в Ямало-Гыдано-Тазовском нефтегазоносном районе за предстоящие 50 лет (с 2000 г.) может произойти повышение среднегодовой температуры мерзлых пород примерно на 1 $^\circ\text{C}$. Это полностью соответствует полученным в данной статье прогнозным данным.

ВЫВОДЫ

1. На севере России в настоящее время функционирует около полутора десятков информационных объектов термического мониторинга криолитозоны с продолжительностью функционирования 25–35 лет. В совокупности с данными измерений температуры почвы на метеостанциях данные МКР позволяют осуществлять ретроспективные оценки изменений температуры воздуха и почвы (пород). Для повышения точности оценок необходима отработка данных мерзлотно-климатического мониторинга с использованием критериев достоверности.

2. Относительно устойчивым показателем современных мерзлотно-климатических изменений является соотношение между трендами изменений температуры почвы и воздуха.

3. Определены локальные и региональные тренды ожидаемых в XXI в. изменений климата и криолитозоны, позволяющие дать унифицированный прогноз повышений среднегодовой температуры воздуха (на 0,6 $^\circ\text{C}$ в 2025 г. и 1,6 $^\circ\text{C}$ в 2050 г.) и почвы (на 0,4 и 1,0 $^\circ\text{C}$ соответственно) в арктических районах России. Этот прогноз подтверждает правильность предпосылок, принятых в проектно-строительных работах при назначении верхнего граничного условия теплообмена криолитозоны с атмосферой.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (грант № 08-05-00421-а).

Литература

- Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н.** Температурный режим грунтов мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии. Якутск, ИМЗ СО РАН, 2002, 216 с.
- 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.
- Димо В.Н.** Тепловой режим почв СССР. М., Колос, 1972, 360 с.
- 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. 52–59.
- 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.
- Израэль Ю.А., Анохин Ю.А., Мяч Л.Т., Шерстюков А.Б.** Оценка и прогноз возможного изменения элементов климата и состояния вечной мерзлоты на территории Российской Федерации в 21 веке // Междунар. конф. “Криогенные ресурсы полярных регионов”: Материалы. Салехард, 2007, т. I, с. 127–129.
- Малкова Г.В.** Обобщение результатов температурных измерений на геокриологическом стационаре Болванский // Там же, с. 140–143.
- Мельников В.П., Павлов А.В.** Современные изменения климата на Севере и геокриологические последствия // Междунар. конф. “Теория и практика оценки состояния криосферы Земли и прогноз ее изменений”: Материалы. Тюмень, 2006, т. I, с. 37–41.
- Мельников В.П., Павлов А.В., Малкова Г.В.** Геокриологические последствия современных изменений глобального климата // География и природ. ресурсы, 2007, № 3, с. 19–27.
- Оберман Н.Г.** Многолетние тенденции естественной эволюции криолитозоны Европейского северо-востока // Междунар. конф. “Теория и практика оценки состояния криосферы Земли и прогноз ее изменений”: Материалы. Тюмень, 2006, т. I, с. 93–101.
- Оберман Н.Г.** Некоторые особенности современной деградации криолитозоны Печоро-Уральского региона // Междунар. конф. “Криогенные ресурсы полярных регионов”: Материалы. Салехард, 2007, т. I, с. 96–99.
- Павлов А.В.** Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР. Якутск, Кн. изд-во, 1975, 302 с.
- Павлов А.В.** Современное состояние мониторинга криолитозоны России и проблемы его развития // Материалы Первой конф. геокриологов России. М., МГУ, 1996, кн. 3, с. 327–336.
- Павлов А.В.** Мерзлотно-климатические изменения на севере России: наблюдения, прогноз // Изв. РАН. Сер. геогр., 2003, № 6, с. 39–50.
- Павлов А.В.** Оценка погрешностей измерений температуры грунтов в неглубоких скважинах в условиях сплошной криолитозоны // Криосфера Земли, 2006, т. X, № 4, с. 9–13.
- 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., Гравис Г.Ф.** Вечная мерзлота и современный климат // Природа, 2000, № 4, с. 9–18.
- Павлов А.В., Малкова Г.В.** Современные изменения климата на севере России. Альбом мелкомасштабных карт. Новосибирск, Академ. изд-во “Гео”, 2005, 54 с.
- Павлов А.В., Малкова Г.В., Скачков Ю.Б.** Современные тенденции в эволюции термического состояния криолитозоны при изменениях климата // Междунар. конф. “Криогенные ресурсы полярных регионов”: Материалы. Салехард, 2007, т. I, с. 34–38.
- Павлов А.В., Хрусталева Л.Н., Микушина О.В.** Прогноз температуры воздуха и грунтов в связи с оценкой надежности вечномерзлых оснований сооружений // Геоэкология (инженерная геология, гидрогеология, геокриология), 2005, № 3, с. 219–226.
- Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н., Варламов С.П.** Результаты 25-летних мониторинговых исследований криолитозоны на стационаре Чабыда (Центральная Якутия) // Междунар. конф. “Криогенные ресурсы полярных регионов”: Материалы. 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.
- Чудинова С.М., Быховец С.С., Федоров-Давыдов Д.Г. и др.** Реакция температурного режима почв Русского Севера на изменения климата во второй половине XX века // Криосфера Земли, 2001, т. V, № 3, с. 63–70.
- Шкадова А.К.** Температурный режим почв на территории СССР. Л., Гидрометеиздат, 1979, 240 с.

*Поступила в редакцию
3 марта 2008 г.*