

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗ

УДК 551.525

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ
ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕНДЕНЦИЙ МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕНЕНИЙ
ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЧВ НА ТЕРРИТОРИИ СЕЗОННОЙ
И МНОГОЛЕТНЕЙ КРИОЛИТОЗОНЫ РОССИИ

Д. А. Гиличинский, С. С. Быховец, В. А. Сороковиков, Д. Г. Федоров-Давыдов,
Р. Г. Барри*, Т. Жанг*, М. К. Гаврилова**, О. И. Алексеева**

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, 142290, Пушкино, Московская обл., Россия

** Национальный Центр данных по льду и снегу Университета Колорадо, Болдер, Колорадо, США*

*** Институт мерзлотоведения им. акад. П. И. Мельникова СО РАН, 677018, Якутск, Россия*

Показаны перспективы использования банка данных по температуре почв России, наблюдения за которой Гидрометеослужба ведет с прошлого века. Температурные ряды рассмотрены как интегральный показатель вековой истории климата почв. Достоверность трендов по температуре почв выше, чем таковых в воздухе. Из-за инерционности, обусловленной фазовыми переходами воды, динамика температур почвы не всегда повторяет изменения температуры воздуха как во времени, так и в пространстве. Температуру почв, в отличие от воздуха, определяют условия предшествующего периода. В большинстве случаев среднегодовой рост температуры обусловлен повышением ее среднемесячных значений в холодный период.

Температура почв, вековые тенденции, вечная и сезонная мерзлота

USE OF THE DATA OF HYDROMETEOROLOGICAL SURVEY FOR CENTURY HISTORY
OF SOIL TEMPERATURE TRENDS IN THE SEASONALLY FROZEN AND PERMAFROST AREAS OF RUSSIA

D. A. Gilichinsky, S. S. Bykhovets, V. A. Sorokovikov, D. G. Fedorov-Davydov,
R. G. Barry*, T. Zhang*, M. K. Gavrilova**, O. I. Alexeeva**

Institute of Physical-Chemical and Biological Problems for Soil Science, RAS, 142290, Pushchino, Moscow Region, Russia

** National Snow and Ice Data Center, Campus Box 449, University of Colorado, Boulder, CO 80309, USA*

*** Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, 677018, Yakutsk, Russia*

The paper shows the outlooks for soil temperature database. The regular measurements of soil temperatures were started in 19-th century and the data have covered almost 100 years. In this paper we consider the long-term soil temperature ranges as a century history of soil climate. The soil temperature trends are much more reliable than the trends of air temperatures. As the inertia changes as a result of the water-ice phase transition, the trends of soil temperature do not necessarily correspond with the spatial and temporal trends observed for air temperature. Results show the necessity to correlate soil temperatures with the conditions of the previous season. The data indicate that the increase in the mean annual soil temperature was mainly due to an increase in the winter soil temperatures, even though summer soil temperatures had an opposite effect.

Soil temperatures, century trends, permafrost and seasonally frozen soils

ВВЕДЕНИЕ

Тепловой режим почвы непосредственно зависит от условий теплообмена с атмосферой, со снежным покровом и с дерново-растительным слоем. В. А. Кудрявцев предложил ряд оперативных методов и расчетных схем оценки влияния основных природных факторов на промерзание—протаивание и температуру почв

[Основы..., 1974 и др.]. Разработку этого направления продолжили А. В. Павлов [1965, 1997] и Г. М. Фельдман [1973]. Детальное изучение теплового режима мерзлотных почв в России традиционно проводится на геокриологических стационарах. Обобщение данных стационаров с наибольшей полнотой выполнено

А. В. Павловым [1965, 1997]. К сожалению, наблюдения на стационарах большей частью ограничены одним-двумя десятками лет.

Гидрометеорологической службой России с середины прошлого столетия ведутся наблюдения за температурой почв. В качестве примера можно привести обобщение десятилетних данных по Финляндии, Бессарабской и Могилевской губерниям [Веселовский, 1857]. Число точек наблюдений постоянно росло и к 1980 г. в СССР режимные наблюдения за температурой почв вели более 1000 станций. Накоплен огромный материал, уникальный по охвату территории (тундровые, таежные, лесостепные, степные и горные пространства в области сезонной/вечной мерзлоты с широким спектром климатических условий, абсолютных отметок, ландшафтов и геоморфологических уровней) и набору параметров. По метеостанциям с наиболее длинными рядами наблюдений за температурой почв к северу от 50° с.ш. информация систематизирована нами в виде базы данных и перспективна для оценки реакции деятельного слоя земной поверхности на климатические изменения в атмосфере.

На сети метеорологических станций измеряется: а) температура подстилающей поверхности: летом — оголенной почвы, а зимой — снега; б) температура почвы на глубинах 0,05—0,2 м в теплое время года по коленчатым термометрам Савинова; в) температура почвы на глубинах 0,2—3,2 м по вытяжным термометрам. Измерения температуры поверхности ведут практически все станции; остальные наблюдения на выборочной сети. Сведения об истории станций изложены в Климатологических справочниках [1964—1972] и работах [Методы..., 1957; Нездюрлов, 1967; Шкадова, 1979], а методы наблюдений за температурой почв — в Наставлениях гидрометеорологическим станциям [1946—1985]. По сравнению с методами, используемыми на геокриологических стационарах, они не столь совершенны, и основное преимущество получаемой информации — длинные ряды данных.

В справочных изданиях Гидрометеослужбы опубликованы следующие величины, рассчитанные по данным наблюдений: а) средняя месячная и годовая температура на поверхности почвы (снега); б) средний минимум и максимум температуры на поверхности почвы — осредненные за месяц (год); в) абсолютный минимум и максимум температуры поверхности почвы за месяц (год); г) средняя месячная температура верхних слоев почвы по коленчатым и вытяжным термометрам; д) даты первого (осенью) и последнего (весной) мороза, длительность безморозного периода и число дней с морозом на поверхности

почвы и глубинах; е) максимальная глубина проникновения нулевой изотермы в почву.

ХАРАКТЕРИСТИКА СПРАВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Данные наблюдений до 1990 г. в обобщенном виде опубликованы в изданиях: 1) *Климатологический Справочник СССР: Метеорологические данные за отдельные годы [1960—1964]* содержит ежемесячные данные о температуре почв на глубинах с момента начала наблюдений по 1950 г. Издан 27 выпусками по территориям существовавших на то время региональных управлений Гидрометеослужбы. 2) *Справочник по климату СССР: Метеорологические данные за отдельные годы [1970—1978]* — продолжение рядов температуры почв на глубинах за 1951—1965 гг. и данные о температуре поверхности с начала наблюдений по 1965 г. 3) *Климатологический Справочник СССР: История и физико-географическое описание метеорологических станций и постов [1964—1972]* — сведения о переносах площадок, изменениях естественного и антропогенного окружения, описание почв. 4) *Метеорологический ежемесячник [1960—1990]* — продолжение рядов наблюдений за 1960—1980-е годы (№ 13 содержит итоговые данные за год).

Информация, приведенная в справочниках, требует предварительной обработки. Критический контроль осуществлялся при первичной обработке и составлении ежемесячников и справочников. Тем не менее в них бывают очевидные опечатки. Анализ однородности рядов наблюдений проведен при составлении справочников, но не по всем регионам сведения о нарушениях однородности опубликованы в явном виде. Не проверены на однородность результаты наблюдений за годы после составления Справочников (после 1965 г.). Неоднородность рядов наблюдений за температурой почвы, помимо причин, общих с температурой воздуха (перенос площадки, изменения в окружении станции, смена типа приборов, сроков наблюдений и пр.), может быть вызвана изменением состояния поверхности, растительного и снежного покрова, уровня грунтовых вод, влажности, физико-химических свойств почвы. Требуется сопряженный анализ самих рядов, истории станций и методики наблюдений.

В силу изменения глубин установки, выхода из строя термометров и других причин, ряды температуры почв содержат пропуски, не столь характерные для других климатических элементов, и требуют восстановления значений. Климатологические методы интерполяции и приведения рядов [Методы..., 1957], для температуры почв требуют доработки. В частности, привле-

чение материалов соседних станций (используемое для температуры воздуха и других элементов климата) ограничено меньшей густотой сети наблюдений, большей пространственной неоднородностью характеристик и их зависимостью от местных условий. Например, перенос метеорологической будки в открытом поле на 10 м обычно не нарушает однородности ряда наблюдений над температурой воздуха. Аналогичный перенос площадки наблюдений за температурой почвы влечет изменение микрорельефа, мощности растительного и снежного покровов, дернины, механического состава и влажности почвы, т. е. факторов, определяющих температуру. Поэтому при обработке рядов температуры почв чаще используют связи между соседними глубинами, что оправдано при режиме, близком к стационарному. При длиннопериодных колебаниях или трендах с нелинейной составляющей точность таких оценок снижается. При анализе и обработке данных необходимо учитывать локальные причины изменения температурного режима, в частности, особенность расположения и историю каждой станции.

ОБСУЖДЕНИЕ

К настоящему времени в созданную нами базу данных введена информация по 170 станциям, из которых обсуждаются 8 с достаточно полными и длинными рядами температур воздуха и почвы (табл. 1): меридиональный профиль вдоль р. Енисей (65—52° с.ш.), отдельные станции в Восточной Сибири, Якутии и на Европейском севере. Приведены оценки линейных трендов средних годовых и месячных температур воздуха и почвы (рис. 1, табл. 2). Обработка данных выполнена общепринятыми статистичес-

кими методами [Исаев, 1988; Девис, 1977]. Для оценки достоверности (статистической значимости) линейного тренда использовался критерий Стьюдента. Тренды считались достоверно отличными от 0 при доверительной вероятности $P \geq 0,95$ (в табл. 2 они выделены жирным шрифтом).

Данные табл. 2 показывают, что тренды температуры почв оказываются достоверными чаще, чем тренды температуры воздуха. Это связано с меньшей дисперсией температур почвы, которая с глубиной, как правило, убывает. Тренды среднемесячных температур почв чаще достоверны в зимний период январь—март, при этом на Европейском севере наблюдается устойчивое снижение температур, а в Сибири — их повышение. В летне-осенний период резкие колебания температур уменьшают достоверность трендов, за исключением Архангельска. Здесь тренды в этот период достоверны, что, возможно, связано со сглаживающим влиянием моря. Несмотря на наличие достоверных трендов среднемесячных температур, достоверные тренды среднегодовых температур прослеживаются не всегда. В первую очередь, тренды среднегодовых температур не достоверны в случаях, если тренды среднемесячных температур в течение года меняют знак. Например, на м/с Архангельск (0,8 м) или Таштып (3,2 м). Особый интерес представляет внутригодовое распределение направленности и величины трендов по глубинам. С глубиной колебания сглаживаются и четко прослеживается сдвиг пика во времени с увеличением глубины. При этом наблюдаются ситуации, когда в верхних горизонтах тренд отрицательный, а в нижних положительный — м/с Иркутск, май; Енисейск, август (см. рис. 1).

Таблица 1. Характеристика метеорологических станций

Метеостанция	Регион	Координаты			Почва
		с.ш.	в.д.	высота, м	
Архангельск	Европейский север, область сезонного промерзания, тайга	64°35'	40°30'	4	Торфяно-подзолисто-глебовая тяжелосуглинистая
Каргополь	Европейский север, область сезонного промерзания, тайга	61°30'	38°57'	121	Дерново-подзолистая среднесуглинистая
Зырянка	Якутия, тайга, переходный тип сезонного промерзания—оттаивания	65°44'	150°54'	43	Песчаная
Иркутск	Байкальский регион, область сезонного промерзания, тайга	52°17'	104°18'	467	Серая лесная легкосуглинистая
Туруханск	Средняя Сибирь, область островной мерзлоты, тайга	65°47'	87°57'	32	Подзолистая суглинистая
Енисейск	Средняя Сибирь, область сезонного промерзания, тайга	58°27'	92°09'	78	Дерново-подзолистая среднесуглинистая
Красноярск	Южная Сибирь, область сезонного промерзания, лесостепь	56°00'	92°53'	274	Чернозем оподзоленный среднесуглинистый
Таштып	Южная Сибирь, область сезонного промерзания, степь	52°48'	99°53'	455	Чернозем выщелоченный тяжелосуглинистый

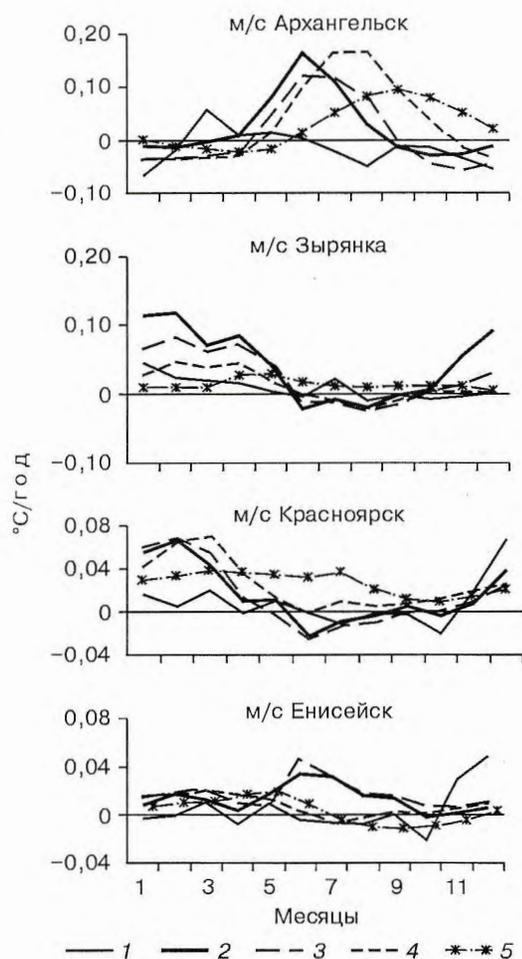


Рис. 1. Внутригодовое распределение величины и направленности трендов температур воздуха и почвы.

1 — температура воздуха. Температура почвы на глубинах: 2 — 0,4 м, 3 — 0,8 м, 4 — 1,6 м, 5 — 3,2 м.

М/с Зырянка. При неизменной среднегодовой температуре воздуха, среднегодовые температуры почвы на 0,4 м и других глубинах за более чем 50 лет наблюдений достоверно возросли. Лишь на 3,2 м они долгое время не менялись, пока не пересекли в 1985 г. нулевую изотерму в сторону положительных значений. Наибольшие изменения по глубинам происходят в период декабрь—май, соответствуя изменениям температур воздуха, а в летне-осенний период достоверных изменений нет. Среднеапрельские температуры воздуха выросли на доли градуса, а почвы на глубинах 0,4—1,6 м на 3—5 °С. Несмотря на тенденцию повышения июльских температур воздуха, на большинстве глубин температуры почвы несколько снижаются. На фоне плавного снижения октябрьских темпера-

тур воздуха, в почве на всех глубинах они незначительно растут [Gilichinsky et al., 1998].

М/с Иркутск. В воздухе и на всех глубинах за период с 1901 г. отмечен устойчивый рост среднегодовых температур. Внутригодовое распределение трендов на 0,4 м (см. рис. 2): повышение (резче, чем воздуха) температур зимне-весеннего периода (ноябрь—март) и, на грани достоверности, уменьшение среднемесячных температур в весенне-летний период. Направленность изменений температуры почвы совпадает с направленностью изменений температуры в воздухе, кроме мая, когда при незначительном повышении температуры воздуха, температура почвы падает. Средняя январская температура воздуха за период наблюдений выросла на 2 °С, температура почвы на глубинах 0,4 и 0,8 м поднялась более чем на 5 °С, а на 1,6 м на 2 °С. Средние температуры воздуха и почвы в апреле за этот период плавно выросли в среднем на 1 °С. Июльская температура воздуха снизилась незначительно, а температура почвы на глубине 0,4 м — более чем на 2 °С. На глубине 0,8 м изменения несутельственны, в то время как на 1,6—3,2 м прослеживается рост температуры. В справочниках отмечено нарушение однородности рядов температуры почвы в Иркутске в 1930 г., причина которого не выяснена. Проявляется оно в скачкообразном повышении средних температур, особенно в зимние месяцы на небольших глубинах. Поэтому более корректно отдельно анализировать ряды до и после 1930 г. Но и в этом случае картина качественно не меняется, хотя приросты температуры оказываются несколько меньше.

М/с Архангельск. Устойчивый положительный тренд среднегодовых температур почвы отмечен на глубинах 0,4 и 3,2 м, несмотря на значимую тенденцию к похолоданию в воздухе. Внутригодовое распределение температур почвы на 0,4 м не совпадает с динамикой температур воздуха и обратно восточно-сибирскому: падение температур в осенне-зимний период и их повышение в весенне-летний.

М/с Каргополь. Как и на расположенной в этом регионе м/с Архангельск, среднегодовые температуры воздуха понижаются, но менее существенно. На этом фоне среднегодовые температуры верхних горизонтов (0,4—1,6 м), как и на м/с Архангельск, несколько растут, но на глубине 3,2 м — незначительно снижаются. В январе и июле наблюдается некоторое понижение средних месячных температур воздуха, в отсутствие тренда изменения таковых для почвы. Достоверных трендов практически нет, несмотря на длительный период наблюдений.

Енисейский меридиан. М/с Туруханск. Период наблюдений 35 лет. На 0,4 м (и двух пос-

Таблица 2.

Оценка линейного тренда средних месячных и годовых температур воздуха и почв, °С/год

Станция	Глубина	Период	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	Год	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
Архангельск	Воздух	1927—1990	-0,066	-0,019	0,057	0,009	0,015	0,004	-0,021	-0,049	-0,011	-0,014	-0,034	-0,055	-0,021	
		040	1927—1990	-0,012	-0,013	-0,003	0,009	0,079	0,164	0,112	0,030	-0,014	-0,030	-0,027	-0,012	0,024
		080	1940—1990	-0,037	-0,034	-0,029	-0,018	0,047	0,120	0,122	0,077	0,001	-0,044	-0,056	-0,042	0,007
		160	1958—1990	-0,036	-0,036	-0,035	-0,028	0,020	0,100	0,164	0,165	0,097	0,039	-0,014	-0,033	0,030
		320	1958—1990	0,002	-0,012	-0,017	-0,021	-0,016	0,014	0,053	0,083	0,097	0,081	0,054	0,022	0,026
Каргополь	Воздух	1915—1990	-0,026	0,011	0,049	0,004	0,010	-0,004	-0,015	-0,012	-0,007	0,006	-0,019	-0,005	-0,005	
		040	1915—1990	0,005	0,008	0,008	0,005	0,008	0,010	0,011	0,003	-0,004	0,004	0,007	0,007	0,007
		080	1915—1990	0,007	0,005	0,005	0,007	0,022	0,013	0,008	0,011	0,003	0,003	0,006	0,005	0,011
		160	1915—1990	-0,002	-0,001	0,000	0,001	0,010	0,018	0,015	0,013	0,004	-0,001	-0,001	-0,002	0,005
		320	1915—1952	-0,003	-0,006	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	0,000	0,005	0,003	0,005	0,003	0,000	0,006
Зырянка	Воздух	1939—1990	0,045	0,023	0,020	0,015	0,004	-0,004	0,021	-0,009	-0,002	-0,008	-0,003	0,003	0,006	
		040	1939—1990	0,113	0,117	0,071	0,085	0,041	-0,022	-0,009	-0,019	-0,002	0,005	0,056	0,091	0,051
		080	1939—1990	0,066	0,083	0,060	0,073	0,044	-0,013	-0,014	-0,025	-0,016	0,002	0,012	0,032	0,020
		160	1939—1990	0,028	0,047	0,040	0,045	0,019	0,000	-0,011	-0,021	-0,010	0,001	0,001	0,002	0,012
		320	1939—1990	0,009	0,009	0,011	0,027	0,029	0,018	0,012	0,010	0,011	0,012	0,011	0,006	0,016
Иркутск	Воздух	1898—1990	0,023	0,020	0,039	0,008	0,009	-0,001	-0,007	-0,005	0,008	0,017	0,028	0,049	0,015	
		040	1931—1990	0,063	0,038	0,057	-0,001	0,019	-0,008	-0,013	0,003	0,016	0,004	0,065	0,082	0,025
		080	1898—1990	0,093	0,082	0,056	0,001	-0,033	-0,030	-0,025	-0,019	0,000	0,006	0,035	0,084	0,020
		160	1931—1990	0,063	0,061	0,047	-0,002	-0,030	-0,003	-0,030	-0,021	0,003	0,011	0,027	0,060	0,012
		320	1898—1990	0,079	0,077	0,053	0,013	-0,019	-0,024	-0,008	-0,009	-0,001	0,004	0,019	0,053	0,020
		040	1931—1990	0,015	0,017	0,021	0,006	-0,006	-0,001	0,001	-0,001	0,003	0,004	0,006	0,010	0,005
		080	1898—1990	0,021	0,024	0,022	0,015	0,010	0,018	0,029	0,009	0,004	0,005	0,009	0,015	0,016
Туруханск	Воздух	1953—1990	-0,069	0,066	-0,005	-0,025	0,039	0,002	-0,020	0,019	0,008	-0,014	0,084	0,113	0,018	
		040	1953—1990	0,098	0,095	0,086	0,048	-0,001	-0,021	-0,079	-0,053	0,004	0,007	0,006	0,054	0,020
		080	1953—1990	0,066	0,108	0,117	0,074	0,010	-0,021	-0,039	-0,051	-0,003	0,022	0,019	0,026	0,026
		160	1953—1990	0,023	0,022	0,016	0,015	0,010	0,004	0,032	0,008	0,000	0,014	0,020	0,015	0,029
		320	1953—1990	-0,001	0,000	-0,001	-0,007	-0,013	-0,023	-0,026	-0,012	-0,005	0,006	0,012	0,010	-0,002
Енисейск	Воздух	1920—1990	-0,003	-0,001	0,011	-0,007	0,009	-0,004	-0,006	-0,008	0,000	-0,021	0,029	0,049	0,004	
		040	1920—1990	0,008	0,017	0,013	0,004	0,017	0,034	0,032	0,016	0,014	-0,002	0,002	0,006	0,014
		080	1920—1990	0,014	0,020	0,020	0,009	0,009	0,047	0,031	0,018	0,017	0,007	0,007	0,011	0,021
		160	1936—1990	0,015	0,018	0,018	0,017	0,013	0,003	-0,006	-0,003	0,002	0,002	0,005	0,009	0,010
		320	1951—1990	0,006	0,009	0,010	0,016	0,018	0,008	-0,005	-0,011	-0,011	-0,009	-0,005	0,003	0,006

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Красноярск	Воздух	1916—1990	0,017	0,005	0,020	-0,001	0,010	-0,002	-0,011	-0,001	-0,002	-0,020	0,019	0,067	0,010
	040	1916—1990	0,055	0,067	0,044	0,009	0,011	-0,023	-0,009	-0,003	0,005	-0,003	0,008	0,039	0,016
	080	1916—1990	0,060	0,069	0,054	0,013	-0,003	-0,025	-0,013	-0,012	0,000	0,001	0,010	0,025	0,017
	160	1927—1990	0,041	0,065	0,069	0,036	0,013	-0,002	0,011	0,005	0,008	0,012	0,019	0,027	0,028
Таштып	320	1929—1990	0,029	0,034	0,038	0,038	0,035	0,033	0,038	0,021	0,012	0,010	0,015	0,021	0,032
	Воздух	1951—1990	0,040	0,035	0,045	0,026	0,011	-0,011	-0,006	-0,002	-0,006	0,014	0,057	0,052	0,021
	040	1931—1990	0,085	0,067	0,036	-0,006	-0,022	0,011	-0,007	0,015	0,019	0,032	0,037	0,054	0,032
	080	1951—1990	0,124	0,071	0,036	-0,008	-0,094	-0,004	-0,079	-0,075	-0,038	0,031	0,059	0,099	0,015
		1931—1990	0,027	0,037	0,035	0,007	-0,004	0,019	0,036	0,034	0,034	0,027	0,016	0,011	0,024
		1951—1990	0,038	0,034	0,027	0,009	-0,024	-0,056	-0,042	-0,040	-0,005	0,007	0,012	0,005	-0,004
		1951—1990	0,017	0,024	0,013	0,013	0,003	-0,042	-0,080	-0,069	-0,040	-0,016	0,005	0,014	-0,013
		1951—1990	0,008	0,013	0,017	0,018	0,014	-0,001	-0,035	-0,053	-0,051	-0,038	-0,019	-0,001	-0,014

Примечание. Выделенные величины статистически значимы при доверительной вероятности 95 %.

ледующих глубинах) среднегодовая температура почвы растет, а на 3,2 м незначительно падает. При этом средняя температура января и апреля на глубинах 0,4—1,6 м существенно возросла, а на глубине 3,2 м — слабый тренд в сторону понижения. В летнее время картина иная — средняя температура июля на 0,4 и 3,2 м снижается (в верхних горизонтах — существенно), а на 0,8 и 1,6 м изменения не достоверны.

М/с Енисейск. Значения среднегодовых температур на 0,4 м и 0,8 м, достоверно повышаются. В январе и апреле температура практически не меняется на 0,4 м и растет на более глубоких уровнях. Июльская температура, напротив, повышается в двух верхних горизонтах. Октябрьские температуры слабо меняются по глубинам.

М/с Красноярск. Наблюдения с 1916 г. Среднегодовые температуры почвы увеличиваются на всех глубинах, особенно на 3,2 и 1,6 м. Температуры января и апреля также устойчиво повышаются на всех глубинах, причем зимой это более четко проявляется в верхних горизонтах, а весной — в нижних. Июльские температуры отличает незначительное понижение на глубинах 0,4 и 0,8 м и резкий противоположный тренд на 3,2 м. Средние значения октябрьских температур практически не меняются [Gilichinsky et al., 1998].

М/с Таштып. Южная точка меридионального профиля в предгорьях. Многолетний ход температуры имеет существенную нелинейную (колебательную) составляющую. В 1930—1940 гг. преобладал рост температуры, в 1950—1960 гг. — понижение, а в 1970—1980 гг. — снова рост. Поэтому, хотя для отдельных месяцев и глубин получаются значимые линейные тренды, их величина и даже знак существенно зависят от выбранного для расчетов периода времени. Однако в целом зимой преобладает рост температуры, а летом — понижение (особенно после 1950 г.).

Первичный анализ рядов показывает, что тенденции изменений температур сезонной криолитозоны не повторяют изменений температур воздуха, и даже могут быть разнонаправленными во времени и пространстве. Так, в Восточной Сибири фиксируется тенденция роста зимних и снижения летних температур, а на Европейском севере на тех же глубинах четко прослеживается обратный тренд (см. рис. 1, 2). Тем не менее на большинстве рассмотренных станций и глубин среднегодовая температура почвы повышается вслед за температурой воздуха, причем иногда эта тенденция носит синусоидальный характер. Отличия во внутригодовой изменчивости температуры почв разных регионов говорят о процессах, формирующих динамику почвен-

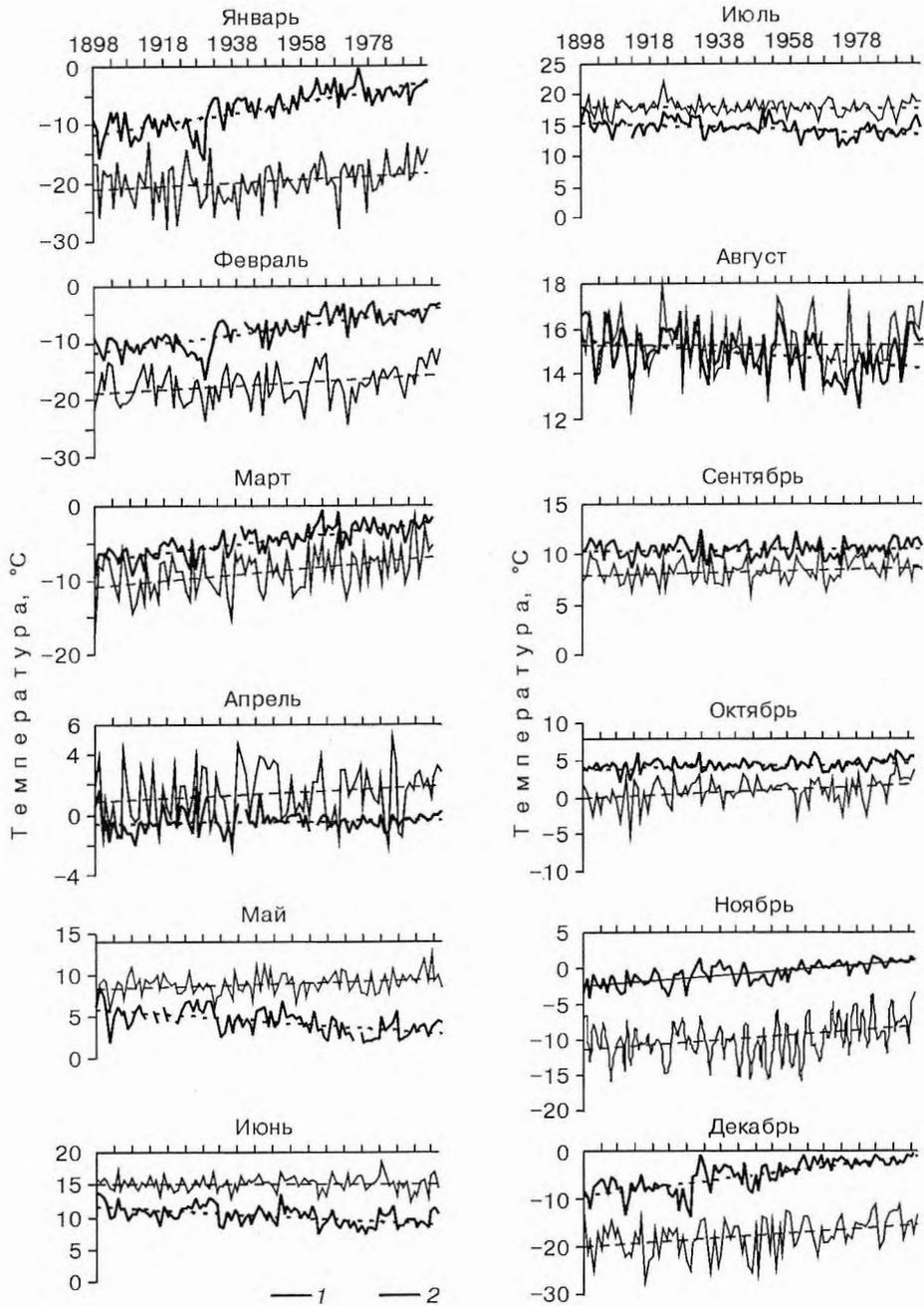


Рис. 2. Тренды среднемесячных температур воздуха и почвы на глубине 0,4 м на м/с Иркутск.

1 — температура воздуха, 2 — температура почвы на глубине 0,4 м.

ных температур, помимо привычных изменений температур воздуха. Это инерция, связанная со свойствами почвенно-грунтового комплекса и с сезонными явлениями, например, динамикой и количеством твердых и жидких осадков. Так, апрельские температуры почв во многом обусловлены зимними температурами и льдистостью

деятельного слоя; летние, в частности, скоростью весеннего снеготаяния; осенние и зимние — количеством дождевых осадков, датами установления устойчивого снежного покрова. Эти параметры и процессы промерзания—оттаивания resultируются в фазовых переходах вода—лед и обратно, являющимися основным регулятором

почвенного климата. Вместе со сдвигом проникновения температур во времени и по глубинам, это приводит к тому, что динамика температур почвы не одинакова в различных регионах сезонной криолитозоны, на разных отрезках времени и глубинах. В основном рост среднегодовых температур почвы обусловлен здесь ростом их зимних значений, несмотря на тренды к понижению в теплое время года.

В области вечной мерзлоты, где большая часть приходящей летом энергии расходуется на сезонное протаивание и лето короче по продолжительности, различия в трендах температур воздуха и почвы могут быть более значительны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для оценки эффекта глобального потепления тренды температур почвы более устойчивы и объективны, чем направленность изменений температуры воздуха. Представляя собой интегральный эффект многофакторного влияния, температура почв более реально отражает вековую историю климата на Земле и важна для установления корреляций в системе воздух—почва—мерзлота и количественной оценки роли фазовых переходов и инерционности почв. Массовые наблюдения за температурой почв начаты в 1930—1950 гг. В Справочниках... [1964—1966] и работах, посвященных температуре почв [Колосков, 1946; Димо, 1972; Шкадова, 1979], приведены результаты их обработки по 1960-е годы. Данные наблюдений до 1990-х гг. увеличивают длину рядов в 2 раза, и их обработка позволяет выявить важные закономерности [Васильев, 1999]. В завершеном виде база по температуре почв будет сочетаться с данными по воздуху, снежному покрову, влажности и глубине промерзания почв. С учетом метеорологической сети в странах СНГ, Китае, отдельных точек в Скандинавии и Монголии, это большая часть Евразии от арктических равнин до высокогорий и пустынь, включая сельскохозяйственные и природные зоны (для Америки данных нет). Это позволит восстановить вековую историю почвенного климата в различных регионах, оценить реакцию деятельного слоя на флуктуации климата в атмосфере и антропогенные факторы, создавать прогностические модели.

Работа выполнена за счет средств Федеральной программы Министерства науки и технологий России „Исследования Мирового океана, Арктики и Антарктики“, грантов РФФИ (98-05-

64968) и Национального научного фонда США (NSF-OPP 96-14557). Авторы благодарны Федеральной Гидрометеорологической службе России за справочные материалы.

Литература

- Васильев И. С. Реакция термического режима почвогрунтов Якутии на современные изменения климата // Метеорология и гидрология, 1999, № 3, с. 98—105.
- Веселовский К. С. О климате России. СПб., Императорская Академия Наук, 1857, с. 148—159.
- Девис Дж. Статистика и анализ геологических данных. М., Мир, 1977, 571 с.
- Димо В. Н. Тепловой режим почв СССР. М., Колос, 1972, 360 с.
- Климатологический Справочник СССР: Метеорологические данные за отдельные годы. Вып. 1-27, ч. VII. Температура почвы, туманы, грозы, метели и град. Л., Гидрометеиздат, 1960—1964.
- Климатологический Справочник СССР: История и физико-географическое описание метеорологических станций. Л., Гидрометеиздат, вып. 1-34, 1964—1972.
- Исаев А. А. Статистика в метеорологии и климатологии. М., Изд-во МГУ, 1988, 245 с.
- Колосков П. И. Почвенная климатология // Почвоведение, 1946, № 3, с. 159—163.
- Метеорологический ежегодник. Л., Гидрометеиздат, вып. 1-36, ч. II. 1960—1990, № 1—13.
- Методы климатологической обработки метеорологических наблюдений // Под ред. О. А. Дроздова. Л., Гидрометеиздат, 1957.
- Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3, ч. 1. Л., Гидрометеиздат, 1946; 1954; 1958; 1969; 1985.
- Нездюров Д. Ф. Очерк истории метеорологических наблюдений в России. Л., Гидрометеиздат, 1967, 187 с.
- Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях / Под ред. В. А. Кудрявцева. М., Изд-во МГУ, 1974, 431 с.
- Павлов А. В. Теплообмен промерзающих и протаивающих грунтов с атмосферой. М., Наука, 1965, 254 с.
- Павлов А. В. Закономерности формирования криолитозоны при современных изменениях климата // Изв. РАН., сер. геогр., 1997, № 4, с. 61—75.
- Справочник по климату СССР. Вып. 1—34, ч. 2. Температура воздуха и почвы. Л., Гидрометеиздат, 1964—1966.
- Справочник по климату СССР: Метеорологические данные за отдельные годы. Вып. 1—34, ч. VIII. Температура почвы. Л., Гидрометеиздат, 1970—1978.
- Фельдман Г. М. Методы расчета температурного режима мерзлых грунтов. М., Наука, 1973, 254 с.
- Шкадова А. К. Температурный режим почв на территории СССР. Л., Гидрометеиздат, 1979, 240 с.
- Gilichinsky D. A., Barry R. G., Bykhovets S. S. et al. A century of temperature observation of soil climate: methods of analysis and long-term trends // The 7th Int. Permafrost Conference. Proceedings. Yellowknife, Canada, 1998, p. 313—317.

Поступила в редакцию
24 февраля 2000 г.