

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗ

УДК 551.340: 551.345

МОНИТОРИНГ СЕЗОННОТАЛОГО СЛОЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ  
МЕРЗЛОГО ГРУНТА НА СЕВЕРЕ РОССИИ

А. В. Павлов, Г. В. Ананьева, Д. С. Дроздов, Н. Г. Москаленко, В. А. Дубровин\*,  
Н. Б. Какунов\*\*, Г. П. Минайлов\*\*\*, Ю. Б. Скачков\*\*\*\*, П. Н. Скрябин\*\*\*\*

*Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия*

\* *Всероссийский научно-исследовательский институт гидрогеологии и инженерной геологии МПР, Москва*

\*\* *ОАО „Полярноуралгеология“, 169908, Воркута, ул. Ленина, 64, Россия*

\*\*\* *Тындинская мерзлотная станция МПС, 676080, Амурская обл., Тында-2, а/я 216, Россия*

\*\*\*\* *Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 1, Россия*

Наблюдаемое с 1960-х годов глобальное потепление климата может оказывать заметное влияние на термический режим верхних горизонтов криолитозоны. Анализ режимных геокриологических данных, полученных в основных регионах Севера России, позволил количественно оценить отклик сезонноталого слоя и температуры мерзлых грунтов на современные аномалии климата.

Возрастание сезонноталого слоя на Севере России за последние 20—30 лет выражено слабо и не везде. Намного более чувствительным индикатором современных климатических изменений может служить температура мерзлых грунтов. На Европейском северо-востоке и Севере Западной Сибири отмечено повышение температуры грунтов в 1970-е и 1980-е годы в соответствии с климатическим потеплением. Температура сливающейся криолитозоны в 1978—1995 гг. повышалась на 0,8—1 °С. Климатическое потепление обычно сопровождается уменьшением контрастности в температурной неоднородности мерзлых грунтов.

Не зафиксировано заметных изменений температуры мерзлых грунтов за последние 20—25 лет в северо-западных районах Европейского Севера. В Центральной Якутии, где современное потепление климата является наибольшим (до 2,5 °С), отмечается также высокая устойчивость термического режима верхних горизонтов криолитозоны, что обусловлено возникшей тенденцией к уменьшению высоты снежного покрова, особенно в первой половине зимнего сезона. Начиная с 1996 г. в ряде районов Севера наблюдается тенденция к похолоданию климата и понижению температуры мерзлых грунтов.

*Мерзлый грунт, сезонноталый слой, температура воздуха и грунтов, снежный покров*

MONITORING OF ACTIVE LAYER AND THE TEMPERATURE  
OF FROZEN GROUNDS IN THE NORTH OF RUSSIA

A. V. Pavlov, G. V. Anan'eva, D. S. Drozdov, N. G. Moskalenko, V. A. Dubrovin\*,  
N. B. Kakunov\*\*, G. P. Minailov\*\*\*, Yu. B. Skachkov\*\*\*\*, P. N. Skryabin\*\*\*\*

*Earth Cryosphere Institute, SB RAS, 625000, Tyumen, 1230, Russia*

\* *All-Russian Research Institute for Hydrogeology and Engineering Geology (VSEINGEO), Moscow*

\*\* *OJSC „POLARNOURALGEOLOGIA“, 169908, Vorkuta, Lenina str., 64, Russia*

\*\*\* *Tyndinskaya Permafrost Station MPS, 676080, Tynda-2, 216, Russia*

\*\*\*\* *Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, Merzlotnaya str., 1, Russia*

Global climate warming observed since 1960th can render appreciable influence on the thermal regime of the upper horizons of permafrost zone. Analysis of regime geocryological data obtained in the basic regions of the Russian North, allowed quantitative estimation of the response of the active layer and frozen ground temperatures to temporary anomalies of the climate.

An increase in the active layer in northern Russia during the last 20—30 years is expressed poorly and not everywhere. The frozen ground temperature can serve the most sensitive indicator of temporary climatic changes. In the European northeast and in the north of West Siberia an increase in ground temperature took place in 1970—1980 in accordance with climatic warming. An increase in the temperature of top horizons of merging permafrost zone during 1978—1995 years reached here 0.8—1 °C. Climatic warming is usually accompanied by reduction of contrast in temperature heterogeneity of frozen ground.

No appreciable changes have been registered in frozen ground temperature for the last 20—25 years in the northwest areas of the European North. In Central Yakutia, where contemporary warming of climate is the greatest (up to 2.5 °C), high stability of thermal regime of the top horizons of is also observed permafrost zone. This is caused by the aroused tendency to reduction in the height of snow cover, especially in the first half of winter season. Since 1996, the tendency to cooling of a climate and to lowering of ground temperature has been observed in some of Northern areas.

*Frozen ground, active layer, air and ground temperature, snow cover*

## ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг криолитозоны рассматривается в настоящее время как унифицированная система наблюдений за состоянием геологической среды в условиях Севера; система оценки, контроля и прогноза ее изменений под влиянием природных факторов и техногенеза [Павлов, 2001a]. По существу это мерзлотно-климатический мониторинг, так как одна из его главных задач — выполнение количественных оценок современных и ожидаемых в XXI в. мерзлотно-климатических изменений [Павлов, 1997; Анисимов и др., 1999; Дучков и др., 2000; Израэль и др., 2002].

Основными оценочными показателями многолетних изменений верхних горизонтов криолитозоны, которые обычно рассматриваются как индикаторы современных климатических вариаций, являются слой сезонного протаивания и температура мерзлых грунтов. Вместе с тем тенденции в многолетних изменениях температуры воздуха и термического состояния верхних горизонтов криолитозоны не всегда совпадают во времени, что вызывает необходимость изучения мерзлотно-климатических изменений в едином комплексе. В настоящее время на ряде геокриологических стационаров в России накоплены многолетние ряды наблюдений за термическими показателями верхних горизонтов криолитозоны, которые наряду с метеорологическими показателями широко используются в геокриологическом прогнозировании. Актуальная задача сегодняшнего дня — собрать и сделать доступными для научной общественности имеющиеся в различных организациях и у отдельных лиц данные мониторинга вечной мерзлоты.

Анализ данных стационарных наблюдений, результаты численного моделирования и систематизация разрозненных литературных сведений позволяют оценить тенденции в современных изменениях верхних горизонтов криолитозоны. На Севере Западной Сибири в 1970—1995 гг. отчетливо фиксируется деградация криолитозоны, оцениваемая повышением средней годовой температуры мерзлых грунтов на 0,5—1 °C на глубине 10 м. Наибольшая скорость изменений термического состояния криолитозоны, как и климата, приходится на 1980-е годы. Однако в Центральной Якутии, где современное потепление климата является максимальным по сравнению с другими районами Севера [Павлов, 2002], термическое состояние криолитозоны в настоящее время является достаточно устойчивым. Начиная с середины 1990-х годов в некоторых районах Севера отмечается переход от предшествующего потепления верхних горизонтов криолитозоны к их похолоданию. Основной

целью данной статьи является количественная оценка изменений термического состояния верхних горизонтов криолитозоны в различных районах Севера России при современных климатических изменениях.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ

Изучение режима геокриологических условий получило в России широкое развитие в 1960—1970-х годах в связи с открытием и разработкой месторождений углеводородного сырья на Севере Западной Сибири и Европейском Севере, сельскохозяйственным и промышленным освоением Якутии, строительством Байкало-Амурской железной дороги [Павлов, 1996]. В различных регионах Севера в 1980-е годы функционировало до 30—40 геокриологических стационаров и режимных участков со сроком эксплуатации 3—5 лет и более. В конце 1980-х годов изучение режима геокриологических условий стали определять как мониторинг криолитозоны. Он охватывает изучение водно-теплого режима грунтов, режима подземных вод, развития криогенных геологических процессов, динамики определяющих факторов (снег, растительность и др.) [Павлов, 2001b]. К сожалению, в начале 1990-х годов большая часть информационных объектов мониторинга криолитозоны была закрыта. Усилиями ряда организаций и отдельных специалистов удалось сохранить лишь единичные наблюдательные объекты мониторинга криолитозоны с длительным сроком функционирования (табл. 1). В дополнение к наблюдениям на стационарах в 1990-е годы на территории России было оборудовано более 20 наблюдательных площадок в рамках Международного проекта „Циркумполярный мониторинг активного слоя“ (CALM), большая часть которых успешно функционирует в настоящее время [Brown et al., 2000]. В результате осуществления исследований на геокриологических стационарах получен уникальный массив данных (в виде отчетов, полевых журналов и дневников), позволяющий изучать как ритмические, так и трендовые изменения сезонноталого слоя и температуры мерзлых грунтов. Продолжительность рядов наблюдений на ряде геокриологических стационаров превышает 30 лет, т. е. она существенно больше, чем в системе CALM (до 10 лет). В последние годы для оценки термических изменений в криолитозоне стали использовать данные метеорологических станций по измерению температуры грунтов (до глубины 3,2 м) [Васильев, 1999; Чудинова и др., 2001]. Регулярные метеорологические наблюдения за температурой верхнего слоя многолетнемерзлых грунтов достигают на ряде станций векового периода вре-

Таблица 1.

## Общая характеристика долговременных информационных объектов мониторинга криолитозоны в России

Объект мониторинга	Местоположение	Координаты, с.ш., в.д.	Среднегодовая температура воздуха, °С	Природная зона	Тип мерзалоты	Глубина температурных скважин, м	Годы наблюдений
<i>Европейский Север</i>							
Стационар Болванский	Болванский мыс, устье Печоры	68°18', 54°30'	-4,7	Южная тундра	Сплошная	10—20	1984—2001
Приполярно-тундровый стационар	В 35 км от Воркуты	67°24', 63°22'	-6,5	Южная тундра	Сплошная	10—20	1970—2001
Воркутинский стационар	Воркута	67°34', 63°57'	-5,8	Южная тундра	Прерывистая	10—15	1957—1961, 1964
<i>Север Западной Сибири</i>							
Стационар Тюрин-То	Западный Ямал	70°40', 68°00'	—	Северная тундра	Сплошная	10—20	1977—1992
Стационар Марре-Сале	Западный Ямал	69°45', 66°50'	-8,0	Северная тундра	Сплошная	10—12	1978—2001
Стационар Надым	В 30 км от Надыма	65°20', 72°55'	-5,9	Северная тайга	Островная	10—12	1972—2001
Участок Хадутте	Уренгойское месторож- дение	67°29', 76°42'	-9,0	Южная тундра	Сплошная	10—12	1974—1999
Участок Таб-Яха	»	66°42', 76°43'	-8,5	Северная лесотундра	Сплошная	10	1975—1997
Участок УКПГ-5*	»	66°19', 76°57'	-7,5	Южная лесотундра	Прерывистая	10	1975—1999
<i>Центральная Якутия</i>							
Стационар Якутский	Якутск	62°04', 129°45'	-10,2	Северная тайга	Сплошная	10—20	1963—1979, 1995—2001
Стационар Чабыда	В 20 км от Якутска	62°10', 129°45'	-10,2	Северная тайга	Прерывистая	10—20	1980—2001
Группа скважин в Цент- ральной Якутии	Правобережье р. Лена (на широте Якутска)	62°04', 130°00'	—	Северная тайга	Сплошная	10—20	1987—2001
Режимные участки Кар- дуген, Рожа	Центральная Якутия	—	—	Северная тайга	Сплошная	До 10	1980—2001
Наблюдательные сква- жины в районе Тынды	Амурская область	55°08', 124°52'	—	Светло-хвойные горные леса	Сплошная	До 60	1975—2001

\* УКПГ — установка комплексной подготовки газа.

мени. Однако погрешности измерений температуры грунтов на метеостанциях существенны [Павлов, 1975]. Поэтому при оценке современных термических изменений в криолитозоне авторы отдали предпочтение использованию данных мониторинга криолитозоны, отличающихся повышенной точностью.

Информация по температуре воздуха и снежному покрову получена из климатических и метеорологических справочников, изданных в разные годы (по 1990 г. включительно), а за последние годы — непосредственно от метеорологических организаций России и ряда зарубежных стран (в которые поступает информация от Гидрометеорологической службы России). Большая часть данных представлена в виде временных рядов. Сглаживание рядов проводилось путем осреднения с 3- или 10-летним интервалом. Определение линейных трендов временных рядов проводилось с помощью метода наименьших квадратов; при оценке статистической значимости трендов был использован ряд критериев. Оценка трендов проводилась для двух периодов времени: 1) с начала наблюдений по 1995 г., 2) за весь период наблюдений. Увеличение продолжительности временного ряда за счет включения данных наблюдений за 1996—2001 гг. в отдельных случаях изменяло не только значение тренда, но и его направление, так как с 1996 г. на ряде метеостанций отмечено похолодание.

### СИСТЕМАТИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА КРИОЛИТОЗОНЫ

Данные мониторинга криолитозоны свидетельствуют о возникновении в 1970—1995 гг. тенденций термической деградации криолитозоны в ряде районов Севера России. В основном эти тенденции были вызваны повышением зимней температуры воздуха, а в ряде районов и возрастанием снегоотложений. Современное повышение температуры грунтов отчетливо отмечается на Крайнем Европейском северо-востоке [Какунов, Павлов, 1997; Оберман, Юдина, 2000], Полярном Урале [Оберман, 2001] и Севере Западной Сибири [Павлов, 1994; Pavlov, Moskalenko, 2002], в Западной Якутии [Павлов, 1997] и Забайкалье [Шестернев, 2001]. Рассмотрим современные изменения термических условий верхних горизонтов криолитозоны в наиболее крупных регионах Севера России.

#### Европейский Север

На территории Европейского Севера мониторинг криолитозоны наиболее длительное время осуществлялся на Болванском мысе и особенно в Большеземельской тундре (см. табл. 1). За 1970—1995 гг. среднегодовая температура воздуха

на Европейском Севере повысилась на 0,2—0,8 °С. Повышение температуры в северо-восточных районах (Усть-Цильма, Петрунь, Воркута) было значительнее, чем в северо-западных (рис. 1). В 1996—1999 гг. в регионе отмечалось понижение среднегодовой температуры воздуха. Общее возрастание сумм положительной температуры воздуха за 1970—1995 гг. (по отношению к норме) в среднем для региона составило 1,07. Статистический анализ тенденций современных изменений среднегодовой температуры воздуха свидетельствует о существовании достаточной устойчивости современного климата на большей части Европейского Севера. Современные климатические условия в регионе лишь в весьма ограниченных масштабах могут способствовать изменению температуры мерзлых грунтов и возрастанию глубины сезонного протаивания.

Мониторинг криолитозоны на территории Болванского мыса включал в себя проведение температурных наблюдений в скважинах. Самый длинный ряд наблюдений за температурой мерзлых грунтов в ненарушенных условиях имеется по скв. 59. Наблюдения с 1984 по 1993 г. проводились под руководством Л. В. Чистотина, затем были законсервированы, а восстановлены полевым отрядом Института криосферы Земли в 1999—2001 гг. Среднегодовая температура грунтов оценивается в месте скважины в  $-2 \div -2,4$  °С. За период наблюдений в скв. 59 температура

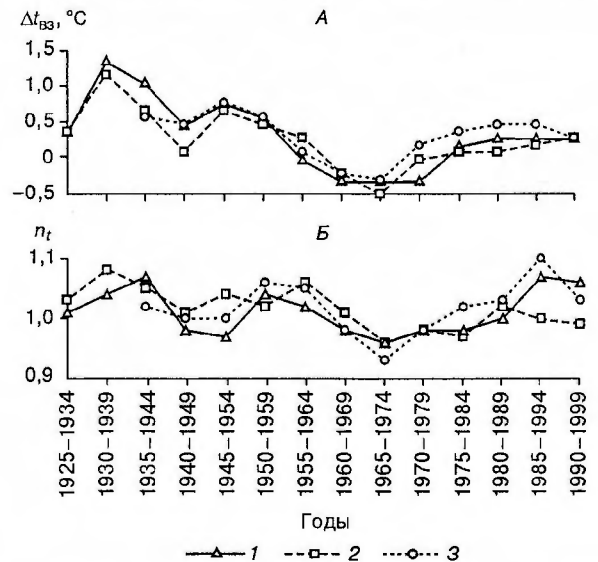


Рис. 1. Отклонения средних 10-летних скользящих значений среднегодовой температуры воздуха от нормы (А); отношение сумм положительных температур воздуха за год к их норме (Б).

1 — Нарьян-Мар, Болванский мыс, Амдерма, Шапкино (осредненные данные), 2 — Архангельск, 3 — Воркута.

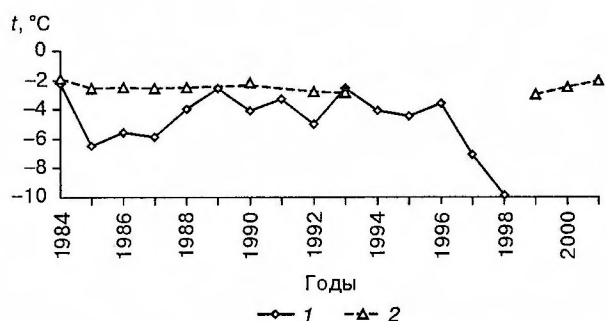


Рис. 2. Ход температуры воздуха (1) на метеостанции Болванский мыс и температуры грунтов на глубине 9 м в скважине 59 (2).

мерзлых грунтов изменялась от  $-1,9$  до  $-3$  °C на глубине 9 м и от  $-2$  до  $-2,5$  °C на глубине 12 м при значительно более существенных вариациях среднегодовой температуры воздуха (от  $-2,3$  до  $-9,9$  °C). Как показало рассмотрение данных по скв. 59 (рис. 2), тренд многолетних изменений среднегодовой температуры грунтов практически отсутствует. Сходные результаты получены при анализе температурных измерений в других скважинах с ненарушенными природными условиями. Таким образом, данные мерзлотно-климатического мониторинга свидетельствуют о достаточной устойчивости не только современного климата на территории Болванского мыса, но и термического режима криолитозоны. Следовательно, при проектировании природно-технических систем на ближайшие десятилетия необходимо отдать приоритет учету межгодовых вариаций климата и мерзлоты, а не их трендовым изменениям.

В Большеземельской тундре систематические термические наблюдения в грунтах были начаты в середине 1950-х годов и продолжаются в настоящее время [Павлов, 1996]. Исследования были существенно развиты в 1970-х годах и в разные годы охватывали до 10 геокриологических стационаров и режимных участков (Приполярно-тундровый, Коротаиха, Роговой,

Кара и др.) [Какунов, Павлов, 1997; Павлов, 1997]. В середине 1990-х годов большая часть объектов режимных геокриологических наблюдений на территории Большеземельской тундры была закрыта. В настоящее время функционируют Приполярно-тундровый стационар, расположенный в 35 км от Воркуты, и группа режимных термических скважин вокруг угольных шахт Воркутинского угольного бассейна. На этом стационаре, являющемся одним из главных объектов мониторинга криолитозоны России, наблюдения за температурой грунтов проводятся на участках как со сплошными мерзлыми породами, так и с прерывистыми (несквозные и сквозные талики).

С начала наблюдений до 1995—1996 гг. отмечалась общая тенденция к возрастанию глубины сезонного протаивания ( $h_{\text{т}}$ ), в последующие годы эта тенденция сменилась на обратную. На участках с ненарушенными поверхностными условиями отмечается почти повсеместное повышение температуры мерзлых грунтов в слое годовых теплооборотов за 1970—1995 гг. Наибольшее ее повышение приходится на участки, сложенные многолетнемерзлыми породами — водоразделы, берега рек или ручьев, бугры пучения (табл. 2). Оно достигало  $1,6$  °C на глубине 3 м и  $0,5$  °C на глубине 10 м. На участке спущенного озера напротив отмечены общее понижение температуры донных отложений за 18-летний период после сброса воды и новообразование мерзлых грунтов. Повышение температуры мерзлых грунтов при современном климатическом потеплении характерно также для других объектов мониторинга криолитозоны (режимные участки Роговой, Коротаиха и др.) в арктических районах Европейского северо-востока.

### Север Западной Сибири

Для количественной оценки термических изменений сплошной криолитозоны в арктических районах Западной Сибири при современном потеплении климата представительными являются данные геокриологического стационара Марре-Сале (Западный Ямал), на котором про-

Таблица 2. Изменение температуры грунтов ( $\Delta t_{\text{гр}}$ ) на глубине 3 и 10 м на Приполярно-тундровом стационаре (р-он Воркуты)

Тип участка	$t_{\text{гр}}, \text{°C}$	Период наблюдений	$\Delta t_{\text{гр}}, \text{°C}$	
			3 м	10 м
Сливающиеся мерзлые породы	$-0,1 \div -2,5$	1970—1995	1,6	0,5
		1970—2000	0,5	0,5
Талик надмерзлотный	$0,3 \div 1,5$	1975—1995	0,9	0,5
		1975—2000	1,0	0,2
Талик подозерный	1,5	1978—1995	1,0	0,0
		1978—2000	0,9	-0,2
Талик промерзающий (спущенное озеро)	$1,3 \div 0,3$	1971—1990	-1,3	-1,0

Таблица 3. Средние 3-летние значения температуры мерзлых грунтов на глубине 10 м ( $t_{10}$ ) и температуры воздуха ( $t_{вз}$ ) на Марре-Сале

Годы	Температура	
	$t_{вз}$	$t_{10}$
1979—1981	-9,1	-5,4
1982—1984	-8,0	-5,1
1985—1987	-8,4	-4,9
1988—1990	-7,6	-5,0
1991—1993	-7,9	-4,9
1994—1996	-6,3	-4,6
1997—1999	-10,0	-5,0

Примечание. Температура грунтов получена в результате осреднения замеров по 12 скважинам стационара.

водятся непрерывные наблюдения за глубиной сезонного протаивания и температурой грунтов в различных ландшафтных условиях с 1978—1979 гг. [Павлов, 1994; Дубровин и др., 1996]. Среднегодовая температура грунтов изменяется здесь от -2,2 до -7 °С, а глубина сезонного протаивания — от 0,3 до 1,75 м.

На Марре-Сале прослеживается заметное повышение среднегодовой температуры грунтов на глубине 10 м ( $t_{10}$ ) за период 1978—1995 гг. В предшествующих публикациях [Павлов, 1997, 2001б] показано, что в рассматриваемый период потепление мерзлых грунтов на глубине 10 м в различных ландшафтных условиях оценивается в 0,1—1 °С. Повышение температуры грунтов на основных объектах наблюдений стационара (площадью в 2,1 км<sup>2</sup>) составило в среднем 0,9 °С (при возрастании температуры воздуха за этот же период на 3,2 °С) (табл. 3). В результате понижения среднегодовой температуры воздуха в последующие годы значение  $t_{10}$  снизилось на 0,6 °С за 1996—2000 гг. Таким образом, за период режимных геокриологических наблюдений на Марре-Сале (1978—1999 гг.) температура грунтов на глубине 10 м повысилась в среднем по территории стационара всего на 0,3 °С при соответствующем возрастании температуры воздуха также на 0,3 °С.

По данным наблюдений на Марре-Сале, сезонноталый слой в целом слабо реагирует на современное климатическое потепление. Тренд возрастания глубины сезонного протаивания грунтов ( $h_t$ ) за 1978—1995 гг. составил 0,5—1,1 см/год. Однако вследствие холодных летних сезонов в последующие годы этот тренд за весь период наблюдений существенно снизился [Павлов, 2001б].

Данные Надымского геокриологического стационара являются представительными для оценки современных изменений островной криолитозоны Западной Сибири. Среднегодовая тем-

пература грунтов на территории стационара изменялась от -3 до +1 °С. Тренд повышения среднегодовой температуры воздуха в Надыме составил за 1972—2000 гг. 0,04 °С/год.

При обработке данных наблюдений выявлены неодинаковые тенденции в интенсивности и даже направленности современных изменений термического состояния грунтов на территории стационара [Павлов, Moskalenko, 2002]. Существенное влияние на многолетние изменения сезонноталого слоя оказывают литологический состав пород и условия дренирования. На участке с буграми пучения, сложенными с поверхности песком, и на болоте наблюдается увеличение сезонноталого слоя. Тренд его возрастания за период наблюдений равен 0,7 см/год. Напротив, на торфяниках и заторфованном бугре пучения тенденции возрастания  $h_t$  не отмечается (рис. 3).

На территории стационара в Надыме преваляло небольшое повышение температуры грунтов (на 0,2—0,8 °С) в период 1972—2001 гг. Максимальные термические изменения в мерзлых породах отмечены на крупнобугристых торфяниках, где повышение температуры пород на

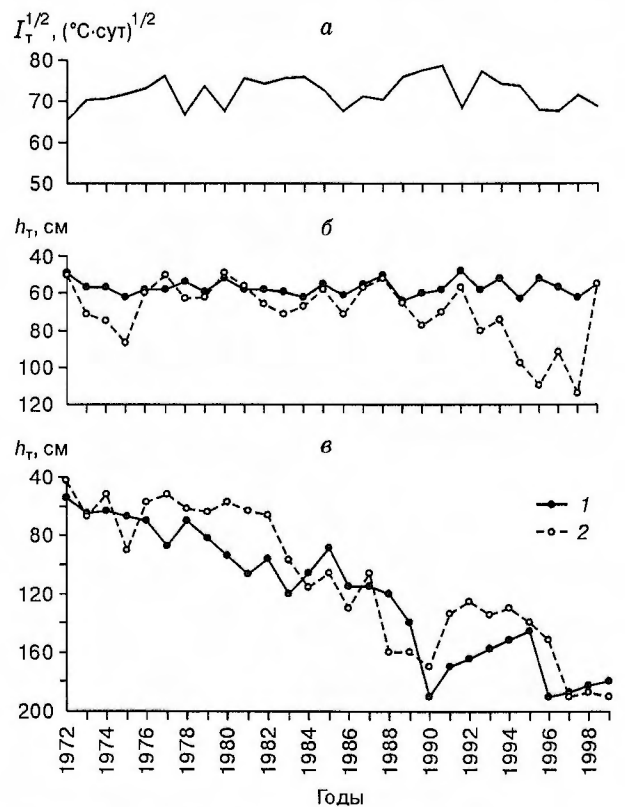


Рис. 3. Изменение индекса протаивания (а) и толщины сезонноталого снега (б, в) за 1972—1999 гг. на Надымском стационаре.

1 — плоскобугристый, 2 — мелкобугристый торфяник. Условия: б — естественные, в — нарушенные.

Таблица 4. Современное повышение температуры грунтов на глубине 10 м ( $\Delta t_{10}$ ) на площади Уренгойского месторождения природного газа

Участок	Число скважин	Урочище	Тип криолитозоны, природная зона	Годы наблюдений	$\Delta t_{10}$ , °C	
					Среднее по скважинам	Диапазон повышений
Хадуттэ	7	Тундра	Сплошная; южная тундра	1975—1997	1,2	—
				1975—1999	1,1	-0,2 ÷ 2,7
Таб-Яха	7	Лес, болото, тундра, бугры и гряды пучения	Сплошная; северная лесотундра	1975—1997	0,9	0,4 ÷ 1,5
УКПГ-5	12	Тундра, торфяное болото, лес	Прерывистая; южная лесотундра	1974—1997	1,4	—
				1974—1999	1,2	0 ÷ 2,4

глубине 10 м ( $t_{10}$ ) измерялось примерно 1 °C, тренд ее возрастания составил 0,03 °C/год. Отмечены локальные понижения температуры мерзлых торфяников, образовавшихся за 25—30 последних лет на месте болот в результате их иссушения. Минимальные изменения температуры мерзлых пород наблюдались на буграх пучения, где  $t_{10}$  повысилась в среднем с -0,5 до -0,1 °C.

Кроме геокриологических стационаров Марре-Сале и Надым, на Севере Западной Сибири (на площади Уренгойского месторождения природного газа) в настоящее время функционируют три режимных участка с повторными измерениями температуры грунтов в скважинах до глубины 10—12 м (см. табл. 1). Измерения начались в 1974—1976 гг. Данные этих режимных участков характеризуют сплошную криолитозону (Хадуттэ, Таб-Яха) и прерывистую (УКПГ-5). За 25-летний период наблюдений изменение температуры грунтов в скважинах (на глубине 10 м) варьирует от -0,2 до +2,7 °C. Из общего числа скважин (26) в двух из них не отмечалось заметного изменения температуры грунтов; в одной скважине зафиксировано даже небольшое понижение температуры (на месте старой вырубки); в остальных 23 скважинах отмечается повышение температуры грунтов. В последние два года в большинстве скважин наблюдалось небольшое понижение температуры грунтов (на 0,1—0,3 °C). Общее возрастание температуры грунтов на глубине 10 м за период 1975—1999 гг. составило 1,1 °C в условиях сплошной криолитозоны и 1,2 °C — прерывистой (табл. 4). Среднее повышение температуры грунтов на Уренгойском месторождении (по данным трех режимных участков) можно оценить в 1,2 °C за период 1975—1997 гг. и в 1,0 °C за 1975—1999 гг.

### Центральная Якутия

В этом регионе повышение среднегодовой температуры воздуха за 1965—1999 гг. оценивается в 2—2,5 °C. Тренд повышений температуры воздуха в Якутске составил 0,064 °C/год за 1965—1980 гг.; 0,101 °C/год за 1981—1998 гг. и

0,068 °C/год за 1966—1998 гг. в целом. В Якутске (по данным наблюдений на метеостанции) отмечается хорошо выраженная тенденция к современному повышению температуры мерзлых грунтов (рис. 4). Тренд изменения температуры грунтов на глубине 3 м составил 0,019 °C/год за 1966—1996 гг., т. е. был примерно в 3 раза меньше, чем тренд воздуха. Отсутствует четкая синхронность в многолетнем ходе температуры воздуха и грунтов (неодновременное наступление максимальных и минимальных значений и др.).

Объектами более точных наблюдений за температурой мерзлых грунтов в Центральной Якутии являются геокриологические стационары в Якутске и на Чабыде, группа геотермических скважин на правом берегу р. Лена (на широте Якутска) и в долине Туймаады, режимные участки мелиоративного назначения Кердюген и Рожа [Павлов, 1983; Скачков и др., 2000; Вар-

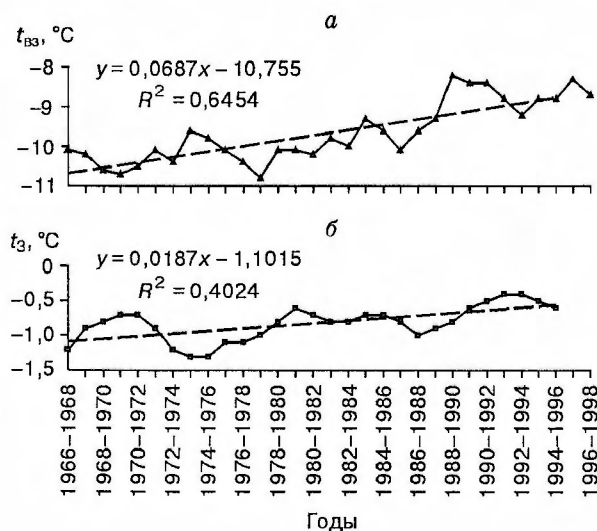


Рис. 4. Средние 3-летние значения температуры воздуха (а) и температуры грунтов на глубине 3 м (б) на метеостанции Якутск (сплошные линии).

Пунктирная линия — тренды изменений температуры воздуха (а) и грунтов (б) за 1966—1998 г.

ламов и др., 2001; Скачков, 2001; Скрябин, 2001; Угаров, 2001]. Отличительная особенность условий формирования термического режима грунтов в Центральной Якутии — холодная зима, жаркое лето, очень рыхлый снежный покров при его небольшой высоте. Глубина сезонного протаивания грунтов изменяется в регионе от 0,4 до 4,3 м, а температура грунтов на подошве слоя годовых теплооборотов — от +0,5 до -6,5 °С.

В 1960—1970-х годах на Якутском геокриологическом стационаре, расположенном на окраине города, проводился детальный комплекс наблюдений за составляющими теплового баланса и гидротермическим режимом грунтов в двух доминирующих естественных ландшафтах (разнотравный луг, сосновый лес) [Павлов, 1983]. Наблюдения были восстановлены в середине 1990-х годов. Сравнение температуры грунтов за 1971—1975 и 1995—1999 гг. показывает, что, несмотря на очевидное повышение температуры воздуха в Якутске за последние 30 лет, температура грунтов на участке луга понизилась на 0,2—0,5 °С, а в сосновом лесу — на 0,1—0,2 °С. Такое понижение температуры грунтов объясняется уменьшением высоты снежного покрова, особенно заметным в первую половину зимы (ноябрь, декабрь), и, следовательно, снижением его обогревающего влияния.

Анализ данных режимных наблюдений на стационаре Чабыда за 1981—1999 гг. показывает отсутствие тенденций возрастания глубины сезонного протаивания для характерных типов местности (мелкодолинный, склоновый) [Скачков и др., 2000]. Вместе с тем в сходных природных условиях (режимные участки Кердюген и Рожа) отмечался положительный тренд изменений глубины сезонного протаивания [Угаров, 2001]. Межгодовые вариации температуры грунтов на Чабыдинском стационаре для низкотемпературных условий оказались более выраженными, чем для высокотемпературных. В мелкодолинном и склоновом типах местности тренды изменений температуры грунтов за период наблюдений оказались отрицательными (от -0,025 до -0,087 °С/год), в других типах местности — практически отсутствовали (рис. 5).

Правобережье среднего течения р. Лена, по сравнению с левобережьем, характеризуется повышенными снегоотложениями. Термические измерения в скважинах, выполненные в 1987—1999 гг. для большого разнообразия ландшафтных комплексов (пойменный, низкотеррасовый, склоновый, аласный и др.), показали, что тренды многолетних изменений средней годовой температуры мерзлых грунтов не выходят за пределы 0,02 °С/год и в среднем для изучаемой территории близки к нулевым значениям.

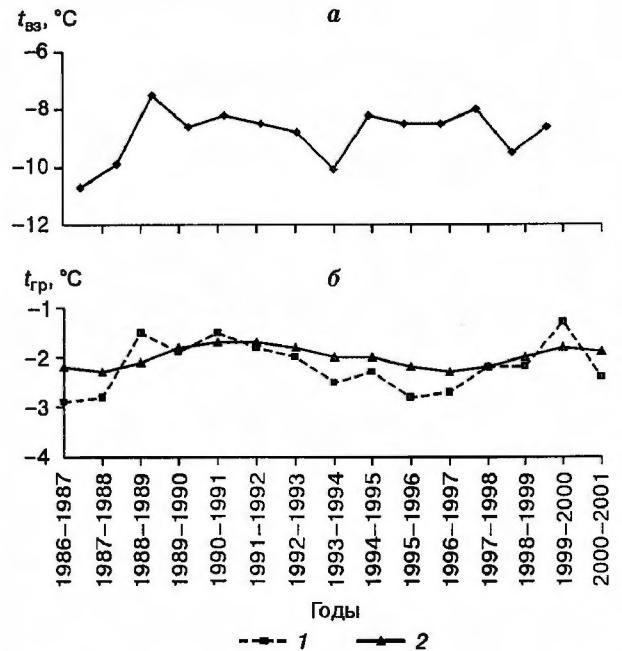


Рис. 5. Ход температуры воздуха (а) на метеостанции Якутск и среднегодовой температуры грунтов (б) на глубинах 3 м (1) и 10 м (2) на стационаре Чабыда (средние данные по 10 скважинам).

Таким образом, в Центральной Якутии, несмотря на наибольшее потепление современного климата, по сравнению с другими северными регионами России, изменение термического состояния верхних горизонтов криолитозоны выражено слабо и не всегда [Васильев, 1999; Варламов и др., 2001; Скачков, 2001]. Криолитозона Центральной Якутии характеризуется в целом достаточной термической устойчивостью, что связано с наметившейся тенденцией уменьшения высоты снежного покрова в регионе в последние одно—два десятилетия.

#### Амурская область

Современное климатическое потепление в области началось в 1970-х годах и составляет 1—1,8 °С. В средней части Приамурья (Тында) оно наиболее значительно. В окрестностях этого города и вдоль трассы железной дороги на отрезке Тында—Бамовская в 1975—1996 гг. проведен цикл измерений температуры грунтов на маревых участках. Измерения показали, что в скважинах преобладает понижение температуры мерзлых грунтов, составляющее -0,5 + -1,0 °С на глубинах от 4 до 10 м. Так же, как и в районе Якутска, похолодание грунтов при повышении температуры воздуха вызвано снижением высоты снежного покрова за последние 15—20 лет.



Лишь на отдельных участках наблюдений с 1987 г. отмечена неустойчивая тенденция к повышению температуры грунтов.

### КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

Анализ многолетних данных, полученных в результате осуществления мониторинга криолитозоны в России, позволил сделать следующие общие выводы.

1. В большинстве районов Севера прослеживается едва заметная тенденция к современному увеличению глубины сезонного протаивания. Так, тренд увеличения  $h_T$  за 1978—1995 гг. составлял для территории стационара Марре-Сале 0,5—1,1 и в среднем по территории стационара — 0,8 см/год. Холодные летние сезоны 1996—1999 гг. привели к уменьшению тренда  $h_T$  до 0,6 см/год. Для островной криолитозоны (Надымский стационар) современное возрастание  $h_T$  отмечается лишь для бугристой тундры. Таким образом глубина сезонного протаивания в целом плохо реагирует на современное климатическое потепление и, вопреки широко распространенному мнению [Nelson et al., 1993], не является чувствительным индикатором современного климатического потепления.

2. Температура мерзлых грунтов является более четким индикатором современных изменений климата, чем глубина сезонного протаивания. Однако реакция температуры верхних горизонтов криолитозоны на глобальное потепление климата не однозначна. Мониторинговое изучение криолитозоны свидетельствует о возникновении современной тенденции повышения температуры мерзлых грунтов на Севере Западной Сибири, которая была наиболее отчетливо выражена в период с конца 1970-х годов до середины 1990-х годов. Возрастание температуры грунтов на глубине 10 м за этот период оценивается в 0,9—1,2 °С для районов сплошной криолитозоны, 0,9—1,4 °С — прерывистой и 0,2—0,8 °С — островной криолитозоны. Начиная с 1996 г. фиксируется небольшое понижение температуры мерзлых грунтов в ряде районов на Севере Западной Сибири в связи с понижением температуры воздуха.

В Центральной Якутии (стационары Чабыда, Якутск и др.), несмотря на наибольшее современное потепление климата, повышение температуры мерзлых грунтов выражено слабо и не повсеместно. Мониторинговые наблюдения свидетельствуют о высокой термической устойчивости криолитозоны Центральной Якутии в современный период, которая в основном обусловлена наметившейся тенденцией уменьшения высоты снежного покрова в регионе за последние 15—25 лет.

3. В одном и том же регионе реакция низкотемпературных мерзлых грунтов на современные изменения климата проявляется более отчетливо, чем высокотемпературных. Поэтому климатическое потепление способствует выравниванию неоднородностей в температуре верхних горизонтов криолитозоны. Направленность дальнейших исследований отклика криолитозоны на аномалии климата не должна быть одинаковой в разных регионах Севера. Для районов со слабыми современными изменениями климата (Европейский северо-запад, арктические районы Якутии и Северо-Востока) приоритет в исследованиях следует отдать учету межгодовых вариаций климата и температуры мерзлых пород, а не их трендовым изменениям.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современная стратегия освоения Севера не учитывает возможность потепления климата и деградации криолитозоны в осязаемые сроки. Антропогенные воздействия, связанные с нарушениями поверхности и освоением недр, усиливают неблагоприятное воздействие современного потепления климата. Таким образом, уже сегодня проектировщики должны знать масштабы предстоящих мерзлотно-климатических изменений для того, чтобы обеспечить сбалансированное использование недр и создать систему экологической безопасности при освоении Севера. Продолжение исследований должно включать в себя комплексную оценку геокриологических последствий, связанных с межгодовыми вариациями климата и его современным потеплением, а также со всеусиливающимся техногенным воздействием, которое на Севере стало приобретать региональный характер.

В организации и проведении наблюдений на различных этапах осуществления мониторинга криолитозоны принимали участие А. А. Васильев, С. П. Варламов, А. Н. Прокопьев, Б. П. Сергеев, Л. П. Харитонов, Е. И. Червова и др. специалисты — авторы высказывают им глубокую признательность.

Исследования выполнены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 01-05-03385 и 02-05-64331).

### 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. 3, № 4, с. 15—25.  
Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрябин П.Н., Шендер Н.И. Термическая реакция литогенной основы ландшафтов Центральной Якутии на современное изменение климата // Материалы Второй конф. геокриол. России. Т. 2. М., МГУ, 2001, с. 84—86.

- Васильев И.С. Реакция термического режима почвогрунтов Якутии на современные изменения климата // Метеорология и гидрология, 1999, № 1, с. 98—104.
- Дубровин В.А., Павлов А.В., Харитонов Л.П. Экспериментальное исследование термического режима грунтов в арктических районах Западной Сибири // Материалы Первой конф. геокриол. России. Кн. 1. М., 1996, с. 310—320.
- Дучков А.В., 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. 22—34.
- Какунов Н.Б., Павлов А.В. Оценка и прогноз термического режима криогенных почв на севере России в связи с ожидаемым потеплением климата // Криопедология-97: II междунар. конф. Сыктывкар, Ин-т биол. Коми НЦ УРО РАН, 1997, 121 с.
- Оберман Н.Г. Внутривековая динамика мерзлой зоны европейского северо-востока России // Материалы Второй конф. геокриол. России. Т. 2. М., МГУ, 2001, с. 212—217.
- Оберман Н.Г., Юдина Е.А. Особенности проявления внутривековой ритмичности характеристик деятельного слоя и слоя годовых теплооборотов в основных криогенных ландшафтах Европейского северо-востока России // Тез. докл. конф. „Ритмы природных процессов в криосфере Земли“ (12—15 мая, 2000). Пушино, 2000, с. 87—88.
- Павлов А.В. Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР. Якутск, Якут. кн. изд-во, 1975, 302 с.
- Павлов А.В. Энергообмен в ландшафтной оболочке Земли. Новосибирск, Наука, 1983, 256 с.
- Павлов А.В. Прогноз эволюции криолитозоны в связи с глобальными изменениями современного климата // Современные проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и экологии. М., ВСЕГИНГЕО, 1994, с. 135—151.
- Павлов А.В. Современное состояние мониторинга криолитозоны России и проблемы его развития // Материалы Первой конф. геокриол. России. Кн. 3. М., МГУ, 1996, с. 327—336.
- Павлов А. В. Мерзлотно-климатический мониторинг России: Методология, результаты наблюдений, прогноз // Криосфера Земли, 1997, т. I, № 1, с. 47—58.
- Павлов А.В. Основные положения концепции геокриологической информационной системы // Материалы Второй конф. геокриол. России. М., МГУ, 2001а, т. 3, с. 198—204.
- Павлов А.В. Реакция криолитозоны на современные и ожидаемые в XXI веке климатические изменения // Разведка и охрана недр, 2001б, № 5, с. 8—14.
- Павлов А.В. Вековые аномалии температуры воздуха на севере России // Криосфера Земли, 2002, т. VI, № 2, с. 75—81.
- Скачков Ю.Б. Термическая устойчивость верхних горизонтов криолитозоны Центральной Якутии при современном потеплении климата: Автореф. канд. дис. Якутск, 2001, 25 с.
- Скачков Ю.Б., Скрябин П.Н., Варламов С.П. Термическая устойчивость криолитозоны Якутии при современном потеплении климата // Наука и образование, 2000, № 3 (19), с. 26—31.
- Скрябин П.Н. Развитие наблюдательной сети термического мониторинга криолитозоны в Центральной Якутии // Криосфера Земли, 2001, т. V, № 3, с. 56—62.
- Угаров И.С. Гидротермический режим почвогрунтов при сельскохозяйственном освоении в Центральной Якутии: Автореф. канд. дис. Якутск, 2001, 25 с.
- Чудинова С.М., Выховец 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—69.
- Шестернев Д.М. Воздействие глобального потепления климата на криолитозону Южного Забайкалья // Материалы Второй конф. геокриол. России. М., МГУ, 2001, т. 2, с. 313—318.
- Brown J., Hinkel K.M., Nelson F.E. The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) Program: Research Designs and Initial Results // Polar Geography, 2000, vol. 24, No 3, p. 165—258.
- Nelson F.E., Lachenbruch A.H., Woo M.-K. et al. Permafrost and Changing Climate (1993) // Permafrost, Proceed. of 6th Internat. Conf. Beijing, China, South China Univ. of Technology Press., vol. 2, p. 987—1005.
- Pavlov A.V., Moskalenko N.G. The Thermal Regime of Soils in the North of Western Siberia // Permafrost and Periglacial Processes (PPP), 2002, № 13, p. 43—51.

Поступила в редакцию  
20 августа 2002 г.