

АТМОСФЕРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И КЛИМАТ

УДК 551.583:551.345.502

**ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ И ТЕМПЕРАТУРЫ ГРУНТОВ  
В РАЙОНЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ ВО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XX И В НАЧАЛЕ XXI ВЕКА**

**Л.Т. Мяч, Л.И. Болтнева, Б.Г. Шерстюков\***

*Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН,  
107258, Москва, ул. Глебовская, 20б, Россия, uanohin@rambler.ru*

*\*Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных  
Росгидромета, 249020, Калужская обл., Обнинск, ул. Королёва, 6, Россия, boris@meteo.ru*

Проведен анализ временных рядов среднегодовых и среднесезонных значений температуры воздуха, количества осадков, высоты снежного покрова и температуры грунтов на глубинах 80 и 160 см за период 1961–2007 гг. по данным метеорологических станций, расположенных вдоль побережья оз. Байкал. Отмечается некоторое уменьшение величин трендов в рядах температуры приземного воздуха и грунтов во второй половине 1990-х–начале 2000-х гг., связанное с циклом относительного снижения температуры воздуха. Однако к концу анализируемого периода тенденция к росту указанных величин восстанавливается. В среднем за период 1961–2007 гг. положительные тренды составляют 0,042 и 0,039 °C/год для временных рядов среднегодовой температуры воздуха и грунта на глубине 160 см соответственно. Показана тенденция к более быстрому росту трендов температуры воздуха и грунтов в течение теплого периода по сравнению с холодным. Отмечена также тенденция к росту количества осадков и высоты снежного покрова. Определены периоды с наибольшей неустойчивостью в рядах температуры воздуха и грунтов путем совместного анализа средних значений и стандартных отклонений. С помощью различных сценариев изменения климата получены прогнозные оценки приращений значений температуры воздуха и грунта на глубине 160 см к 2025 г.

*Байкальский регион, температура грунтов, временные ряды, тренды, неустойчивость, прогнозные оценки*

**CHANGES OF THE CLIMATE AND SOIL TEMPERATURE CONDITIONS IN  
THE SECOND HALF OF THE 20th AND EARLY 21st CENTURY, LAKE BAIKAL**

**L.T. Miach, L.I. Boltneva, B.G. Sherstyukov\***

*Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS,  
107258, Moscow, Glebovskaya str., 20b, Russia, uanohin@rambler.ru*

*\*All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Centre of Roshydromet,  
249020, Kaluga reg., Obninsk, Koroleva str., 6, Russia, boris@meteo.ru*

The dynamics of the 1961–2007 time series of annual and seasonal averages of air temperature, precipitation, snow cover depth, and soil temperature at depths of 80 and 160 cm for the Baikal region are analyzed. A certain decrease in the air and soil temperature trends is clearly observed in the dynamics of the time series in late 1990s and early 2000s due to the cycle of relative air temperature fall. However, later in 2000s the trend of rise of these temperatures is observed again. For the specified period the mean-annual linear trend factors appeared on the average to be 0.042 °C/year and 0.039 °C/year for air and soil temperature at the depth of 160 cm, respectively. The air and soil temperature tend to increase more rapidly during the warm periods than during the cold ones. A tendency towards an increase in precipitation and snow cover depth is also observed. The periods of maximum instability of air and soil temperature have been determined by the analysis of their 20-year moving averages and standard deviations. Using several scenarios of climate change, the predictive estimates of the air and soil temperatures are received up to 2025.

*Baikal region, soil temperature, time series, trends, instability, prognostic estimates*

**ВВЕДЕНИЕ**

Озеро Байкал – природная уникальная экосистема, включенная в Список объектов Всемирного наследия ЮНЕСКО. Сохранение

этого уникального объекта природы – непреходящая проблема [Государственный доклад, 2009].

В настоящее время для Прибайкальско-Забайкальского региона становится актуальной задача анализа и оценки последствий происходящих и возможных в будущем изменений климата, тем более что рост среднегодовой температуры приземного воздуха в этом регионе существенно превышает глобальный рост [Шимараев и др., 2002; Павлов, Аняньева, 2004; Груза и др., 2007]. Учитывая, что большая часть рассматриваемого региона находится в зоне прерывистой или островной многолетней мерзлоты [Сергеев и др., 2007; Павлов, 2008а], необходимо оценивать и возможные негативные геокриологические последствия.

Изменения климатических характеристик в районе оз. Байкал в связи с глобальным потеплением исследовались в ряде работ. Так, в работе [Шимараев и др., 2002] проанализированы тренды и ритмы колебаний температуры приземного воздуха на станции (ст.) Бабушкин за период 1900–2000 гг. Наиболее полный анализ временных рядов климатических характеристик Предбайкалья представлен в работе [Густокашина, 2003], но в ней временные ряды температуры грунтов не рассматривались, и анализ ограничен 1996 годом. В работе [Павлов, 2008б] приведены годовые линейные тренды температуры воздуха и грунтов по данным мониторинга климата и криолитозоны за период 1961–2005 гг., но оценки для всего региона Прибайкалье–Забайкалье проведены по данным только трех станций.

С восстановлением в 2005 г. геокриологического стационара в районе Чары (Северное Забайкалье) продолжены геотермические наблюдения, начатые в 1980-х гг. [Сергеев и др., 2007]. Идентифицированы 30 скважин, по которым имеются ряды ранее проводившихся геотермических наблюдений. Измерения в восстановленных скважинах показали, что за период 1987–2005 гг. температура многолетнемерзлых толщ на глубине 19–20 м повысилась на 0,9 °С. Тем не менее для территорий, прилегающих к оз. Байкал, исследований современной динамики климатических характеристик и температуры грунтов явно недостаточно.

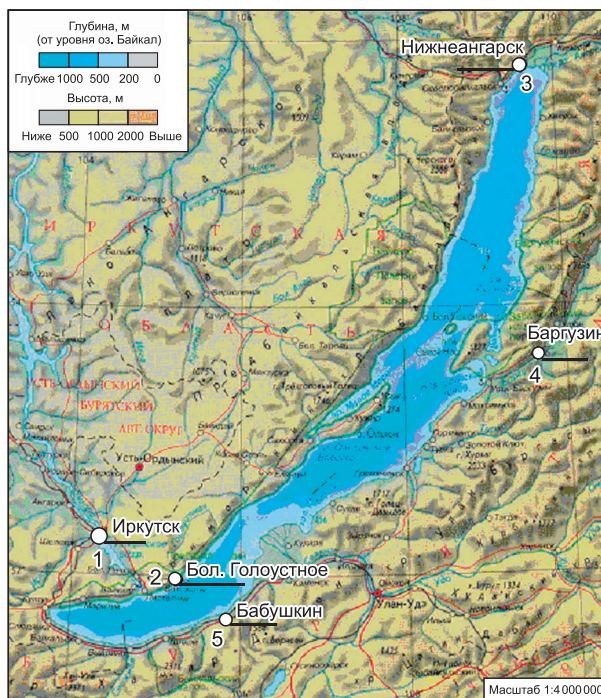
В настоящей работе продолжено изучение временных рядов климатических характеристик и температуры грунтов в различных районах криолитозоны РФ, проводящееся в ИГКЭ с 2001 г. [Анохин и др., 2006; Израэль и др., 2006; Израэль и др., 2007].

**ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ**

Для ретроспективного анализа использованы данные наблюдений пяти метеорологических станций, расположенных в различных частях побережья оз. Байкал, так как на этих станциях производятся наблюдения по всему комплексу метеорологических элементов, в том числе за температурой почвы и грунтов на глубинах (рис. 1).

Краткие характеристики станций (географические координаты, высота над уровнем моря, тип ландшафта и грунта) приведены в табл. 1, 2. Для выбранных станций были сформированы временные ряды среднемесячных значений приземной температуры воздуха ( $T_B$ ), количества осадков, высоты снежного покрова и температуры грунтов на глубинах 80 и 160 см ( $T_{п80}$  и  $T_{п160}$ ) за интервал с 1961 по 2007 г., а также за более короткие периоды, входящие в этот интервал. На основе рядов среднемесячных значений были сформированы ряды среднегодовых значений, а также ряды значений, осредненных для периодов с отрицательными температурами (холодный период –  $\tau_x$ ) и положительными температурами (теплый период –  $\tau_T$ ). Месяцы, относящиеся к холодному и теплому периодам на каждой из станций, приведены в табл. 1. На глубине 80 см наступление положительных температур запаздывает по сравнению с  $T_B$  на 1 месяц, на глубине 160 см – на 2 месяца. На продолжительности холодного и теплого периодов запаздывание не сказывается.

В прогнозных оценках использованы результаты климатического моделирования, размещенные на Интернет-портале IPCC Model Output (<http://esg.llnl.gov:8443>), который создан и поддерживается Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК). Портал



**Рис. 1. Схема расположения прибайкальских метеорологических станций (1–5), выбранных для анализа временных рядов климатических характеристик и температуры грунтов.**

Таблица 1. Среднегодовые и средние для холодного ( $\tau_x$ ) и теплого ( $\tau_T$ ) периодов коэффициенты линейного тренда сглаженных временных рядов температуры приземного воздуха, количества осадков и высоты снежного покрова за 1961–2007 гг.

Станция	Высота над ур. моря, м	Географические координаты, град		Продолжительность периодов (месяцы)		Коэффициенты линейного тренда						
		с.ш.	в.д.	$\tau_x$	$\tau_T$	Температура воздуха, 100 °C/год			Осадки, 100 мм/год			Среднезимняя высота снежного покрова, 100 см/год
						год	$\tau_x$	$\tau_T$	год	$\tau_x$	$\tau_T$	
Иркутск ГМО*	468	52,3	104,3	XI–III	IV–X	4,7	5,7	3,9	–3,3	–1,8	–4,4	–0,8
Большое Голоустное	461	52,0	105,4	XI–III	IV–X	3,5	3,9	3,3	6,7	1,6	10,3	9,9
Нижнеангарск	475	55,8	109,6	X–IV	V–IX	4,3	3,9	4,8	3,1	0,4	6,8	–16,1
Баргузин	481	53,6	109,6	X–III	IV–IX	4,5	5,5	3,5	0,6	–1,0	2,2	14,0
Бабушкин	480	51,7	105,9	XI–IV	V–X	4,1	3,8	4,4	9,3	16,2	2,3	–7,7

\* ГМО – Гидрометобсерватория.

Таблица 2. Среднегодовые и средние для холодного ( $\tau_x$ ) и теплого ( $\tau_T$ ) периодов коэффициенты линейного тренда сглаженных временных рядов температуры грунтов на глубинах 80 и 160 см за 1961–2007 гг.

Станция	Характеристика грунта на станции	Тип ландшафта	Коэффициенты линейного тренда температуры грунта, 100 °C/год					
			на глубине 80 см			на глубине 160 см		
			год	$\tau_x$	$\tau_T$	год	$\tau_x$	$\tau_T$
Иркутск ГМО	Лёссовидный, легкий суглинок	Долинный, подтаежный лиственный	6,6	7,1	6,3	8,2	7,0	8,8
Большое Голоустное	Слабоподзолистый, легкоглинистый с примесью гальки	Равнинный, подтаежный лиственный-сосновый	3,0	5,1	1,6	3,3	4,1	2,6
Нижнеангарск	Суглинок	Низкогорный, подтаежный лиственный-сосновый	2,5	3,0	1,8	2,9	2,4	3,6
Баргузин	Суглинок с гумусом	Низкогорный, южнотаежный темнохвойный	4,0	3,8	4,1	3,7	3,2	4,3
Бабушкин	Подзолистый, суглинок	Низкогорный, подтаежный лиственный-сосновый	1,9	2,2	1,5	1,3	1,6	1,2

содержит результаты экспериментов, выполненных с моделями общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) ряда ведущих центров моделирования климата и воспроизводящих климат XX–XXI вв. в соответствии с основными сценариями эмиссии парниковых газов [Nakicenovic et al., 2000; Climate..., 2007].

Помимо традиционных, рекомендованных МГЭИК сценариев, в работе использовались также результаты прогнозных расчетов  $T_B$  по модели Института вычислительной математики (ИВМ) РАН [Галин и др., 2003; <http://climatechange.su>] и по статистической модели изменений климата на основе ритмов, разработанной во Всероссийском научно-исследовательском институте гидрометеорологической информации (ВНИИГМИ–МЦД) Росгидромета [Шерстюков, 2008].

Для обработки информации применялись стандартные процедуры корреляционного и регрессионного анализов, статистического оцени-

вания и анализа временных рядов, а также робастные оценки [Мостеллер, Тьюки, 1982; Закс, 1986; Сиротенко, 2007]. При статистическом анализе временных рядов с пропусками, которых было особенно много в наблюдениях за температурой грунтов в начале и середине 1990-х гг., был использован один из предложенных в [Литтл, Рубин, 1991] методов заполнения пропусков, а именно регрессионный. Приведенные ниже статистические характеристики рассчитывались после того, как в данных по  $T_{п80}$  и  $T_{п160}$  были заполнены все пропуски.

#### РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ КЛИМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ТЕМПЕРАТУРЫ ГРУНТОВ

Временной ход среднегодовых значений  $T_B$ ,  $T_{п160}$ , количества осадков и высоты снежного покрова на станциях Иркутск ГМО, Большое Голо-

устное, Нижнеангарск, Баргузин, Бабушкин за период 1961–2007 гг. приведен на рис. 2. Ряды сглажены методом скользящего среднего, кроме случаев существенного отличия их распределения от нормального (например, значения высоты снежного покрова на станциях Нижнеангарск и Баргузин). Эти ряды были сглажены с помощью скользящих медиан [Сиротенко, 2007].

В табл. 1, 2 приведены коэффициенты линейного тренда (КЛТ) сглаженных временных рядов среднегодовых и среднесезонных значений анализируемых климатических характеристик. Все тренды временных рядов  $T_{\text{в}}$ ,  $T_{\text{п80}}$  и  $T_{\text{п160}}$  статистически значимы.

Величины КЛТ среднегодовых значений  $T_{\text{в}}$  изменяются от 0,035 °C/год на ст. Большое Голо-

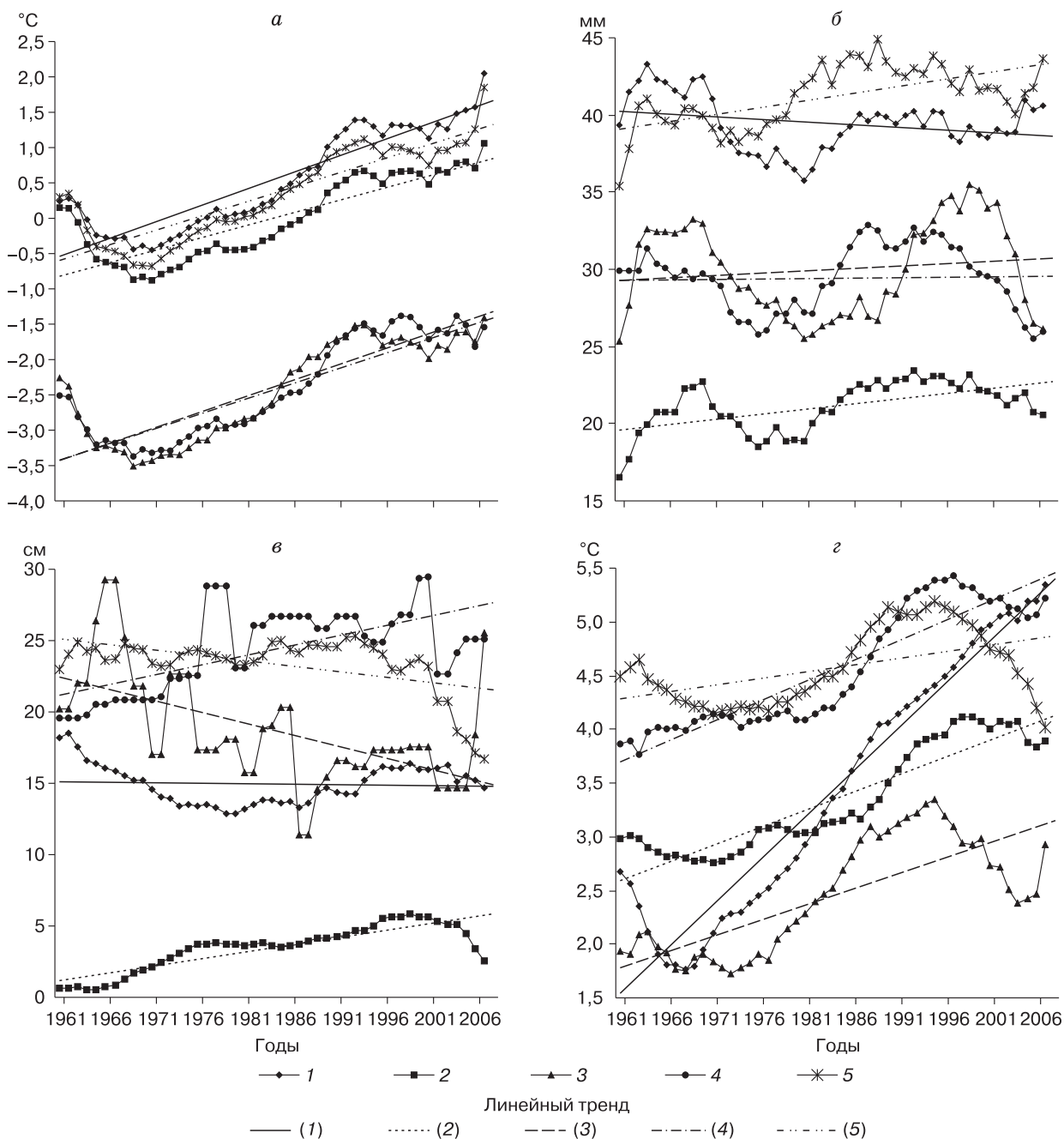


Рис. 2. Временной ход сглаженных значений температуры воздуха (а), количества осадков (б), высоты снежного покрова (в) и температуры грунта на глубине 160 см (г) за период 1961–2007 гг. на прибайкальских станциях:

1 – Иркутск ГМО (Гидрометобсерватория); 2 – Большое Голоустное; 3 – Нижнеангарск; 4 – Баргузин; 5 – Бабушкин.

устное до  $0,047\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$  на ст. Иркутск ГМО (Гидрометобсерватория). При этом на станциях Иркутск ГМО, Большое Голоустное и Бабушкин среднегодовые значения  $T_b$  в течение периода 1961–2007 гг. сменили знак на положительный (см. рис. 2, а). Диапазон изменений КЛТ временных рядов для  $\tau_x$  и  $\tau_t$  шире, чем для среднегодовых.

Неоднократно отмечалось [Шимараев и др., 2002; Густокашина, 2003; Трофимова, 2006], что в рассматриваемом регионе КЛТ  $T_b$  для зимы значительно превышает КЛТ  $T_b$  для лета. Между тем КЛТ-характеристика временного ряда, весьма чувствительная к периоду, за который он рассчитывается. Например, на ст. Иркутск ГМО для временного ряда  $T_b$  с 1920 по 2007 г. КЛТ для  $\tau_x$  превышает КЛТ для  $\tau_t$  в 3,7 раза, а за период 1961–2007 гг. – в 1,5 раза (табл. 3). На двух станциях (Нижнеангарск, Бабушкин) КЛТ  $T_b$  для  $\tau_t$  за последний период оказался большим, чем для  $\tau_x$  (см. табл. 1). В среднем по пяти станциям значения КЛТ  $T_b$  для  $\tau_x$  и  $\tau_t$  во временном интервале 1961–2007 гг. сопоставимы.

Наблюдавшееся с середины 1990-х гг. относительное снижение  $T_b$  отмечается и на всех выбранных станциях, что привело к снижению КЛТ  $T_b$  вплоть до отрицательных значений за период 1991–2007 гг. (см. рис. 2, а, табл. 3). Причина в том, что помимо общей тенденции к росту во временных рядах среднегодовых значений  $T_b$  выделяются циклы относительного повышения и понижения, связанные, прежде всего, с особенностями атмосферной циркуляции в данном регионе [Шимараев и др., 2002; Густокашина, 2003].

Более четко проследить циклы во временном ходе анализируемых характеристик позволяет исключение из них трендов. На рис. 3, а приведены сглаженный методом скользящего среднего временной ряд  $T_b$  на ст. Иркутск ГМО за период 1920–2007 гг. и тот же ряд, но с исключенным трендом. Можно видеть, что минимум последнего цикла понижения достигается в начале 2000-х гг., в последние же включенные в анализ годы рост приземной температуры воздуха возобновился.

Таблица 3. Среднегодовые и средние для холодного ( $\tau_x$ ) и теплого ( $\tau_t$ ) периодов значения коэффициентов линейного тренда приземной температуры воздуха ( $T_b$ ) на станции Иркутск ГМО для различных временных интервалов

Временной интервал	Коэффициенты линейного тренда $T_b$ , $100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$		
	год	$\tau_x$	$\tau_t$
1920–2007 гг.	3,2	5,5	1,5
1961–2001 гг.	3,8	4,1	3,7
1961–2006 гг.	4,2	5,3	3,4
1961–2007 гг.	4,7	5,7	3,9
1991–2007 гг.	2,6	–1,7	5,6

Последний цикл относительного понижения не был отмечен в работе [Густокашина, 2003], так как анализ в ней заканчивался 1996 годом. Синхронность, с которой происходили колебания во временных рядах  $T_b$  с исключенным трендом на всех рассмотренных станциях (см. рис. 3, б), подтверждает, что и это последнее колебание имеет внешние причины и мало зависит от особенностей местных условий.

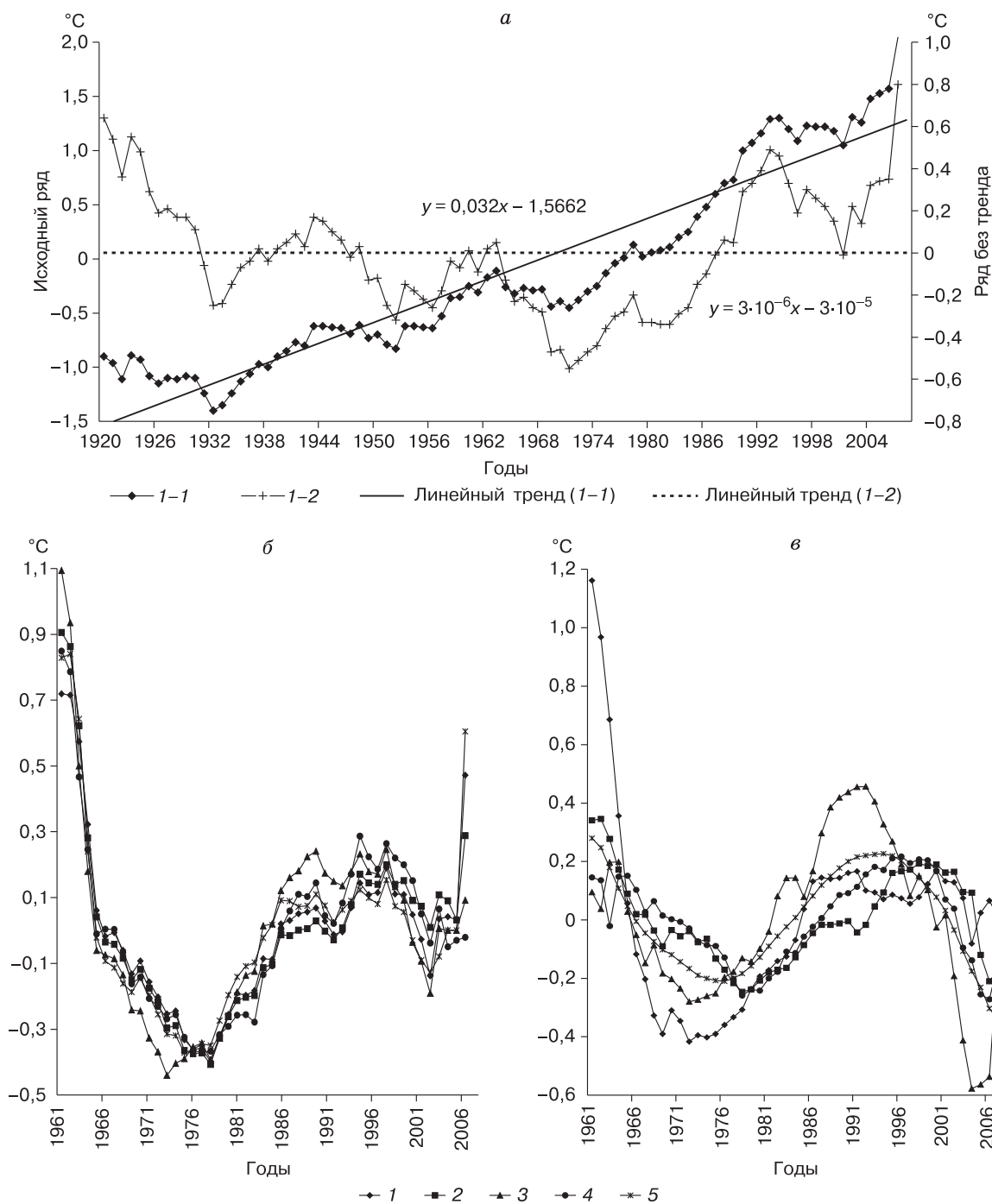
Из табл. 1 также следует, что на всех станциях, кроме ст. Иркутск ГМО, в течение 1961–2007 гг. отмечался положительный тренд количества осадков. На ст. Иркутск ГМО в конце рассматриваемого периода (после 2004 г.) также наметилась тенденция к росту этой климатической характеристики. Рассчитанные тренды среднегодового количества осадков изменяются в диапазоне от  $-0,033$  до  $0,093\text{ мм}/\text{год}$ . Но тренды слабо выражены (см. рис. 2, б) и статистически значимы только на станциях Большое Голоустное и Бабушкин.

Временной ход рядов высоты снежного покрова на выбранных станциях различен. Хотя отрицательный тренд в значениях высоты снежного покрова наблюдается на трех станциях, а положительный только на двух, тенденция к увеличению на них статистически более обеспечена (см. табл. 1, рис. 2, в). Таким образом, при анализе временных рядов количества осадков и высоты снежного покрова более корректно говорить о тенденциях, чем о трендах.

Временной ход рядов  $T_{п80}$  и  $T_{п160}$  во многом подобен временному ходу значений  $T_b$ . Для всего интервала 1961–2007 гг. наблюдаются положительные тренды в среднегодовых и среднесезонных значениях  $T_{п80}$  и  $T_{п160}$ , хотя имело место их некоторое снижение в конце анализируемого периода (см. табл. 2, рис. 2, з). В среднем для всех рассмотренных случаев отношение КЛТ временных рядов  $T_{п80}$  и  $T_{п160}$  к КЛТ соответствующих временных рядов  $T_b$  равно 0,89, что сопоставимо с оценкой 0,81, полученной в работе [Павлов, 2008б] для всего региона Прибайкалье–Забайкалье.

На глубине 80 см на ст. Баргузин КЛТ  $T_{п80}$  для теплого сезона превышает КЛТ для холодного. На глубине 160 см такое соотношение наблюдается уже на трех станциях (Иркутск ГМО, Нижнеангарск, Баргузин).

В некоторых случаях КЛТ временных рядов температуры грунтов превышает КЛТ соответствующих временных рядов  $T_b$  (см. табл. 1, 2). Эта особенность, которая уже неоднократно отмечалась [Израэль и др., 2006; Шерстюков, 2009], объясняется влиянием на формирование температуры грунтов на глубинах не только  $T_b$ , но и количества приходящей радиации, механического состава и структуры почвы, типа ландшафта, состояния и мощности снежного покрова и др.



**Рис. 3.** Сглаженные методом скользящего среднего временные ряды температуры приземного воздуха и температуры грунта на глубине 160 см:

*а* – температура воздуха на ст. Иркутск ГМО за период 1920–2007 гг. (1-1 – исходный ряд, 1-2 – ряд с исключенным трендом); *б* – температура воздуха на прибайкальских станциях (1–5) за период 1961–2007 гг. с исключенным трендом; *в* – температура грунта на глубине 160 см на прибайкальских станциях (1–5) за период 1961–2007 гг. с исключенным трендом.

На рис. 3, в видно, что колебания  $T_{п160}$  в основном подобны колебаниям  $T_{в}$ , но влияние местных факторов более существенно, чем в рядах  $T_{в}$ . Во временных рядах  $T_{п80}$  с исключенным трендом гораздо больше выражено сходство с временными рядами  $T_{в}$ .

Для оценки тенденций в изменении климата наряду с КЛТ используются также отклонения климатических характеристик, осредненных за различные периоды, от их средних значений за базовый период (“норм”). В качестве базового для климатических испытаний в настоящее время МГЭИК рекомендован период 1961–1990 гг.

В табл. 4 приведены средние для пяти станций отклонения от “норм” анализируемых климатических характеристик, осредненных за наиболее теплые годы (1991–2007). Отклонения среднегодовых и среднесезонных значений  $T_{в}$ , несмотря на последний цикл ее относительного понижения, остались положительными на всех станциях. Диапазон отклонений  $T_{в}$  на отдельных станциях для среднегодовых значений – от 1,0 до 1,4 °С. Отклонения для холодного периода изменяются в пределах от 1,1 до 1,6 °С, для теплого – от 1,0 до 1,2 °С. В холодный и теплый периоды эти отклонения составляют примерно 10 % от “нормы”, в то же время в силу близости среднегодовых значений  $T_{в}$  к 0 °С относительные отклонения среднегодовой температуры на всех рассмотренных станциях близки к 100 %.

Значения количества осадков, осредненные за период 1991–2007 гг., несмотря на последнюю

волну понижения, на всех указанных станциях оказались большими, чем значения, осредненные для базового периода. Положительные приращения по отношению к “нормам” составляют порядка 6 % для среднегодовых значений, около 9 % для  $\tau_x$  и примерно 4 % для  $\tau_T$ . Наибольшее приращение зимних осадков (20 %) отмечено на ст. Бабушкин.

На четырех из пяти станций (кроме ст. Нижнеангарск) также имеют место положительные приращения средней за зиму высоты снежного покрова. В среднем приrost составляет около 10 % (1,4 см), но на ст. Большое Голоустное, где в течение рассматриваемого периода наблюдался последовательный устойчивый рост высоты снежного покрова (см. рис. 2, в), приращение составляет более 50 %.

Таким образом, в тех случаях, когда тренды слабо выражены и статистически плохо обеспечены, что характерно для временных рядов осадков и высоты снежного покрова, отклонения от “норм” могут быть более наглядной и устойчивой характеристикой тенденций их изменения.

Несмотря на некоторое снижение температуры грунтов  $T_{п80}$  и  $T_{п160}$  в конце рассматриваемого периода, отклонения значений этих характеристик, осредненных за период 1991–2007 гг., от “норм” положительны на всех станциях и сопоставимы с приращениями  $T_{в}$ . С учетом того, что “нормы”  $T_{п80}$  и  $T_{п160}$  примерно в 1,5 раза меньше “норм”  $T_{в}$ , относительные приращения  $T_{п80}$  и  $T_{п160}$  за холодный и теплый сезоны превышают соответствующим

Таблица 4. Средние величины и стандартные отклонения ( $s$ ) среднегодовых и среднесезонных значений климатических характеристик и температуры грунтов за наиболее теплый период (1991–2007 гг.), “нормы” за базовый период, отклонения ( $\Delta$ ) рассчитанных величин от “норм”

Временной интервал, отклонение от “норм”	Температура воздуха		Количество осадков		Высота снежного покрова		Температура грунта			
	$T_{в}^{cp}$ , °С	$s$	$R_{cp}$ , мм	$s$	$H_{cp}$ , см	$s$	на глубине 80 см		на глубине 160 см	
							$T_{п80}^{cp}$ , °С	$s$	$T_{п160}^{cp}$ , °С	$s$
<i>Годовой период</i>										
1991–2007 гг.	–0,1	0,7	33,4	5,7	–	–	4,2	0,5	4,3	0,5
1961–1990 гг.*	–1,3	0,8	33,4	5,7	–	–	3,1	0,7	4,3	0,5
$\Delta_T$	1,2	–0,1	1,6	–0,1	–	–	1,1	–0,2	1,1	–0,1
<i>Холодный период</i>										
1991–2007 гг.	–11,6	1,4	15,6	3,4	17,8	2,2	–2,2	1,0	0,8	0,5
1961–1990 гг.*	–13,0	1,7	14,3	3,6	16,4	1,8	–1,0	0,6	–0,2	0,7
$\Delta_{\tau_x}$	1,4	–0,3	1,3	–0,2	1,4	0,4	1,2	–0,4	1,0	–0,2
<i>Теплый период</i>										
1991–2007 гг.	10,8	0,5	49,8	7,6	–	–	8,9	0,6	7,6	0,7
1961–1990 гг.*	9,7	0,4	47,8	8,4	–	–	8,0	0,6	6,4	0,8
$\Delta_{\tau_T}$	1,1	0,1	2,0	–0,8	–	–	0,9	0	1,2	–0,1

Примечание. Значения климатических характеристик и температуры грунтов осреднены по пяти прибайкальским станциям.

\* Базовый период для расчета “норм”.

ющие относительные приращения температуры воздуха и составляют примерно 35 % от “нормы” за базовый период. При этом на станциях Баргузин и Нижнеангарск у значений температуры почвы на глубине 160 см в холодный период знак сменился на положительный.

Сравнивая расположенные на близких широтах, но отстоящие примерно на 100 км по долготе станциях Иркутск ГМО и Большое Голоустное

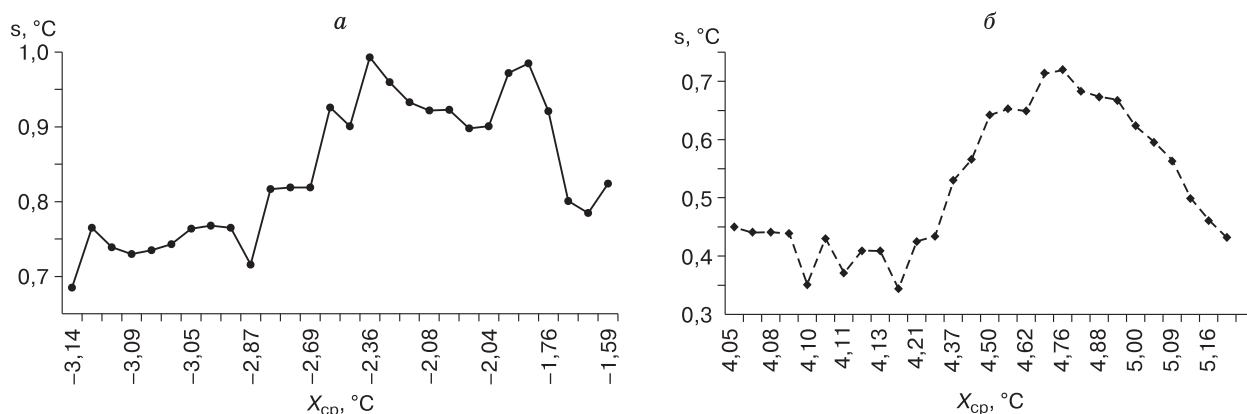
(см. рис. 1), можно отметить, что на последней станции, расположенной на берегу оз. Байкал, в целом за весь анализируемый период 1961–2007 гг. средние за  $\tau_x$  значения  $T_B$  на 0,7 °С выше, а средние за  $\tau_T$  на 1,5 °С ниже, чем на ст. Иркутск ГМО (табл. 5). Из табл. 1 и рис. 2, а также видно, что на ст. Большое Голоустное КЛТ  $T_B$  более низкий, чем на ст. Иркутск ГМО, в то же время более высокие КЛТ количества осадков и высоты снежного по-

Таблица 5. Среднегодовые и средние для холодного ( $\tau_x$ ) и теплого ( $\tau_T$ ) периодов значения температуры воздуха и грунта на глубине 160 см ( $T_B, T_{п160}$ ) для временного интервала 1961–2007 гг. и их прогнозные приращения ( $\Delta T_B, \Delta T_{п160}$ ) к 2025 г.

Вариант расчета	$T_B, \Delta T_B, ^\circ\text{C}$			$T_{п160}, \Delta T_{п160}, ^\circ\text{C}$		
	год	$\tau_x$	$\tau_T$	год	$\tau_x$	$\tau_T$
<i>Иркутск</i>						
Среднее за 1961–2007 гг.	0,5	-12,9	10,1	3,3	0,8	5,2
Приращения к 2025 г.						
инерционно-трендовый прогноз	2,0	2,4	1,6	2,1	1,4	2,5
модель HadCM3	0,8	0,3	1,2	0,9	0,6	1,0
модель GFDL99	1,0	0,5	1,3	1,1	0,7	1,3
модель ИВМ РАН	0,7	0,9	0,5	0,8	0,4	0,9
модель ВНИИГМИ–МЦД	1,7	1,6	1,8	1,8	1,2	2,2
<i>Большое Голоустное</i>						
Среднее за 1961–2007 гг.	0	-12,2	8,7	3,4	-1,7	7,0
Приращения к 2025 г.						
инерционно-трендовый прогноз	1,4	1,6	1,4	1,4	1,7	1,1
модель HadCM3	0,8	0,3	1,3	0,7	0,7	0,7
модель GFDL99	0,9	0,5	1,2	0,7	0,7	0,6
модель ИВМ РАН	0,7	0,3	0,9	0,5	0,6	0,5
модель ВНИИГМИ–МЦД	2,2	2,8	1,6	1,4	1,8	1,2
<i>Нижнеангарск</i>						
Среднее за 1961–2007 гг.	-2,5	-12,3	11,2	2,4	0	5,9
Приращения к 2025 г.						
инерционно-трендовый прогноз	1,8	1,7	2,0	1,2	1,0	1,4
модель HadCM3	0,6	0,3	0,9	0,4	0,3	0,5
модель GFDL99	1,1	0,9	1,2	0,7	0,5	0,9
модель ИВМ РАН	2,1	2,0	2,3	1,3	1,0	1,7
модель ВНИИГМИ–МЦД	2,6	3,0	2,2	1,6	1,4	1,8
<i>Баргузин</i>						
Среднее за 1961–2007 гг.	-2,4	-16,0	11,2	4,6	0,0	9,1
Приращения к 2025 г.						
инерционно-трендовый прогноз	1,8	2,3	1,4	1,5	1,3	1,7
модель HadCM3	0,6	0,2	1,0	0,4	0,4	0,4
модель GFDL99	1,1	0,9	1,2	0,7	0,7	0,7
модель ИВМ РАН	1,9	3,4	0,4	1,2	1,3	1,1
модель ВНИИГМИ–МЦД	2,7	2,7	2,7	1,6	1,4	1,8
<i>Бабушкин</i>						
Среднее за 1961–2007 гг.	0,3	-9,0	9,6	4,4	1,8	6,9
Приращения к 2025 г.						
инерционно-трендовый прогноз	1,7	1,6	1,7	0,7	0,8	0,5
модель HadCM3	0,7	0,3	1,2	0,3	0,3	0,3
модель GFDL99	0,9	0,5	1,1	0,4	0,5	0,4
модель ИВМ РАН	0,9	0,3	1,5	0,5	0,6	0,4
модель ВНИИГМИ–МЦД	2,3	2,1	2,4	0,8	1,1	0,6

Примечание. Модели: HadCM3 – Климатический центр Хэдли, Великобритания [Meehl et al., 2007; <http://esg.llnl.gov:8443>]; GFDL99 – Лаборатория гидродинамики, Принстон, США [Meehl et al., 2007; <http://esg.llnl.gov:8443>]; ИВМ РАН – Институт вычислительной математики РАН [Галин и др., 2003; <http://climatechange.su>]; ВНИИГМИ–МЦД – Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных [Шерстюков, 2008].





**Рис. 4.** Диаграммы соотношений между оценками по 20-летним скользящим периодам средних значений ( $X_{cp}$ ) и стандартных отклонений ( $s$ ) температуры воздуха (*a*) и температуры грунта на глубине 160 см (*б*) на станции Баргузин.

Временной интервал 1961–2007 гг., первая точка относится к периоду 1961–1980 гг., последняя – к периоду 1988–2007 гг.

крова. Из этого примера следует, что, несмотря на доминирующую роль общей циркуляции атмосферы и других процессов планетарного масштаба, влияние оз. Байкал на изменение климатических характеристик все же сказывается, хотя из-за сложных орографических условий оно ограничено [Шимараев и др., 2002].

В табл. 4 приведены значения стандартных отклонений ( $s$ ) за два периода, поскольку для анализа последствий изменения климата необходимо оценивать не только динамику средних величин климатических характеристик, но и динамику их изменчивости. В целом для всех вариантов их изменчивости. В целом для всех вариантов в 75 % случаев стандартные отклонения, рассчитанные для периода 1991–2007 гг., уменьшились по сравнению с базовым периодом или остались без изменения. Случаи возрастания относятся в основном к теплому периоду.

Для более наглядного представления динамики стандартных отклонений ( $s$ ) климатических характеристик в зависимости от их средних значений ( $X_{cp}$ ) используется метод  $Xs$ -диаграмм, предложенный в работе [Сиротенко, 2007]. На рис. 4, *a* и *б* приведены примеры таких диаграмм для температуры воздуха и температуры грунтов на глубине 160 см на ст. Баргузин. Расчеты проводились по 20-летним скользящим периодам (первая точка на графиках относится к периоду 1961–1980 гг., последняя – к 1988–2007 гг.). Как видно на рис. 4, *a*, стандартные отклонения  $T_v$  возрастают по мере увеличения ее средних значений. На всех станциях, как и в приведенном примере, отмечается два максимума (два периода наибольшей неустойчивости – 1976–1995 и 1984–2003 гг.). Начало каждого из этих периодов совпадает с началом цикла колебаний временного ряда  $T_v$  (см. рис. 3, *б*).

Временной интервал 1991–2007 гг., для которого проводились расчеты  $s$ , приведенные в табл. 4, попадает в нисходящую ветвь стандартных отклонений (см. рис. 4, *a*).

В диаграммах стандартных отклонений  $T_{п160}$  на всех станциях, как и на ст. Баргузин (см. рис. 4, *б*), отмечается по одному максимуму, и они приурочены к периодам начала интенсивного роста температуры грунта на глубине на каждой из станций (например, для ст. Баргузин это 1979–1998 гг., см. рис. 3, *в*).

#### ПРОГНОЗНЫЕ ОЦЕНКИ ПРИРАЩЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ГРУНТОВ НА 2025 ГОД

Для оценки прогнозных тенденций в поведении температуры приземного воздуха и грунтов были использованы результаты расчетов по МОЦАО: HadCM3 (Климатический центр Хэдли, Великобритания), GFDL99 (Лаборатория гидродинамики, Принстон, США) [Meehl et al., 2007], а также по модели ИВМ РАН [Галин и др., 2003]. Были выбраны те варианты, в которых при расчете использовался сценарий А2 эмиссии парниковых газов [Nakicenovic et al., 2000]. Этот сценарий предполагает региональную направленность развития экономики с опорой на собственные природные ресурсы, более медленное (по сравнению с другими сценариями) развитие технологий и увеличение к 2100 г. эмиссии  $CO_2$  примерно в 2,4 раза по сравнению с 1990 г.

Так как результаты расчетов по моделям приводятся в узлах регулярных сеток, на каждую из выбранных станций из четырех ближайших узлов была проведена интерполяция рассчитанных на

2025 г. значений температуры воздуха. Для этих же станций были получены прогнозные оценки  $T_v$  по методу ВНИИГМИ–МЦД [Шерстюков, 2008].

Прогнозные приращения температуры грунта на глубине 160 см рассчитывались с помощью уравнений регрессии, в которых в качестве независимых переменных использовались прогнозные среднегодовые, среднесезонные и среднемесячные значения  $T_v$  [Израэль и др., 2006].

Кроме расчетов по моделям были выполнены прогнозы  $T_v$  и  $T_{п160}$  с учетом существующих тенденций (см. табл. 1, 2). Такие прогнозы в работе [Павлов и др., 2010] определены как инерционно-трендовые.

В табл. 5 приведены среднегодовые и средние для холодного и теплого периодов значения температуры воздуха ( $T_v$ ) и температуры грунта на глубине ( $T_{п160}$ ), осредненные для всего рассматриваемого временного интервала 1961–2007 гг., а также прогнозные оценки приращений этих характеристик к 2025 г.

Анализируя приведенные в табл. 5 результаты, можно сделать следующие выводы. Все прогнозы по МОЦАО (HadCM3, GFDL99, ИВМ РАН) для выбранного сценария А2, а также прогноз на основе ритмов по методу ВНИИГМИ–МЦД и инерционно-трендовый прогноз дают положительные приращения среднегодовых значений  $T_v$  от 0,6 до 2,6 °С. Для холодного периода приращения находятся в пределах 0,2–3,4 °С, для теплого – в пределах 0,4–2,6 °С. Таким образом, диапазон приращений для холодного сезона в 1,5 раза шире, чем для теплого, но при этом в 18 из 25 рассмотренных случаев (5 станций, 5 вариантов прогноза) прогнозные приращения для теплого периода превышают приращения, полученные для холодного периода.

Что же касается приращений температуры грунта на глубине 160 см, то в среднем за год они находятся в диапазоне 0,4–2,1 °С и составляют примерно 70 % от значений приращений температуры воздуха. Диапазон приращений  $T_{п160}$  для теплого периода (от 0,4 до 2,5 °С) больше, чем для холодного (от 0,3 до 1,8 °С), и сопоставим с соответствующими оценками для  $T_v$ . С учетом меньших значений “норм”  $T_{п160}$  по сравнению с “нормами”  $T_v$  (в среднем по пяти станциям примерно в 1,5 раза, см. табл. 4) ожидаемое относительное потепление грунтов на глубинах в течение теплого периода может существенно превысить ожидаемое относительное потепление приземного воздуха.

Следовательно, отмеченная ранее при ретроспективном анализе тенденция к более быстрому росту температуры приземного воздуха и температуры грунтов в теплый период по сравнению с холодным заметна и в прогнозных оценках.

## ВЫВОДЫ

1. В последние годы анализируемого периода тенденция к росту  $T_v$  в районе оз. Байкал восстановилась, несмотря на некоторое снижение величины тренда в повышении  $T_v$ , которое отмечалось в связи с очередным циклом колебаний. Это подтверждается и данными за 2008 г. [Государственный доклад, 2009], а также прогнозными оценками значений  $T_v$  на 2025 г., полученными статистическими методами и с помощью модельных расчетов.

2. Прослеживается тенденция к более быстрому росту трендов температуры воздуха и грунтов в течение теплого периода по сравнению с холодным. Это очень существенный момент для геофизиологических процессов, так как ускоряются процессы деградации многолетнемерзлых пород. В частности, можно ожидать дальнейшую деградацию оледенения в пещерах-ледниках Байкала, которая началась с середины 1990-х гг. [Трофимова, 2006].

3. Могут ускориться процессы в ледово-термическом режиме оз. Байкал, которые имели место в течение прошлого века, а именно: более поздние (на 11 сут) сроки наступления ледостава и более ранние (на 7 сут) вскрытия, при этом максимальная толщина наростшего за зиму льда уменьшалась со средней скоростью 0,24 см/год [Шимарев и др., 2002].

4. Характерно, что колебания временных рядов, периоды наибольшей неустойчивости, изменения величин трендов происходят достаточно синхронно на всех станциях, расположенных на берегу оз. Байкал в различных климатических и ландшафтных условиях. Вместе с тем влияние озера сказывается на абсолютных значениях климатических характеристик (например, температура воздуха на ст. Большое Голоустное в холодный сезон на 0,7 °С выше, а в теплый сезон на 1,4 °С ниже, чем на близкорасположенной ст. Иркутск ГМО).

5. Прослеженная в работе динамика изменчивости элементов климата позволила выделить периоды их наибольшей неустойчивости, которые частично перекрываются (1976–1995 и 1984–2003 гг.). Во временных рядах  $T_v$  эти периоды совпадают для всех станций, причем в рядах температуры грунта на глубине 160 см они приурочены к началу их интенсивного роста на каждой из станций, поэтому такой четкой синхронности не наблюдается.

6. Полученные с помощью экстраполяции линейных трендов и уравнений регрессии прогнозные оценки температуры воздуха и грунтов на период до 2025 г. сопоставимы с прогнозными оценками, полученными с помощью сложных моделей. Впервые использованы для подобных прогнозных

оценок результаты расчетов по МОЦАО ИВМ РАН и статистической модели на основе ритмов ВНИИГМИ–МЦД. Прогнозные приращения температуры воздуха к 2025 г. для различных вариантов расчета в среднем за год колеблются от 0,6 до 2,6 °С, при этом в 70 % случаев прогнозные оценки для теплого периода превышают прогнозные оценки для холодного.

И в ретроспективных, и в прогнозных оценках заметна тенденция к более быстрому росту температуры приземного воздуха и температуры грунтов в теплый период по сравнению с холодным.

Статья подготовлена при поддержке гранта Президента РФ (НШ-3245.2010.5).

### Литература

- Анохин Ю.А., Болтнева Л.И., Мяс Л.Т.** Экологические последствия изменения климата в регионе озера Байкал // Труды Второй Всерос. конф. “Научные аспекты экологических проблем России”. М., 2006, с. 319–325.
- Галин В.Я., Володин Е.М., Смышляев С.П.** Модель общей циркуляции атмосферы ИВМ РАН с динамикой озона // Метеорология и гидрология, 2003, № 5, с. 13–23. (<http://climatechange.su>).
- Государственный доклад** о состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2008 году. Иркутск, Сиб. фил. ФГУНПП “Росгеолфонд”, 2009, 455 с.
- Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Рочева Э.В.** Климатические изменения температуры воздуха на территории России по данным инструментальных наблюдений // Бюл. “Использование и охрана природных ресурсов в России”, 2007, № 3 (93), с. 41–48.
- Густокашина Н.Н.** Многолетние изменения основных элементов климата на территории Прибайкалья. Иркутск, Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2003, 107 с.
- Закс Л.** Статистическое оценивание. М., Статистика, 1986, 360 с.
- Израэль Ю.А., Павлов А.В., Анохин Ю.А. и др.** Статистические оценки изменения элементов климата в районах вечной мерзлоты на территории Российской Федерации // Метеорология и гидрология, 2006, № 5, с. 27–38.
- Израэль Ю.А., Анохин Ю.А., Мяс Л.Т., Шерстюков А.Б.** Оценка и прогноз возможного изменения элементов климата и состояния вечной мерзлоты на территории Российской Федерации в 21 веке // Материалы Междунар. конф. “Криогенные ресурсы полярных регионов”. (Салехард, 2007 г.). Пущино, 2007, Изд-во Пущинского науч. центра РАН, т. 1, с. 127–129.
- Литтл Р.Дж.А., Рубин Д.Б.** Статистический анализ данных с пропусками. М., Финансы и статистика, 1991, 336 с.
- Мостеллер Ф., Тьюки Дж.** Анализ данных и регрессия. М., Финансы и статистика, 1982, 556 с.
- Павлов А.В.** Мониторинг криолитозоны. Новосибирск, Академ. изд-во “Гео”, 2008а, 229 с.
- Павлов А.В.** Тренды современных изменений температуры почвы на севере России // Криосфера Земли, 2008б, т. XII, № 3, с. 22–27.
- Павлов А.В., Ананьева Г.В.** Оценка современных изменений температуры воздуха на территории криолитозоны России // Криосфера Земли, 2004, т. VIII, № 2, с. 3–9.
- Павлов А.В., Перльштейн Г.З., Типенко Г.С.** Актуальные аспекты моделирования и прогноза термического состояния криолитозоны в условиях меняющегося климата // Криосфера Земли, 2010, т. XIV, № 1, с. 3–12.
- Сергеев Д.О., Ухова Ю.А., Станиловская Ю.В., Романовский В.Е.** Температурный режим многолетнемерзлых толщ и сезонноталого слоя в горах Северного Забайкалья (возобновление стационарных наблюдений) // Криосфера Земли, 2007, т. XI, № 2, с. 19–26.
- Сиротенко О.Д.** Методы оценки изменений климата для сельского хозяйства и землепользования: Метод. пособие. Обнинск, ВНИИГМИ–МЦД, 2007, 77 с.
- Трофимова Е.В.** Оледенение пещер Байкала // Криосфера Земли, 2006, т. X, № 1, с. 14–21.
- Шерстюков А.Б.** Изменения климата и их последствия в зоне многолетней мерзлоты России. Обнинск, ВНИИГМИ–МЦД, 2009, 127 с.
- Шерстюков Б.Г.** Региональные и сезонные закономерности изменений современного климата. Обнинск, ВНИИГМИ–МЦД, 2008, 347 с.
- Шимараев М.Н., Куимова Л.Н., Синюкович В.Н., Цехановский В.В.** Климат и гидрологические процессы в оз. Байкал в XX столетии // Метеорология и гидрология, 2002, № 3, с. 71–78.
- Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability.** Contribution of Working Group II to the Fourth Ass. Rep. of the Intergovern. Panel on Climate Change / Ed. by M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof et al. Cambridge, UK, Cambridge Univ. Press, 2007, 976 p. (<http://esg.llnl.gov:8443>).
- Meehl G.A., Covey C., Delworth T. et al.** The WCRP CMIP3 multimodel data set: a new era in climate change research // Bull. Amer. Meteorol. Soc., 2007, vol. 88, p. 1383–1394.
- Nakicenovic N., Alcamo J., Davis G. et al.** IPCC Special Report on Emission Scenarios (SRES). Working Group III, Intergovern. Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2000, 595 p. (<http://www.grida.no/climate/ipcc/emission/index.htm>).

Поступила в редакцию  
24 декабря 2009 г.