

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗ

УДК 551.525

**СРАВНЕНИЕ ДАННЫХ РЕАНАЛИЗА NCEP/NCAR ПРОФИЛЕЙ
ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЧВЫ С ДАННЫМИ ИЗМЕРЕНИЙ СЕТИ СТАНЦИЙ
НА ТЕРРИТОРИИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

С.Ю. Золотов, И.И. Ипполитов, С.В. Логинов, И.О. Лучицкая*, Н.И. Белая*

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
634021, Томск, пр. Академический, 10/3, Россия, zolotov@asu.tusur.ru*

** Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт,
630099, Новосибирск, ул. Советская, 30, Россия*

Приводятся результаты валидации данных реанализа NCEP/NCAR¹ по профилям температуры почвы (в слое 0–10, 10–200 и 300 см) на основе инструментальных измерений (глубины 0, 20, 40, 80, 160 и 320 см) 27 станций на территории ответственности Западно-Сибирского межрегионального территориального управления Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Показано, что реанализ воспроизводит пространственно-временное распределение температуры деятельного слоя почвы с определенными отклонениями: в слое 0–10 см зимой температура завышена, а летом, наоборот, занижена; в переходные сезоны расхождения минимальны. В слое 10–200 см отмечена более низкая температура почвы во все сезоны. Вместе с тем выявлена тесная корреляционная связь между средними месячными значениями температуры почвы слоя 0–10 см (реанализ) и температуры поверхности почвы (данные наблюдений). В слое 10–200 см преобладают незначимые коэффициенты корреляции для зимнего периода, а статистически обеспеченные показатели связи зафиксированы лишь в отдельные месяцы переходных сезонов. Предлагается корректирующая функция для приведения профилей температуры почвы реанализа к данным сетевых наблюдений.

Температура почвы, данные реанализа, инструментальные измерения на сети станций

**COMPARISON OF THE SOIL TEMPERATURE PROFILES BASED ON WEST-SIBERIAN STATION
NETWORK MEASUREMENTS AND THE DATA OF THE NCEP/NCAR REANALYSIS**

S.Yu. Zolotov, I.I. Ippolitov, S.V. Loginov, I.O. Luchitskaya*, N.I. Belaya*

*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, SB RAS,
634021, Tomsk, Akademicheskyy pr., 10/3, Russia, zolotov@asu.tusur.ru*

** Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute, 630099, Novosibirsk, Sovetskaya str., 30, Russia*

Comparison of the soil temperature profiles based on West-Siberian station network measurements and the data of the NCEP/NCAR reanalysis has been made. The data of the soil temperature measurements levels were taken at depths of 0, 20, 40, 80, 160, 320 cm and the data of the reanalysis layers were taken at depths of 0–10, 10–200, 300 cm. The analysis has demonstrated that the data of the reanalysis during the winter time period yield the overestimated values, and in the summer time period, underestimated values for the 0–10 cm layer at high correlation coefficients. The data of the reanalysis are always underestimated for the 10–200 cm layer. For these reasons, the correction function between the data of the reanalysis and the data of measurements has been defined.

Soil temperature, data of reanalysis, station network measurements

ВВЕДЕНИЕ

Исследование долговременных тенденций температуры на различных глубинах деятельного слоя почвы занимает важное место в проектах, посвященных динамике криосферы в условиях

глобального потепления [Гиличинский и др., 2000; Павлов, Малкова, 2005; Васильев и др., 2008; Оценочный доклад..., 2008; Павлов, 2008; Шерстюков, 2009]. Как отмечено в [Израэль и др., 2002], значи-

¹ National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research.

тельное потепление климата на севере России может вызвать неблагоприятные экологические, геологические и социальные последствия.

Северные территории Западной Сибири представлены районами со сплошной, прерывистой и островной мерзлотой, где расположено большое количество объектов нефтегазовой промышленности, транспортирующих топливо за пределы региона. Один из магистральных газопроводов “Алтай” пройдет из Западной Сибири в Китай по территории Томской, Новосибирской областей, Алтайскому краю и Республике Алтай. Последний регион характеризуется наличием ареалов многолетней мерзлоты [Геокриология..., 1989].

Прогнозные оценки динамики криолитозоны в настоящее время делаются на основе выявленных трендов по данным измерений температуры почвы на различных уровнях и трендов двух важнейших предикторов – температуры воздуха на уровне 2 м и высоты снежного покрова. Решение этой важной задачи ограничено достаточно редкой сетью станций (ст.) наблюдений.

В 1990-х гг. в нескольких климатических центрах США и Европы начали интенсивно разрабатываться глобальные и региональные базы данных по радиационным потокам, облачности, водяному пару, характеристикам криосферы. Координация работ Всемирной программой исследования климата способствовала созданию реанализов – динамически согласованных глобальных полей, характеризующих состояние атмосферы. Архивы реанализов широко используются в научных исследованиях [Переведенцев, 2004; Дюкарев и др., 2006; Serreze et al., 2000].

Среди выходных продуктов одного из наиболее распространенных видов реанализа NCEP/NCAR [Kalnay et al., 1996] имеются данные о средней температуре в слоях 0–10 и 10–200 см и на уровне 300 см.

Сеть станций Росгидромета обеспечивает регулярные инструментальные измерения температуры почвы на глубинах 5, 10, 15, 20 см в теплый период над оголенной поверхностью и на уровнях 20, 40, 80, 120, 160, 240 и 320 см под естественным покровом в течение всего года [Гиличинский и др., 2000]. Отметим, что наблюдения за температурой поверхности почвы/снега проводятся над оголенной поверхностью также в течение года.

Целью работы является оценка и корректировка характеристик термического состояния слоев почвы по результатам реанализа относительно инструментальных измерений на сети станций территории юго-востока Западной Сибири. В качестве исходных данных использованы ряды температуры почвы 27 станций Томской, Новосибирской, Кемеровской областей, Алтайского края и Республики Алтай. Прямоугольный охват территории: 76°01'–88°40' в.д. и 50°00'–60°26' с.ш.

Сетка координат реанализа, охватывающая указанные метеостанции, следующая: 75°–90° в.д. с шагом 1,875° (9 точек), 48,57°–61,90° с.ш. с шагом 1,9° (8 точек). Следовательно, исследуемая территория содержит 72 узла реанализа. Вычисление значений реанализа в координатах станции проведено с использованием линейной двумерной интерполяции.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И СПОСОБЫ ИХ ОБРАБОТКИ

Для исследования привлечены данные измерений температуры почвы (глубины 0, 20, 40, 80, 160 и 320 см) и результаты реанализа (температура почвы слоев 0–10, 10–200 см и на глубине 300 см) за период с января 1963 г. по декабрь 2007 г. Ввиду несовпадения указанных слоев почвы подобраны следующие их границы: слою 0–10 см условно соответствует уровень поверхности почвы (хотя такое сопоставление не совсем корректно), для слоя 10–200 см взят диапазон глубин 20–160 см, данные измерений которого были преобразованы в средневзвешенное значение температуры. Температурный режим почвы на уровне 300 и 320 см сравнивали непосредственно.

Учитывая наличие пропусков в метеорологической информации, а также разную продолжительность года (365 и 366 дней), ежедневные данные температуры почвы приводились к рядам среднемесячных значений, которые затем использовались для расчета статистик (среднее, среднеквадратичное отклонение, коэффициент корреляции между данными реанализа и измерениями).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ временных рядов среднемесячных значений температуры почвы по данным наблюдений показывает неоднородный характер по географическому распределению величин линейных трендов. Тем не менее по найденным значениям можно выделить ряд характерных особенностей трендов рассматриваемых регионов.

Для Новосибирской, Томской и Кемеровской областей отрицательное значение тренда температуры поверхности почвы отмечается в апреле, июле и сентябре, причем на большинстве станций максимальное (по модулю) значение фиксируется в сентябре. В среднем для этих месяцев величина тренда составляет $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ лет})$, а максимальное (по модулю) значение наблюдается на станции Баган (Новосибирская область) и составляет $-1,3\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ лет})$. Для этих областей значения положительного тренда, превышающие $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ лет})$, наблюдаются в феврале, мае и августе с максимальными значениями указанных величин трендов в мае. По данному показателю выделяются две станции: ст. Тяжин (Кемеровская

область) с трендом $2,18\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ лет})$ и ст. Первомайское (Томская область) с величиной тренда, равной $1,89\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ лет})$.

В слое 20–160 см отрицательные значения трендов зафиксированы только на двух станциях Томской области: ст. Томск с величиной тренда, равной $-0,21\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ лет})$ в июле, и ст. Усть-Озерное с трендом $-0,12\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ лет})$ в декабре. На остальных станциях этих областей значения положительных трендов находятся на уровне $0,1\text{--}0,3\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ лет})$ независимо от месяца года, за исключением станций Коченево, Посевная, Барабинск (Новосибирская область), Киселевск (Кемеровская область), Бакчар и Первомайское (Томская область), где величины трендов составляют $0,85\text{--}1,25\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ лет})$ преимущественно в июне. На глубине 320 см наблюдается небольшой положительный тренд со средним значением $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ лет})$ в течение всего года. Для данного слоя можно отметить небольшой отрицательный тренд $-0,11\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ лет})$ на ст. Томск в августе и

сентябре, а также на станциях Коченево, Посевная (Новосибирская область), Кемерово, Киселевск (Кемеровская область) и Парабель (Томская область) наличие величин июльских трендов в диапазоне $0,55\text{--}0,70\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ лет})$.

Для станций Алтайского края и ст. Усть-Кокса Республики Алтай отрицательные тренды температуры поверхности почвы наблюдаются в марте, июле и сентябре с максимальными (по модулю) величинами в среднем $-0,4\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ лет})$ в июле, за исключением ст. Ребриха, где величина тренда составляет $-1,09\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ лет})$. Положительные тренды имеют место в феврале, апреле, мае, августе и октябре с максимальными значениями в основном в феврале и августе. Величины трендов лежат в диапазоне $0,82\text{--}1,1\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ лет})$. Исключением является ст. Ребриха, где положительные значения трендов не превышают $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ лет})$.

В слое 20–160 см на всех станциях Алтайского края отсутствуют отрицательные значения трендов, однако в июле и декабре эти величины не

Таблица 1. Разность (ΔT , $^{\circ}\text{C}$) между средними месячными значениями температуры почвы по реанализу (T_p) и инструментальным наблюдениям (T_n)

№ п/п	Станция	Слой 0–10 см				Слой 10–200 см			
		I	IV	VII	X	I	IV	VII	X
<i>Томская область</i>									
1	Александровское	9,9	-4,5	-10,5	-0,9	-9,1	-5,4	-2,5	-2,8
2	Напас	10,5	-3,6	-8,9	0,1	-8,3	-4,7	-2,8	-1,5
3	Средний Васюган	10,3	-3,1	-11,3	-0,6	-7,8	-4,3	-3,1	-1,9
4	Усть-Озерное	9,1	-4,8	-12,9	-1,3	-7,0	-4,9	-7,2	-1,2
5	Парабель	10,3	-3,6	-10,8	-0,9	-6,7	-3,4	-2,6	-1,0
6	Старица	10,7	-2,9	-11,5	-0,7	-6,9	-3,3	-2,1	-1,2
7	Пудино	9,6	-4,1	-11,0	-1,2	-6,5	-2,9	-1,4	1,0
8	Первомайское	8,9	-6,5	-15,0	-2,2	-5,7	-3,1	-3,9	-1,3
9	Бакчар	8,4	-4,3	-11,9	-2,0	-7,0	-3,5	-2,0	-0,6
10	Томск	8,1	-4,3	-12,3	-1,9	-7,2	-3,6	-3,2	-1,5
<i>Новосибирская область</i>									
11	Северное	7,9	-1,3	-12,7	-2,7	-6,7	-2,9	-2,4	-0,5
12	Барабинск	8,2	-5,0	-13,7	-2,8	-5,5	-1,9	-1,0	-0,1
13	Коченево	6,9	-7,5	-14,7	-3,7	-4,7	-2,8	-3,2	-0,2
14	Посевная	7,3	-4,7	-13,7	-2,2	-5,9	-2,5	-2,5	0,2
15	Баган	8,7	-5,6	-13,1	-3,9	-4,0	-1,4	-2,6	0,8
<i>Кемеровская область</i>									
16	Тяжин	7,0	-5,8	-15,4	-2,4	-6,0	-3,2	-2,1	-1,6
17	Кемерово	8,3	-5,2	-16,5	-3,4	-6,3	-3,0	-3,0	-2,0
18	Киселевск	5,5	-9,7	-16,5	-4,6	-5,0	-3,4	-2,4	-3,5
19	Кузнецово	5,2	-6,9	-16,9	-5,7	-9,7	-6,1	-5,8	-7,2
<i>Алтайский край</i>									
20	Ребриха	6,9	-7,6	-16,6	-4,1	-4,2	-1,8	-5,5	-0,8
21	Славгород	8,6	-9,9	-16,3	-5,0	0,1	-1,0	-5,1	1,8
22	Бийск, Зональная	6,2	-8,9	-19,5	-6,0	-5,6	-3,4	-5,3	-4,9
23	Родионо	8,5	-7,6	-14,7	-3,7	-0,5	-0,1	-2,5	2,2
25	Рубцовск	7,5	-8,3	-14,8	-4,9	-1,8	-1,2	-3,2	0,5
<i>Республика Алтай</i>									
26	Усть-Кокса	2,8	-18,0	-19,0	-11,2	-10,1	-10,5	-9,7	-7,5
27	Кош-Агач	2,1	-30,1	-24,8	-18,0	-10,3	-13,1	-12,3	-8,7

превышают $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ лет})$. Максимальные значения трендов наблюдаются на ст. Бийск-Зональная ($1,1\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ лет})$ в мае), ст. Родино ($0,84\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ лет})$ в мае) и на ст. Славгород ($1,24\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ лет})$ в феврале). На глубине 320 см средние величины трендов во все месяцы года составляют $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ лет})$, за исключением ст. Родино ($0,49\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ лет})$ в мае), Бийск-Зональная ($0,61\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ лет})$ в июле) и ст. Славгород ($0,6\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ лет})$ в июне).

Совсем другую картину можно наблюдать на станции Кош-Агач Республики Алтай. Значения температуры поверхности почвы не имеют отрицательных трендов, а с февраля по октябрь величины трендов превышают значение $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ лет})$ с максимумом $1,53\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ лет})$ в марте. В слое 20–160 см значения трендов превышают $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ лет})$ во все месяцы, с максимумом $2,53\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ лет})$ в феврале. На глубине 320 см наблюдаются положительные значения трендов с максимумом $0,55\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ лет})$ в марте и апреле.

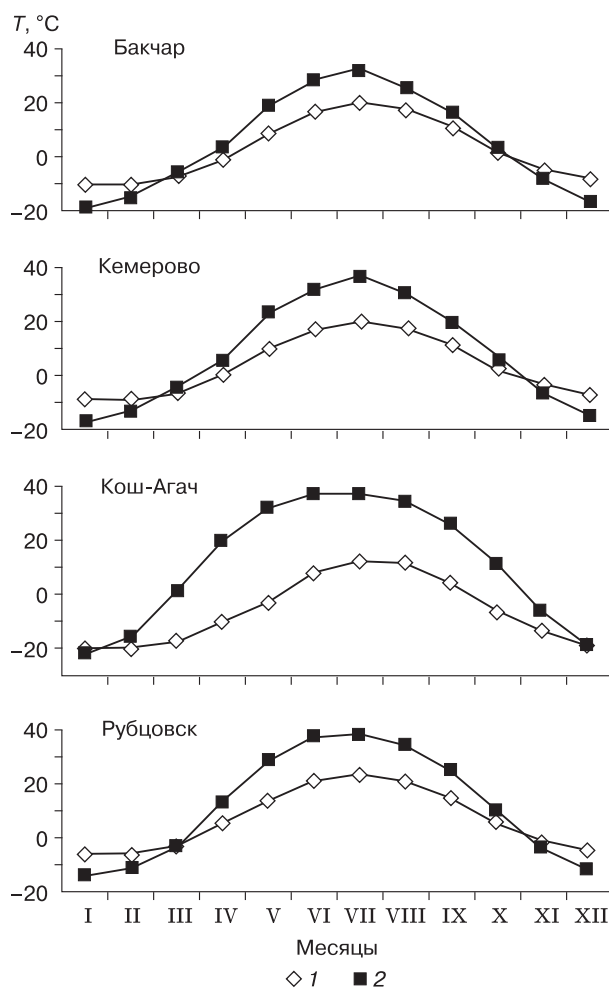


Рис. 1. Годовой ход температуры почвы (T) по данным реанализа (1) и инструментальных измерений (2) (слой 0–10 см).

Сопоставление статистических характеристик температуры почвы в исследуемых слоях показало, что реанализ воспроизводит их пространственно-временное распределение с определенными отклонениями ($\Delta T = T_p - T_n$, где T_p – температура почвы по реанализу, $^{\circ}\text{C}$; T_n – температура почвы по инструментальным наблюдениям, $^{\circ}\text{C}$). Так, в слое 0–10 см зимой температура завышена примерно на 5–10 $^{\circ}\text{C}$, причем наибольшие расхождения характерны для северных районов территории (табл. 1). В остальное время года температура оказывается заниженной, максимальные отклонения приходятся в основном на июль (11–16 $^{\circ}\text{C}$). В целом годовой ход среднемесячной температуры в данных реанализа является меньшим по амплитуде, чем на поверхности почвы (см. рис. 1). В слое 10–200 см температура почвы занижена во все сезоны, но с меньшей величиной погрешности.

Изменчивость среднемесячной температуры в слое 0–10 см по реанализу в 2–3 раза меньше, чем по инструментальным измерениям (рис. 2). Кроме того, если годовой ход среднеквадратичного отклонения температуры почвы (СКО) по фактическим данным выражен достаточно четко (максимум в июле), то по реанализу он практически отсутствует.

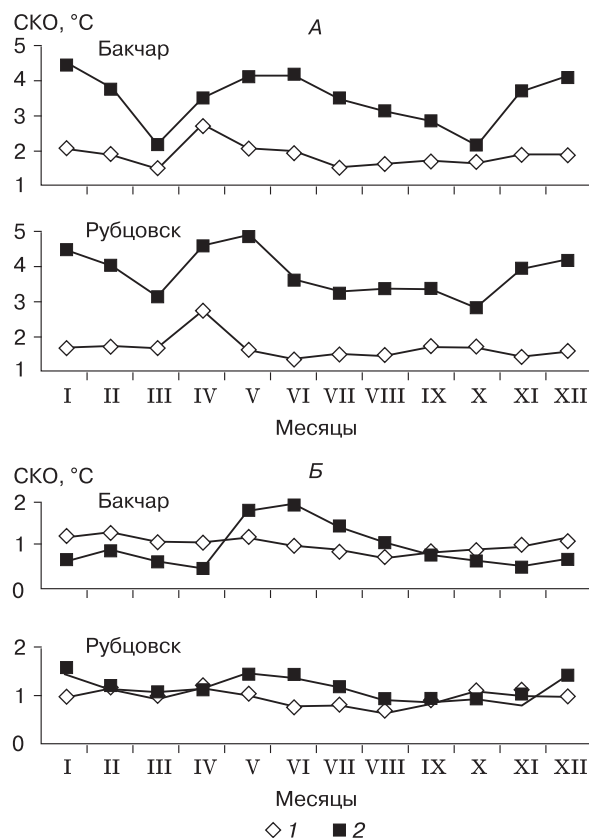


Рис. 2. Среднеквадратичное отклонение температуры почвы (СКО) по данным реанализа (1) и инструментальным наблюдениям (2).

А – слой 0–10 см; Б – слой 10–200 см.

Таблица 2. Коэффициент корреляции* между средней месячной температурой почвы по данным реанализа и реальным измерениям в слое 0–10 см (верхняя строка) и 10–200 см (нижняя строка)

Станция	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<i>Томская область</i>												
Александровское	0,95	0,90	0,87	0,82	0,76	0,88	0,83	0,85	0,91	0,81	0,91	0,93
	0,35	0,65	0,66	0,37	0,55	0,68	0,55	0,49	0,65	0,69	0,70	0,50
Напас	0,86	0,90	0,90	0,79	0,72	0,90	0,82	0,88	0,86	0,84	0,86	0,73
	0,43	0,56	0,49	0,31	0,62	0,65	0,58	0,65	0,75	0,67	0,56	0,60
Средний Васюган	0,91	0,82	0,89	0,67	0,59	0,89	0,78	0,82	0,88	0,80	0,91	0,90
	0,33	0,60	0,57	0,53	0,78	0,79	0,66	0,67	0,67	0,65	0,73	0,37
Усть-Озерное	0,92	0,93	0,83	0,80	0,66	0,75	0,78	0,75	0,72	0,83	0,93	0,90
	0,47	0,72	0,77	0,87	0,76	0,84	0,69	0,29	0,78	0,76	0,66	0,54
Парабель	0,93	0,93	0,84	0,72	0,82	0,83	0,78	0,90	0,86	0,84	0,72	0,93
	0,19	0,31	0,41	0,52	0,73	0,61	0,54	0,61	0,69	0,59	0,46	0,16
Старица	0,93	0,93	0,90	0,67	0,83	0,84	0,72	0,84	0,87	0,85	0,89	0,85
	0,26	0,51	0,63	0,45	0,70	0,70	0,53	0,43	0,73	0,70	0,69	0,43
Пудино	0,94	0,93	0,85	0,73	0,71	0,82	0,70	0,83	0,81	0,80	0,90	0,94
	0,27	0,45	0,43	0,44	0,73	0,65	0,46	0,19	0,57	0,62	0,63	0,17
Первомайское	0,94	0,95	0,87	0,68	0,82	0,79	0,80	0,83	0,77	0,79	0,94	0,93
	0,31	0,44	0,43	0,62	0,73	0,78	0,63	0,56	0,79	0,59	0,49	0,35
Бакчар	0,94	0,90	0,79	0,50	0,80	0,72	0,71	0,78	0,78	0,78	0,92	0,93
	0,47	0,42	0,52	0,59	0,60	0,68	0,48	0,55	0,74	0,59	0,53	0,57
Томск	0,95	0,94	0,84	0,54	0,81	0,71	0,77	0,81	0,78	0,81	0,95	0,93
	0,26	0,50	0,40	0,67	0,65	0,48	0,30	0,25	0,54	0,57	0,46	0,12
<i>Новосибирская область</i>												
Северное	0,93	0,94	0,97	0,85	0,97	0,89	0,88	0,91	0,77	0,91	0,98	0,96
	0,61	0,52	0,41	0,71	0,70	0,64	0,52	0,63	0,77	0,74	0,45	0,41
Барабинск	0,94	0,93	0,71	0,62	0,72	0,76	0,75	0,82	0,76	0,73	0,86	0,94
	0,48	0,49	0,62	0,49	0,70	0,73	0,50	0,49	0,74	0,77	0,70	0,40
Коченево	0,93	0,93	0,76	0,55	0,82	0,83	0,78	0,75	0,80	0,77	0,90	0,93
	0,55	0,64	0,72	0,48	0,63	0,83	0,74	0,57	0,73	0,78	0,57	0,45
Посевная	0,94	0,93	0,72	0,53	0,80	0,84	0,83	0,78	0,80	0,75	0,93	0,91
	0,23	0,33	0,53	0,33	0,67	0,78	0,70	0,55	0,78	0,77	0,64	0,35
Баган	0,95	0,94	0,74	0,54	0,65	0,68	0,58	0,56	0,81	0,73	0,85	0,93
	0,35	0,49	0,57	0,46	0,58	0,65	0,20	0,43	0,76	0,77	0,61	0,28
<i>Кемеровская область</i>												
Тяжин	0,94	0,95	0,85	0,63	0,80	0,82	0,83	0,82	0,83	0,81	0,94	0,92
	0,21	0,26	0,40	0,32	0,58	0,65	0,59	0,56	0,73	0,57	0,38	0,00
Кемерово	0,93	0,93	0,83	0,33	0,73	0,76	0,79	0,81	0,79	0,78	0,83	0,92
	0,11	0,33	0,61	0,32	0,68	0,84	0,57	0,81	0,83	0,80	0,67	0,31
Киселевск	0,91	0,92	0,69	0,38	0,72	0,51	0,57	0,82	0,79	0,73	0,92	0,91
	0,41	0,68	0,78	0,58	0,50	0,65	0,32	0,28	0,79	0,76	0,69	0,62
Кузнецово	0,92	0,88	0,76	0,52	0,71	0,59	0,74	0,79	0,83	0,79	0,91	0,88
	0,00	0,35	0,50	0,40	0,61	0,62	0,48	0,47	0,71	0,78	0,71	0,33
<i>Алтайский край</i>												
Ребриха	0,88	0,78	0,42	0,25	0,60	0,73	0,52	0,54	0,76	0,75	0,88	0,77
	0,25	0,26	0,35	0,26	0,62	0,80	0,21	0,15	0,62	0,72	0,45	0,35
Славгород	0,94	0,89	0,64	0,46	0,69	0,71	0,47	0,72	0,79	0,68	0,80	0,90
	0,58	0,69	0,84	0,68	0,65	0,43	0,13	0,30	0,62	0,64	0,65	0,58
Бийск, Зональная	0,88	0,86	0,66	0,48	0,71	0,58	0,64	0,83	0,81	0,80	0,90	0,88
	0,33	0,39	0,51	0,24	0,36	0,43	0,39	0,43	0,69	0,75	0,46	0,33
Родионо	0,95	0,93	0,77	0,44	0,77	0,76	0,76	0,70	0,80	0,77	0,79	0,81
	0,64	0,73	0,83	0,52	0,80	0,12	0,00	0,10	0,66	0,79	0,59	0,62
Рубцовск	0,92	0,90	0,67	0,44	0,72	0,66	0,63	0,70	0,88	0,76	0,86	0,86
	0,54	0,64	0,84	0,33	0,68	0,22	0,37	0,30	0,82	0,89	0,76	0,64

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<i>Республика Алтай</i>												
Усть-Кокса	0,86	0,89	0,65	0,38	0,54	0,40	0,52	0,53	0,64	0,50	0,67	0,87
	0,24	0,00	0,35	0,47	0,41	0,55	0,00	0,21	0,57	0,67	0,34	0,29
Кош-Агач	0,45	0,52	0,08	0,11	0,26	0,00	0,13	0,50	0,43	0,30	0,60	0,59
	0,07	0,24	0,41	0,55	0,28	0,03	0,06	0,38	0,73	0,57	0,20	0,07

* Значимые коэффициенты корреляции превышают величину 0,54 (уровень значимости 0,95).

симум зимой и летом, минимум в переходные сезоны), то по реанализу, отражающему режим температуры в верхнем слое (0–10 см), он практически отсутствует. Закономерно, что изменчивость температуры с глубиной ослабевает и мало меняется в течение года.

В табл. 2 представлены коэффициенты корреляции между рядами среднемесячных температур почвы по данным наблюдений и реанализа. Как видно, имеется достаточно тесная связь между температурами в слое 0–10 см. Зимой коэффициенты корреляции повсеместно не ниже 0,9, в остальное время года они варьируют в пределах 0,7–0,8 с минимальными значениями порядка 0,5 в апреле. Незначимые коэффициенты корреляции отмечаются единичными станциями и, как правило, в апреле. Что касается слоя 10–200 см, то здесь в зимний период преобладают незначимые коэффициенты корреляции, а статистически обеспеченные показатели связи зафиксированы лишь в отдельные месяцы переходных сезонов: май, сентябрь, октябрь. На глубине 300 см температура почвы в реанализе представлена константой за весь период наблюдений, ввиду чего оценки температурного режима этого уровня не могли быть выполнены. В горных районах Республики Алтай (Усть-Кокса, Кош-Агач) реанализ неадекватно воспроизводит годовой ход теплового состояния слоев почвы по показателям корреляционной связи, что подтверждается преобладанием незначимых коэффициентов корреляции.

Расчет величин трендов по данным реанализа дает картину, отличную от результатов анализа величин трендов по данным наблюдений. Реанализ четко выделяет Республику Алтай. В этом регионе в мае и июне значения трендов температуры поверхности почвы являются отрицательными и составляют $-0,4$ °C/(10 лет), а максимальный положительный тренд можно отметить только в феврале на ст. Усть-Кокса равный $0,54$ °C/(10 лет) и в апреле на ст. Кош-Агач равный $0,77$ °C/(10 лет). В слое 10–200 см значения тренда не превышают $0,1$ °C/(10 лет), а в июне на ст. Кош-Агач фиксируется отрицательное значение $-0,17$ °C/(10 лет).

Для остальных районов юга Западной Сибири наблюдается следующая картина по распределению значений трендов. На поверхности поч-

вы значения трендов превышают величину $0,5$ °C/(10 лет) в феврале, мае, августе и октябре с максимальными значениями $0,60$ – $0,75$ °C/(10 лет) в мае. Можно четко выделить и апрель, где значения трендов не превышают $0,1$ °C/(10 лет), а на ст. Посевная (Новосибирская область) это значение даже отрицательно $-0,11$ °C/(10 лет). В слое 10–200 см отсутствие тренда можно наблюдать в декабре и январе, а максимальные величины трендов не превышают $0,4$ °C/(10 лет) (они фиксируются в северных районах Томской области на станциях Александровское и Напас в июне).

Тренд среднегодовой температуры поверхности почвы по реанализу составляет $0,26$ – $0,36$ °C/(10 лет), за исключением Республики Алтай ($0,11$ – $0,17$ °C/(10 лет)). Значения среднегодовых трендов температуры поверхности почвы по измерениям варьируют от $-0,28$ °C/(10 лет) на ст. Ребриха до $1,04$ °C/(10 лет) на ст. Рубцовск. Аналогичная картина наблюдается и при сравнении значений среднегодовых трендов по реанализу и измерениям в слое 10–200 см. По реанализу диапазон изменений составляет $0,17$ – $0,28$ °C/(10 лет), за исключением Республики Алтай, где тренд отсутствует, а по измерениям эти значения варьируют от нуля (станции Томск, Усть-Озерное, Усть-Кокса, Баган, Ребриха) до $0,8$ °C/(10 лет) (ст. Змеиногорск) и 1 °C/(10 лет) (ст. Кош-Агач). По измерениям значения трендов среднегодовой температуры почвы на глубине 320 см составляют от нуля (станции Томск, Усть-Озерное, Усть-Кокса) до $0,5$ °C/(10 лет) (станции Кемерово, Киселевск, Парабель, Славгород).

КОРРЕКТИРОВКА ДАННЫХ РЕАНАЛИЗА ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ

Для устранения погрешностей реанализа предлагается ввести корректирующую функцию $\varphi(t)$, применение которой к ряду реанализа делало бы значения температуры почвы более близкими к измеренным значениям:

$$\begin{aligned}\varphi(t) &= k_0 + k_1 t, \\ k_0 &= M_0 - k_1 U,\end{aligned}\quad (1)$$

где t – время, лет; M_0 – математическое ожидание среднемесячных значений температуры почвы,

измеренных за весь временной период, °С; U – год, находящийся в средней точке анализируемого временного интервала (например, если анализируемый диапазон составляет 1963–2007 гг., то $U = 1985$); k_1 – значение линейного тренда ряда измерений среднемесячных значений температуры почвы, °С за год.

В этом случае исходный ряд реанализа корректируется следующим образом:

$$f_r(t) = y_r(t) - M_r - k_r(t - U) + \varphi(t), \quad (2)$$

где $f_r(t)$ – скорректированный ряд реанализа среднемесячных значений температуры почвы, °С; $y_r(t)$ – исходный ряд реанализа среднемесячных значений температуры почвы, °С; M_r – математическое ожидание среднемесячных значений температуры почвы исходного ряда реанализа за весь временной период, °С; k_r – значение линейного тренда исходного ряда реанализа среднемесячных значений температуры почвы, °С за год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особенностью использования данных реанализа о температурах слоев почвы является возможность проведения исследований в районах с редкой сетью станций наблюдений.

В данной работе показано, что реанализ воспроизводит пространственно-временное распределение температуры деятельного слоя почвы с определенными отклонениями: в слое 0–10 см зимой температура завышена, а летом занижена, в переходные сезоны расхождения минимальны. Дисперсия средней месячной температуры по реанализу оказывается повсеместно заниженной относительно фактических данных (СКО – в 2–3 раза). В слое 10–200 см температура почвы отстает более низкая во все сезоны.

Вместе с тем выявлена тесная корреляционная связь между средними месячными значениями температуры почвы слоя 0–10 см по реанализу и температуры поверхности почвы по данным наблюдений. В слое 10–200 см преобладают незначимые коэффициенты корреляции для зимнего периода, а статистически обеспеченные показатели связи зафиксированы лишь в отдельные весенние и осенние месяцы.

Предложенный способ корректировки позволяет использовать данные реанализа для исследования процессов теплообмена в деятельном слое почвы на территории обширного региона Западная Сибирь.

Литература

Васильев А.А., Дроздов Д.С., Москаленко Н.Г. Динамика температуры многолетнемерзлых пород Западной Сибири в связи с изменениями климата // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 2, с. 10–18.

Геокриология СССР. Западная Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Недра, 1989, 450 с.

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.

Дюкарев Е.А., Ипполитов И.И., Кабанов М.В. и др. Изменение климата азиатской территории России во второй половине XX столетия: сравнение данных наблюдений и реанализов // Оптика атмосферы и океана, 2006, т. 19, № 11, с. 934–940.

Израэль Ю.А., Павлов А.В., Анохин Ю.А. Эволюция криолитозоны при современных изменениях глобального климата // Метеорология и гидрология, 2002, № 1, с. 22–34.

Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 1. Изменение климата. М., Росгидромет, 2008, 227 с.

Павлов А.В. Тренды современных изменений температуры почвы на севере России // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 3, с. 22–27.

Павлов А.В., Малкова Г.В. Современные изменения климата на севере России. Альбом мелкомасштабных карт. Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2005, 54 с.

Переведенцев Ю.П. Теория климата: Учеб. пособие. Казань, Изд-во Казан. ун-та, 2004, 320 с.

Шерстюков А.Б. Изменения климата и их последствия в зоне многолетней мерзлоты России. Обнинск, ВНИИГМИ-МЦД, 2009, 127 с.

Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteorol. Soc., 1996, vol. 77, No. 3, p. 437–471.

Serreze M.C., Walsh J.E., Chapin III F.S. et al. Observational evidence of recent change in the Northern high-latitude environment // Climate Change, 2000, vol. 46, p. 159–207.

*Поступила в редакцию
2 сентября 2010 г.*