МОНИТОРИНГ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

DOI: 10.21513/2410-8758-2016-1-104-136 УДК 521.524.3

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА У ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ В 2015 Г.

Г.В. Груза ^{1),2)*}, Э.Я. Ранькова ^{1),2)}, Э.В. Рочева ^{1),2)}, О.Ф. Самохина ¹⁾

¹⁾ Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, Россия, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, д. 20б; ggruza@yandex.ru ²⁾ Институт географии Российской академии наук, Россия, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29

Резюме. Рассматриваются климатические особенности температурного режима Земного шара в 2015 г. у поверхности с детализацией по сезонам и по территории. Анализируются обновленные оценки текущего состояния современного глобального потепления. Приводятся глобальные распределения наблюдавшихся в 2015 г. локальных аномалий температуры (сезонных и годовых) и их пространственные обобщения для Земного шара в целом, обоих полушарий и крупных территорий — континентов, океанов и широтных поясов. Временные ряды выбранных характеристик и оценки тенденций их изменения анализируются для разных временных (месяц-сезон-год) и пространственных (глобальный, региональный, локальный) масштабов и за разные периоды времени. Все оценки базируются на данных стандартных инструментальных наблюдений месячного разрешения, продленных по декабрь 2015 г.

Полученные оценки указывают на продолжающееся глобальное потепление приземного климата, в котором основной вклад принадлежит Северному полушарию при доминирующей роли континентов. Наибольшая скорость потепления отмечается в арктических широтах. Тенденция к похолоданию обнаружена только в Антарктике. В целом, в южной полярной области оценки трендов статистически незначимы и указывают на отсутствие устойчивых однонаправленных тенденций в изменении температуры этого региона. От сезона к сезону картина «потепления» в деталях меняется, но во все сезоны на большей части Земного шара доминирует тенденция к потеплению. Потепление осенних сезонов отмечается на территории всех континентов, включая Антарктиду и, таким образом, охватывает всю сушу Земного шара. В сравнении с трендами последнего столетия (1916–2015 гг.), современное глобальное потепление у поверхности земли (1976–2015 гг.) ускорилось в 2.5–3.5 раза в Северном полушарии и в 1.5–2.5 раза в Южном.

Ключевые слова. Климат, изменение климата, приземная температура, глобальное потепление, линейный тренд.

CLIMATIC FEATURES OF SURFACE TEMPERATURE OVER THE GLOBE IN 2015

G. V. Gruza 1),2)*, E. Ya. Rankova 1),2), E. V. Rocheva 1),2), O. F. Samokhina 1)

¹⁾ Institute of Global Climate and Ecology,
 20B, Glebovskaya, 107258, Moscow, Russia; ggruza@yandex.ru
 ²⁾ Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences,
 29, Staromonetny lane, 119017, Moscow, Russia

Summary. Climatic features of surface temperature over the Globe in 2015 are considered with special attention to seasonal and spatial details. Updated estimates of the current state of recent global warming are analyzed. Global distributions of seasonal and annual local temperature anomalies in 2015 are presented along with global, hemispheric and regional averages (over large territories, that is, continents, oceans and latitudinal belts). Time series of chosen characteristics and estimates of their trends are analyzed for different time (monthly, seasonal, annual) and spatial (global, regional, local) scales and for different time intervals. All the assessments are based on standard monthly climate data (up to December, 2015). The results indicate continuing global warming of surface climate with the principal contribution from the Northern Hemisphere and the dominating role of continents. The most intensive warming is observed in the Arctic. A negative trend is found in the Antarctic only. In general, trends are not statistically significant in the southern polar region that indicates the absence of stable tendencies in temperature changes in this region. Patterns of seasonal trends vary in details, but the warming trend dominates over most of the Globe in all seasons. The warming in autumn is observed over all continents including Antarctic, thus covering all land areas of the Globe. In comparison with the century-scale trend (1916–2015), the recent global surface warming (1976–2015) is 2.5–3.5 times greater over the Northern hemisphere, while only 1.5–2.5 times greater in the Southern hemisphere.

Keywords. Climate, climate change, surface temperature, global warming, linear trend.

Введение

Предлагаемая статья содержит данные о наблюдаемых в течение 2015 года сезонных и месячных особенностях температурного режима у поверхности земли (аномалии и экстремумы) на территории Земного шара и о современных тенденциях их изменения. Полученные результаты (прежде всего в части текущих тенденций в изменении температурного режима земного шара) могут быть особенно интересны в сравнении с аналогичным анализом климатических условий 2014 г. (Груза и др., 2015). Все оценки базируются на данных стандартных метеорологических наблюдений за средней месячной температурой у поверхности земли.

Основные материалы статьи получены в рамках действующей в ИГКЭ Росгидромета и РАН системы оперативного мониторинга климата. До недавнего времени задача ограничивалась регионом России и стран СНГ, но

в настоящее время технология расширена с учетом задач мониторинга глобального климата. С 2015 г. на сайте ИГКЭ Росгидромета и РАН (ИГКЭ, 2016) в рубрике «Мониторинг климата» регулярно публикуются в отдельных разделах бюллетени «Обзор состояния и тенденций изменения климата России» и «Бюллетень мониторинга изменений климата Земного шара (приземная температура)», сезонные и годовые. Настоящая статья обобщает результаты мониторинга глобального климата за 2015 г., представленные в годовом обзоре ИГКЭ Росгидромета и РАН (ИГКЭ, 2016). На сегодняшний день фактографическую информацию о текущем состоянии климата Земного шара с учетом данных 2015 г. можно найти в пресс-релизах ВМО (WMO, 2016 а, b) и последних публикациях ведущих метеорологических центров: (NASA, 2016; NOAA, 2016; JMA, 2016; Met Office UK, 2015; Jones Ph., 2015). Эти публикации основаны, как правило, на данных оперативных наблюдений, лишь частично прошедших процедуры верификации. Заключительное заявление ВМО о состоянии климата Земного шара в 2015 г. должно быть завершено в марте 2016 г.

Данные

Основные результаты относятся к температурному режиму суши земного шара. Они получены авторами по данным метеорологических наблюдений на 3288 станциях глобальной сети (массив Т3288), из которых 703 станции расположены на территории России и стран СНГ (рис. 1). Все эти станции передают телеграммы КЛИМАТ и имеют достаточное количество наблюдений за современный период (отобраны станции с началом наблюдений не

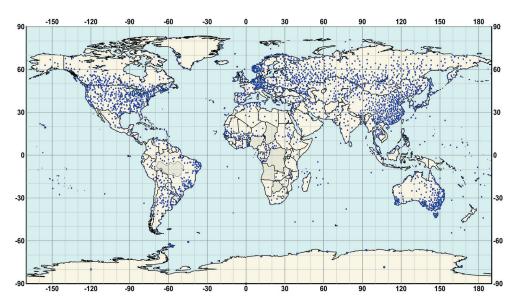


Рисунок 1. Сеть станций в массиве Т3288 ИГКЭ. Заштрихованы области, не освещенные данными наблюдений. В Гренландии и Антарктиде станции расположены вдоль береговой линии плюс станция AMUNDSEN-SCOTT в центре материка (Южный полюс Земли).

позже 1970 г., имеющие не менее 25 полных лет наблюдений в течение 1976—2010 гг.). Массив Т3288 содержит станционные данные о средней месячной температуре приземного воздуха на уровне станции (на высоте 2 м) за период 1901—2015 гг. (более подробные данные можно найти в статье (Груза и др., 2015) или в бюллетенях на сайте (ИГКЭ, 2016)).

Для полноты глобальной картины в статье параллельно приводятся результаты по данным массива HadCRUT4, версия 4.4.0.0, который создан и поддерживается совместно двумя научными коллективами — метеослужба Великобритании (Met Office Hadley Centre, http://www.MetOffice.gov.uk) и Университет Восточной Англии (CRU UEA, http://www.cru.uea.ac.uk). Массив содержит значения среднемесячных аномалий приповерхностной температуры на глобальной сети 5-градусных боксов над континентами и океанами (Morice et al., 2012; Osborn, Jones, 2014). Под приповерхностной температурой здесь понимаются объединенные данные аномалий температуры приземного воздуха над сушей (на высоте 2м) и аномалий температуры воды в поверхностном слое океанов (8-10 м). Массив формируется и ежемесячно обновляется в Met Office объединением и согласованием полей CRUTEM4 (версия 4.4.0.0, данные над сушей) и HadSST3 (версия 3.1.1.0, данные над океанами). В статье используются результаты, полученные по данным этого источника от 21.01.2016 г. (ниже он упоминается как Hadley/CRU).

Понятно, что на территории континентов оценки аномалий температурного режима по HadCRUT4 и T3288 должны быть близки. При этом, на наш взгляд, станционные данные T3288 более точно описывают ситуацию над континентами (особенно локализацию экстремальных аномалий), а объединенные поля HadCRUT4 (с учетом данных океанов) дают более полную и цельную глобальную картину. Ниже данные обоих источников будут упоминаться как характеристики приземной (синоним: приповерхностной) температуры.

Глобальные временные ряды для *суши Земного шара* и оценки по ним, полученные по массиву T3288 (ИГКЭ), дополнительно сравниваются с таковыми по данным CRUTEM4 (только суша, данные Hadley/CRU). При этом глобальные ряды HadCRUT4 и CRUTEM4 используются в точном соответствии с их версией на сайте источника от 21.01.2015.

Методика обработки данных

Пространственные распределения локальных аномалий или оценок трендов, месячных и сезонных, приводятся в форме изолиний в двух проекциях. Для глобальных полей (по данным HadCRUT4) используется псевдоцилиндрическая проекция Мольвейде; а для полей только над сушей земного шара (по данным T3288) — географическая (равнопромежуточная, цилиндрическая) проекция. Последняя, на наш взгляд, более удобна для анализа полей в высоких широтах обоих полушарий.

Наряду с локальными характеристиками и их распределениями, рассматриваются их обобщения для Земного шара в целом, полушарий и крупных

регионов: континенты, океаны и основные широтные пояса. К последним относятся: тропический пояс (между северным и южным тропиками), два умеренных пояса (между каждым тропиком и полярным кругом) и два полярных пояса (за каждым полярным кругом).

Пространственное осреднение для указанных территорий (регионов) выполняется по данным об аномалиях с учетом плотности наблюдений. Для этого территория региона покрывается регулярной широтно-долготной сеткой 5*5 гр., осредняются станционные аномалии внутри каждого образовавшегося бокса (ячейки сетки), после чего для каждого региона выполняется осреднение попавших в него ячеечных средних с весами, пропорциональными площади пересечения бокса с территорией региона.

Временное осреднение (среднее арифметическое за сезон, год) выполняется по данным о месячных аномалиях. При расчете сезонных средних (по 3 месяца, начиная с декабря предыдущего года) разрешено отсутствие не более одного слагаемого. Средние годовые (с января по декабрь текущего года) рассчитываются при наличии данных, по крайней мере, за 8 месяцев и при отсутствии пропусков за 2 соседних месяца. Названия сезонов соответствуют сезонам Северного полушария.

Аномалии (во всех случаях это отклонения от среднего за 1961–1990 гг.), как правило, сопровождаются соответствующими значениями эмпирической функции распределения (вероятности непревышения). В поле аномалий выделяются ареалы осуществления 5%-х экстремумов, под которыми понимаются значения, попавшие в 5%-е «хвосты» распределения (в число 5% самых холодных и самых теплых лет для рассматриваемой величины). Дополнительно выделяются рекордные экстремумы, наблюдавшиеся впервые. Вероятности непревышения и ранги рассчитываются за период с 1911 г. ввиду низкой освещенности территории данными наблюдений до этого срока (в частности, при расчете среднегодовой аномалии температуры в среднем по Тихоокеанскому региону с 1850 г. коэффициент освещенности впервые достиг 50% в 1911 г.).

Временные ряды приводятся за весь доступный период наблюдений и дополняются линейным трендом, характеризующим тенденцию (среднюю скорость) изменений рассматриваемой величины за период современного потепления (с 1976 года). Тренд рассчитывается методом наименьших квадратов и выражен в градусах за десятилетие (°С/10 лет). Как правило, оценки коэффициентов тренда сопровождаются уровнем статистической значимости и/ или вкладом в суммарную дисперсию ряда. При этом в анализ включаются лишь станции/боксы, отвечающие двум условиям: не менее 30 наблюдений в течение 1976—2015 гг. и обязательное наличие данных за последний год периода оценивания, т. е. за 2015 год.

Таким образом, в качестве «базовых» периодов здесь используются: 1961—1990 гг. — период оценки норм при расчете аномалий; 1911—2014 — период оценки вероятностей непревышения; 1976—2015 — период «современного потепления» при анализе временных рядов (для оценки трендов). В ряде случаев приводятся также оценки 100-летних трендов за 1916—2015 гг.

Результаты

1. Репрезентативность данных о глобальной температуре приземного воздуха над сушей Земного шара

На рис. 2 сравниваются временные ряды среднегодовых аномалий глобальной температуры *над сушей* Земного шара по двум источникам: опубликованные и признанные мировым научным сообществом ряды CRUTEM 4.4.0.0 (данные Hadley/CRU) и одноименные ряды, рассчитанные авторами по массиву Т3288 с использованием собственной методики (данные ИГКЭ). Сравнение выполнено для Земного шара в целом и каждого полушария. Количественные оценки близости рядов приведены в табл. 1. Аналогичные оценки по данным предыдущей версии CRUTEM 4.3.0.0 можно найти в статье Груза и др. (2015); оценки для сезонных аномалий приведены в соответствующих сезонных бюллетенях за 2015 г. (ИГКЭ, 2016).

Приведенные результаты убедительно иллюстрируют близость сравниваемых рядов и тем самым свидетельствуют, на наш взгляд, о репрезентативности данных массива Т3288 и реалистичности базирующихся на нем оценок (по крайней мере, для крупных регионов), предлагаемых ниже.

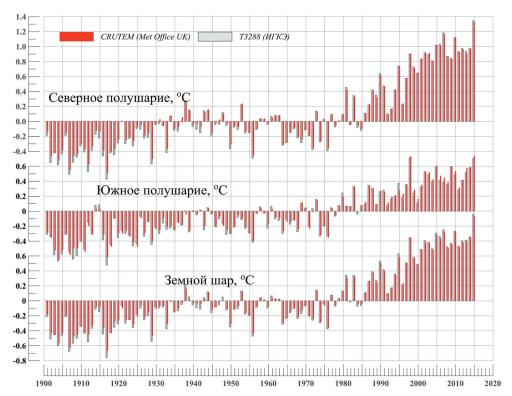


Рисунок 2. Временные ряды пространственно осредненных среднегодовых (январь—декабрь) аномалий температуры приземного воздуха (°С, 1901–2015 гг.) для территории Северного и Южного полушарий и Земного шара, рассчитанные по методике Hadley/CRU (красного цвета) и ИГКЭ Росгидромета и РАН (серого цвета) Использованы глобальные временные ряды CRUTEM 4.4.0.0 (Met Office UK) и станционные данные Т3288. Расчет глобальных рядов по данным Т3288 выполнен по методике ИГКЭ Росгидромета и РАН (см. введение).

Таблица 1. Оценки близости/различий одноименных временных рядов пространственно осредненных среднегодовых аномалий температуры приземного воздуха над сушей Земного шара (ЗШ), Северного (СП) и Южного (ЮП) полушарий, рассчитанных по методикам Hadley/CRU и ИГКЭ

Vanavaranyarayya	1	1976–201	5	1916–2015			
Характеристика	ЗШ	СП	ЮП	3Ш	СП	ЮП	
Корреляция рядов	0.999	1.000	0.991	0.998	0.999	0.994	
Среднее различие, °С	0.007	0.002	-0.015	-0.007	-0.015	-0.012	
СКО (сигма) различий, °С	0.018	0.015	0.031	0.030	0.028	0.033	
Среднее абсолютное различие, °С	0.016	0.013	0.027	0.024	0.023	0.027	
Максимальное различие (abs), °С	0.049	0.032	0.100	0.097	0.086	0.105	
Разность коэфф. тренда, °С/10 лет	0.006	0.005	-0.012	0.005	0.006	-0.001	

2. 2015 год — самый теплый в истории наблюдений

В табл. 2 приводятся данные о пяти самых теплых годах за период инструментальных наблюдений, а в табл. 3 — наблюдаемые в 2015 г. аномалии температуры и их повторяемость (вероятность непревышения, 1911—2014 гг.). В обеих таблицах оценки сгруппированы в три блока, в соответствии с используемым для их расчета массивом данных. Заметим, что приведенные в таблицах числовые значения в тексте приводятся лишь в исключительных случаях, для наглядности сопоставлений. Звездочкой в боковике табл. 3 выделены временные ряды глобально осредненных аномалий (для Земного шара и полушарий), которые используются в точном соответствии с их публикацией на сайтах Hadley/CRU. Остальные временные ряды рассчитаны авторами по методике ИГКЭ по данным в центрах 5-градусных боксов HadCRUT4 или по данным станционных наблюдений Т3288.

В соответствии с приведенными оценками, по всем трем источникам данных, над сушей и океанами и только над сушей, 2015 год оказался самым жарким в истории наблюдений для всех трех территорий — Земной шар, Северное и Южное полушарие (табл. 2). Единственным исключением является регион «суша Южного полушария», где по данным ИГКЭ 2015 год оказался вторым самым теплым после 1998 г., а по данным Hadley/CRU, наоборот, 1998 г. следует за 2015 годом.

Во всех рассматриваемых регионах, кроме Антарктики, средняя по территории региона аномалия была положительной.

Во всех случаях повышение температуры от 2014 к 2015 г. носит скачкообразный характер, и этот «скачок» много больше отрыва от предыдущего максимума. Особенно четко это видно на рис. 2, в соответствии с которым, повышение приземной глобальной температуры от 2014 к 2015 г. (без учета океанов) составило примерно 0.30, 0.35 и 0.15 °C для Земного шара, Северного и Южного полушарий, а отрыв от предыдущего максимального значения — примерно 0.20, 0.15 и 0.0 °C.

Таблица 2. Пять самых теплых лет для Земного шара (ЗШ), Северного (СП) и Южного (ЮП) полушарий по данным разных источников: средняя за год аномалия температуры VT и год наблюдения

№	31	Ш	С	П	Ю	ЭΠ								
1/15	VT, °C	год	VT, °C	Год	VT, °C	год								
	HadCRUT 4.4.0.0 (суша + море)													
1	0.745	2015	1.002	2015	0.490	2015								
2	0.567	2014	0.756	2014	0.462	1998								
3	0.559	2010	0.738	2010	0.413	2009								
4	0.544	2005	0.727	2005	0.396	2002								
5	0.536	1998	0.720	2007	0.379	2014								
	ИГКЭ Т3288 (суша)													
1	1.158	2015	1.346	2015	0.711	1998								
2	0.948	2007	1.186	2007	0.704	2015								
3	0.932	2010	1.122	2010	0.592	2009								
4	0.902	2005	1.032	2006	0.590	2005								
5	0.860	2006	1.020	2005	0.578	2014								
		CRI	UTEM 4.4.0.0	(суша)										
1	1.133	2015	1.329	2015	0.741	2015								
2	0.924	2007	1.164	2007	0.732	1998								
3	0.922	2010	1.116	2010	0.605	2005								
4	0.883	2005	1.022	2005	0.598	2009								
5	0.849	2014	1.011	2006	0.592	2014								

Дополнительно отметим, что в 2015 г. глобальная приповерхностная температура, т.е. средняя по всей территории Земного шара, на континентах и в океанах, превысила доиндустриальный уровень (1891–1900 гг.) на $1.08~^{\circ}$ С, причем отметка « $1.0~^{\circ}$ С» перекрыта впервые. Для полушарий это превышение составило $1.30~^{\circ}$ С (СП) и $0.87~^{\circ}$ С (ЮП).

Основной вклад в температурный рекорд 2015 года, по данным над сушей и океанами, с учетом площади региона, принадлежит умеренному поясу 20–65 гр.с. ш. (около 36%) и тропикам, 25 гр. ю. ш. — 25 гр. с. ш. (34%). Вклад Арктического пояса (северная полярная область) составил около 23%. На суше Земного шара основной вклад в аномалию 2015 г. принадлежит Евразии (~50%), затем — Африке и Северной Америке (по ~20%). Вклады регионов оценены как соответствующие им аномалии, осредненные по территории региона и взвешенные пропорционально площади (в процентах от глобальной аномалии).

Из регионов следует выделить теплый в течение всего года Тихий океан. Здесь в северных умеренных широтах (20–65 гр. с. ш.) экстремально теплый

Таблица 3. Пространственно осредненные значения аномалий приземной температуры в крупных регионах Земного шара в 2015 г., в среднем за год и по сезонам

n.	Год	ц	Зима		Весна		Лето		Осень			
Регион	vT ₂₀₁₅	F%	vT ₂₀₁₅	F%	vT ₂₀₁₅	F%	vT ₂₀₁₅	F%	vT ₂₀₁₅	F%		
	HadCRUT4 (суша + море)											
Земной шар*	0.745	100	0.661	99	0.678	100	0.722	100	0.799	100		
Северное полушарие*	1.002	100	0.950	99	0.892	100	0.929	100	1.067	100		
Южное полушарие*	0.490	100	0.372	97	0.461	97	0.516	99	0.533	100		
Атлантика (15-70N)	0.541	89	0.469	89	0.376	82	0.521	85	0.730	94		
Тихий океан (20-65N)	0.831	100	0.557	99	0.763	100	1.002	100	0.898	100		
Арктический пояс (65-90N)	1.869	97	1.950	93	2.468	96	1.274	96	1.869	93		
Умеренный пояс СП (25-65N)	1.078	100	1.191	98	1.003	99	0.921	98	0.977	98		
Тропики (25S-25N)	0.731	100	0.527	95	0.587	98	0.766	100	0.931	100		
Умеренный пояс ЮП (65-25S)	0.541	99	0.345	93	0.565	98	0.567	100	0.406	96		
Антарктический пояс (90-65S)	-0.845	13	-0.144	46	-1.343	13	-1.527	18	-0.309	38		
	И	ГКЭ-	T3288	суша	1)							
Земной шар	1.158	100	1.207	99	1.063	100	0.934	99	1.155	100		
Северное полушарие	1.346	100	1.495	99	1.301	100	0.983	97	1.294	99		
Южное полушарие	0.704	99	0.522	95	0.506	95	0.825	99	0.836	100		
Северная Америка	1.399	97	1.264	83	1.305	96	0.908	95	1.805	100		
Евразия	1.524	99	2.255	99	1.546	96	1.006	94	1.022	89		
Южная Америка	0.971	100	0.547	94	0.787	99	1.321	100	0.902	99		
Африка	1.143	99	0.578	81	1.056	96	1.327	100	1.420	100		
Австралия	0.772	96	0.723	95	0.014	62	0.787	92	1.518	99		
Антарктида	-0.897	14	-0.445	27	-1.053	18	-1.865	11	-0.060	47		
CRUTEM4 (cyma)												
Земной шар*	1.133	100	1.142	99	1.029	99	0.983	100	1.148	100		
Северное полушарие*	1.329	100	1.436	98	1.261	100	1.049	98	1.289	99		
Южное полушарие*	0.741	100	0.554	95	0.566	96	0.851	99	0.866	100		

Условные обозначения:

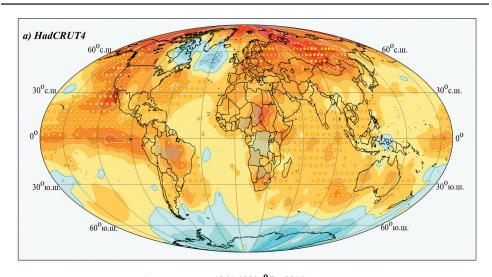
режим сохраняется непрерывно в течение всего года, а в восточной тропической части с начала года развивается мощный Эль-Ниньо, который по некоторым оценкам (Brennan, 2016; Sullivan, 2016; CPC/NCEP/NWS, 2016) пока не достиг своего пика.

Географические особенности температурного режима 2015 г. у поверхности Земного шара представлены на рисунках 3–5. На рис. 3 совмещены два поля среднегодовых аномалий температуры — над всей территорией Земного

^{1.} vT₂₀₁₅, °С — наблюденная аномалия в 2015 гг. (относительно 1961–1990 гг.);

^{2.} F_{vT}^{2015} – значение функции распределения $F = prob(X \le vT_{2015})$ по данным за 1911–2014 гг.

^{3.} Жирным шрифтом выделены рекордные значения, наблюдавшиеся в 2015 г. впервые с 1911 г.



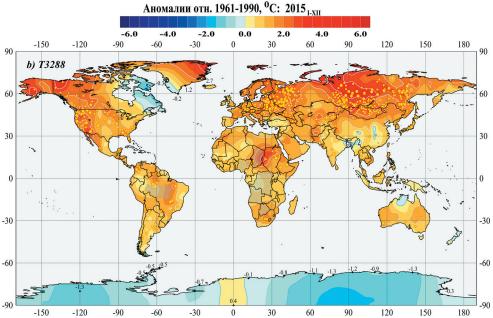
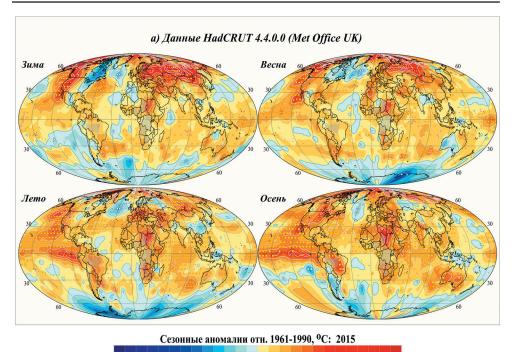


Рисунок 3. Пространственное распределение среднегодовых аномалий приземной температуры на территории Земного шара в 2015 г.: а) по данным в центрах 5-градусных боксов над сушей и океанами HadCRUT4 (Hadley/CRU); б) — по станционным данным T3288 (ИГКЭ).

Аномалии приведены в отклонениях от средних за 1961—1990 гг. Кружками белого (минимумы) и желтого (максимумы) цвета указано положение боксов/станций с рекордными значениями аномалий. Значками меньшего размера указано положение 5 %-х экстремумов. Для станций Антарктиды и Гренландии непосредственно в точках расположения станций показаны числовые значения наблюдаемых аномалий.

шара (данные HadCRUT4) и только над сушей (данные станций T3288). Аналогично, на рис. 4 приведены сезонные поля, также с океанами и без них. На рис. 5 показано распределение месячных аномалий для декабря 2015 г. (для любого из остальных месяцев такие распределения можно найти в соответствующем сезонном бюллетене ИГКЭ, 2016). На картах, построенных



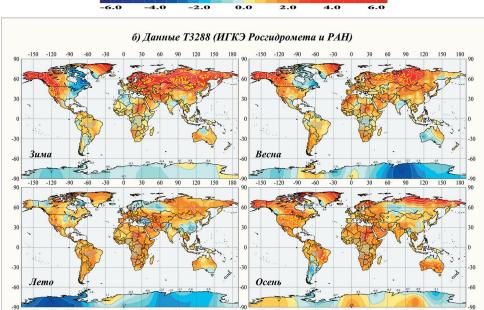


Рисунок 4. См. рис. 3, но для средних сезонных аномалий 2015 г.

по станционным данным Т3288, анализ над океанами отсутствует. На всех картах кружками белого и желтого цвета указано местоположение станций/боксов, зафиксировавших рекордное для данного срока (конкретный сезон/месяц или год) значение температуры, т. е. наблюдающееся впервые с 1911 г.; 5%-е экстремумы показаны значками того же цвета, но меньшего размера.

Глобальные поля среднегодовых аномалий на рис. 3 хорошо согласуются с региональными оценками в табл. 3. Действительно, отрицательные ано-

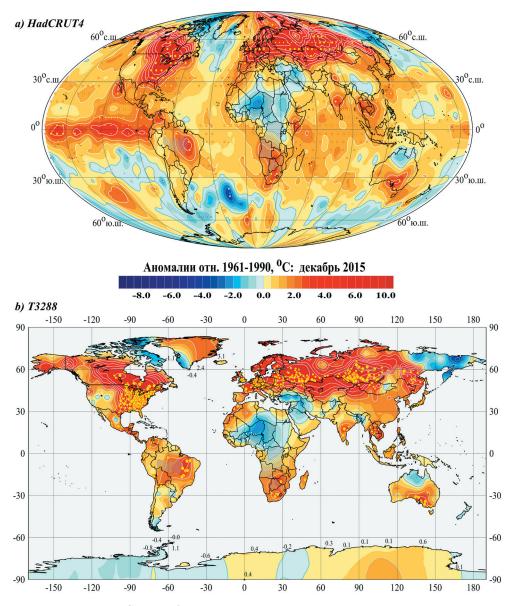


Рисунок 5. См. рис. 3, но для аномалий среднемесячной температуры в декабре 2015 г.

малии отмечены лишь в Антарктической области и на севере Атлантики. Во многих районах аномалии достигли рекордно высоких значений, в том числе: в Северной и Южной Америке, на западе Северной Атлантики, в Европе и центральной Сибири, в восточных тропиках Тихого океана и в Индийском океане, в Индии, Малайзии и в южных районах Австралии.

Из сезонных особенностей (табл. 3, рис. 4) отметим лишь основные.

В среднем по территории Земного шара (с учетом океанов и только над сушей) зимний сезон 2014/15 гг. оказался вторым самым теплым за весь период наблюдений, после 2007 года. Наиболее существенным был вклад Северного полушария, по-видимому, за счет теплого в течение всех зимних

месяцев Тихого океана (в зоне 20–65 гр. с.ш.) и Евразии. Среди сезонных аномалий, осредненных по территории регионов, рекордных значений не наблюдалось. Очень теплой, с многочисленными локальными рекордами, зима была в умеренных широтах Евразии (кроме Западной Европы), на западе Северной Америки и на прилегающей акватории Тихого океана. Ниже нормы температура была лишь на востоке Северной Америки, в Антарктическом регионе и в восточной части Тихого океана, вдоль побережья Южной Америки.

Температура *весеннего сезона* стала первым температурным рекордом 2015 г. — весна стала самым теплым в истории наблюдений весенним сезоном для Земного шара и Северного полушария, как в среднем по всей территории, так и только над сушей. На севере Европейской части России, на западе Канады, в восточных районах северной части Тихого океана, в центральных районах Африки аномалии были рекордно высокими. Необычно холодно, с рекордно низкими значениями температуры, было на востоке Канады (особенно в марте), в Северной Атлантике и в Южной полярной области, включая Антарктиду (март-апрель-май) и Австралию (апрель-май).

Летом 2015 г., по данным HadCRUT4 (суша+море), рекордно теплым для Земного шара и Северного полушария оказался не только сезон в целом, но и каждый его месяц. По этим данным сезонная аномалия глобальной температуры (0.722 °C) превысила прежний рекорд (0.622 °C, 1998 г.) сразу на 0.1 °C, тогда как отрыв от предыдущего максимума (0.608 °C, 2014 г.) составлял всего 0.014 °C. В Южном полушарии по этим данным сезон стал вторым самым теплым после 1998 г. Экстремально теплый температурный режим сохраняется в течение всего сезона в северной части Тихого океана (20−65 гр. с.ш.), в тропическом поясе (на востоке Тихого океана и в Индийском океане) и в южном умеренном поясе (65−25 гр. ю.ш.). Ниже климатической нормы летняя температура (в среднем за сезон) наблюдалась на севере Атлантико-Европейского сектора (от восточной Канады до Западной Сибири включительно), а также в Турции, на юге Китая и в Антарктике. В Турции (повсеместно) и в отдельных районах Китая зафиксированы новые рекордные минимумы.

Осень продолжила температурные рекорды 2015 г. Средняя за сезон и по территории аномалия температуры перекрыла прежние максимумы в Южном полушарии и в целом по Земному шару, с учетом и без учета океанов (по данным всех трех массивов). В Северном полушарии, в среднем по всей территории (данные HadCRUT4), рекордно теплым был сезон в целом и сентябрь. В среднем над сушей северного полушария (данные T3288 и CRUTEM4), осень 2015 г. оказалась вторым самым теплым осенним сезоном после рекордно теплого 2005 г. Тепло, как и в предыдущие сезоны, в тропической зоне Тихого океана, в Северной Атлантике и в Индийском океане. Положительные экстремумы отмечены на востоке Тихого океана в северном полушарии, над центральными и южными районами Северной Америки, на востоке Южной Америки. Отрицательные аномалии отмечены на юге Южной Америки и в близлежащих районах Антарктиды, на юге Сибири, в отдельных районах на юге Евразии и на севере Австралии.

В декабре 2015 г. (рис. 5) большая часть территории земного шара охвачена положительными аномалиями температуры с рекордными значениями на территории Европы, в южных районах Сибири, на востоке Северной Америки. В экваториальной зоне Тихого океана в западном полушарии ярко выделяется полоса крупных положительных аномалий в зоне Эль-Ниньо и в умеренном поясе северного полушария. Ниже нормы температура была в северо-западных районах Северной Атлантики, на северо-востоке России и в западных районах Тихого океана, в центральных районах Африки и на восточном побережье Средиземного моря, в западных районах Антарктиды и в Антарктических морях.

3. Крупномасштабные особенности многолетних изменений приземной температуры земного шара, 1850–2015 гг.

Наиболее общие особенности изменения температуры у поверхности земли во времени можно проследить по рис. 6, где в форме изоплет приведено изменение глобальной и полушарных температур за период инструментальных наблюдений, от месяца к месяцу (ось X) и от года к году (ось Y). Температура здесь выражена в отклонениях от средних за период 1961–1990 гг.

В соответствии с рис. 6, вплоть до 1930–1940-х гг. глобальная температура оставалась ниже уровня 1961–1990 гг., с кратковременными теплыми периодами в Северном полушарии в 1870–1880-х гг. и самым холодным периодом в обоих полушариях в начале 20-го столетия. Примерно в 1904–1913 гг., в отдельные месяцы средняя аномалия приземной температуры Южного полушария достигала –0.7, –0.8 °C. Потепление 1940-х гг. больше выражено в Северном полушарии в летне-осенний период года. Современное потепление также более интенсивно в Северном полушарии. В 2007–2010 гг. заметно снизилась активность потепления зимних сезонов, а весенне-летних, напротив, усилилась, но в последние годы сезонные различия, по-видимому, сглаживаются. Текущий год продолжает тенденцию к потеплению, в среднем, на уровне 2014 г. В Южном полушарии тенденция к потеплению, по-видимому, несколько усиливается.

На рис. 7 для каждого полушария и в целом для Земного шара ход температуры, рассчитанный по объединенным данным (синие кривые), сравнивается с ходом по данным только над сушей (черные кривые). Все ряды построены по опубликованным данным Hadley/CRU, чтобы исключить влияние возможных различий в методике осреднения. Численные оценки трендов рассматриваемых рядов приведены в табл. 4 для двух периодов: 1976–2015 гг. (современное потепление) и 1916–2015 гг. (последние 100 лет).

Тренд (средняя скорость) потепления в течение 1976—2015 гг. в целом для Земного шара, Северного и Южного полушарий составил 0.280, 0.335, 0.149 °С/10 лет над сушей (данные Т3288) и только 0.172, 0.239, 0.106 °С/10 лет над всей территорией (данные HadCRUT4). Современное потепление, таким образом, над сушей более значительно, чем интегрально (суша + море), и в Северном полушарии более значительно, чем в Южном. Межсезонные различия оценок в целом незначительны. Наиболее выражен тренд

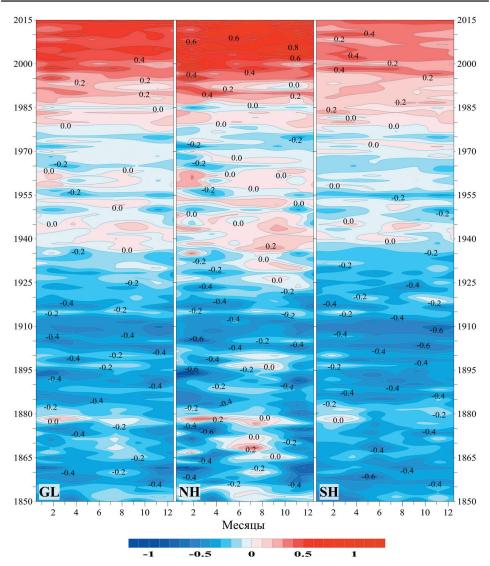


Рисунок 6. Изменение средней месячной приповерхностной температуры, осредненной по территории Земного шара (GL), Северного (NH) и Южного (SH) полушарий в течение периода с января 1850 по декабрь 2015 гг. (по данным HadCRUT4, Met Office UK).

в Северном полушарии, осенью. Соотношение оценок в зависимости от данных («только суша» или «суша + море»), полушария (Северное или Южное) и периода (1976–2015 гг. или 1916–2015 гг.) для большей наглядности приведено в табл. 5 (здесь b — коэффициенты линейного тренда из табл. 4).

Коэффициент $kI = b_{_{\rm T3288}}/b_{_{HadCRUT}}$ (первая строка табл. 5) сравнивает оценки глобальных трендов (то есть скорость потепления приземного климата) только над сушей и над той же территорией, но с учетом океанов. Тот факт, что все значения kI в таблице больше 1, означает, что во всех рассматриваемых случаях средняя скорость потепления материковой части региона (суши) больше, чем всего региона в целом (суша + океан), и, следовательно, суша теплеет быстрее океана. Значение kI = 1 означало бы, что тренды для тер-

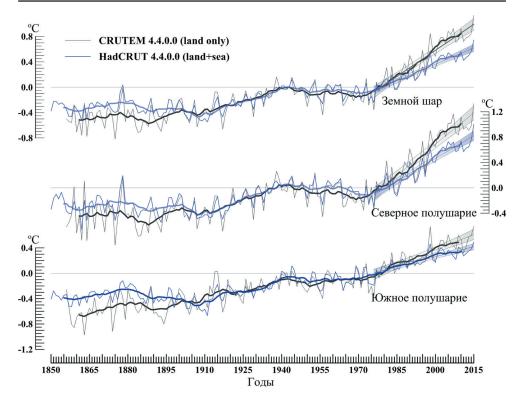


Рисунок 7. Изменение среднегодовых аномалий приземной температуры, осредненных по территории Земного шара, Северного и Южного полушарий, по объединенным данным над сушей и океанами (синие кривые) и по данным только над сушей (черные кривые).

Использованы глобальные временные ряды Hadley/CRU. Аномалии выражены в отклонениях от средних за 1961—1990 гг. Дополнительно показаны: ход 11-летних скользящих средних, линейный тренд за 1976—2015 гг. и его 95% доверительный интервал.

ритории суши и океанов одинаковы. С помощью простых арифметических выкладок можно показать, что при kI = 1.5 суша должна теплеть почти в 2 раза быстрее океана, а при kI = 2 — в 4 раза (оценки приведены, исходя из приближенного соотношения площадей суши и океанов: 1:2).

Судя по оценкам в табл. 5, показатель k_1 для периода 1976—2015 гг. варьирует в интервале 1.3—1.6 и, следовательно, скорость современного потепления над сушей Земного шара, в среднем, в 1.5—2 раза выше таковой на поверхности океанов. Однако налицо значительные сезонные особенности, касающиеся, в основном, Южного полушария. Здесь скорость потепления осенних сезонов над сушей почти в 3.5 раза превышает таковую над океанами (k_1 = 1.91), тогда как весной разрыв между ними практически отсутствует (k_1 = 0.96). Таким образом, в целом, вклад континентов (суши) в современное потепление существенно выше, чем океанов.

С другой стороны, оценки $k_2 = b_{\rm CII}/b_{\rm IOII}$ (вторая строка табл. 5) показывают, что в последние 40 лет Северное полушарие теплеет, в среднем, вдвое быстрее, чем Южное — оценки варьируют на уровне $k_2 = 2$. Но и здесь выделяются сезоны весны и осени для суши: разрыв между вкладом Се-

Таблица 4. Коэффициенты линейного тренда (°*C*/10 лет) глобальных временных рядов приземной температуры за 1976–2015 гг. и 1916–2015 гг. для Земного шара, Северного и Южного и полушарий, в среднем за год и по сезонам

		19	976–201	15		1916–2015								
Регион	год	зима	весна	лето	осень	год	зима	весна	лето	осень				
HadCRUT4 (суша + море)														
Земной шар	0.172	0.149	0.174	0.182	0.184	0.077	0.079	0.083	0.074	0.071				
Северное полушарие	0.239	0.206	0.236	0.249	0.259	0.084	0.089	0.094	0.078	0.074				
Южное полушарие	0.106	0.092	0.111	0.115	0.109	0.070	0.069	0.073	0.070	0.069				
	Т3288-ИГКЭ (суша)													
Земной шар	0.280	0.248	0.281	0.268	0.31	0.114	0.126	0.135	0.093	0.094				
Северное полушарие	0.335	0.297	0.357	0.314	0.357	0.126	0.144	0.156	0.098	0.097				
Южное полушарие	0.149	0.133	0.106	0.162	0.202	0.087	0.085	0.084	0.086	0.092				
СПИТЕМ4 (суша)														
Земной шар	0.274	0.244	0.271	0.267	0.306	0.109	0.119	0.126	0.094	0.093				
Северное полушарие	0.330	0.296	0.347	0.314	0.353	0.120	0.138	0.147	0.096	0.094				
Южное полушарие	0.161	0.139	0.119	0.173	0.213	0.087	0.082	0.084	0.091	0.092				

Примечания. Все оценки в таблице статистически значимы на уровне 0.1%.

верного и Южного полушарий весной усиливается, а осенью сглаживается $(k_2 = 3.34, 1.72 \text{ при среднем } 2.25).$

В целом, по-видимому, можно заключить, что основной вклад в современное глобальное потепление (у поверхности земли) принадлежит Северному полушарию при доминирующей роли континентов.

В сравнении с трендами 1916—2015 гг., современное глобальное (Земной шар, полушария) потепление у поверхности земли ускорилось в среднем в 2.5—3.5 раза в северном полушарии и в 1.5—2.5 раза в южном (см. k_3 в третьей строке табл. 5). Картина глобальных 100-летних трендов существенно более однородная: разрыв между потеплением с учетом и без учета океанов (k_1) заметно меньше, а разрыв между вкладом северного и южного полушарий (k_2) практически отсутствует.

Более полное представление о характере и широтно-долготной структуре многолетних изменений температуры дают двумерные изоплеты (рис. 8, 9), показывающие изменение среднеширотных и средних меридиональных аномалий одновременно во времени и в пространстве. На каждом рисунке приведен многолетний ход профилей среднегодовых аномалий с 1911 по 2015 гг. (с шагом год). Период с января 2010 г. по декабрь 2015 г. показан более детально, с шагом месяц. Диапазон широт на рис. 8 ограничен ввиду плохой освещенности полярных поясов данными наблюдений. Меридиональные средние на рис. 9 рассчитаны осреднением аномалий вдоль каждого меридиана в поясе 40–60 гр. с. ш.

Таблица 5. Соотношение оценок трендов средних годовых и сезонных аномалий глобальной температуры в зависимости от данных ($b_{\rm T~3288}/b_{\rm HadCRUT}$), полушария ($b_{\rm CII}/b_{\rm IOII}$) и периода ($b_{\rm 1976-2015}/b_{\rm 1916-2015}$)

Показатель/Регион	Год	Зима	Весна	Лето	Осень	Год	Зима	Весна	Лето	Осень		
b _{T3288} /b _{HadCRUT}		19	76–20	15		1916–2015						
Земной шар	1.63	1.66	1.61	1.47	1.68	1.48	1.59	1.63	1.26	1.32		
Северное полушарие	1.40	1.44	1.51	1.26	1.38	1.50	1.62	1.66	1.26	1.31		
Южное полушарие	1.41	1.45	0.95	1.41	1.85	1.24	1.23	1.15	1.23	1.33		
$\mathbf{b}_{\mathrm{CII}}/\ \mathbf{b}_{\mathrm{IOII}}$		19	76–20	15		1916–2015						
HadCRUT (суша + море)	2.25	2.24	2.13	2.17	2.38	1.20	1.29	1.29	1.11	1.07		
Т3288 (суша)	2.25	2.23	3.37	1.94	1.77	1.45	1.69	1.86	1.14	1.05		
b ₇₆₁₅ / b ₁₆₁₅			СП					ЮП				
HadCRUT (суша + море)	2.85	2.31	2.51	3.19	3.50	1.51	1.33	1.52	1.64	1.58		
Т3288 (суша)	2.66	2.06	2.29	3.20	3.68	1.71	1.56	1.26	1.88	2.20		

Из рис. 8, по-видимому, можно заключить, что современное потепление началось в 1970-х, но глобальным стало (и остается до сих пор) лишь к 1990-м. С середины 2010 г. потепление в Южном полушарии стало ослабевать, но в последние годы вновь наметилась тенденция к некоторому его усилению (особенно в зимние месяцы). Во внетропических широтах северного полу-

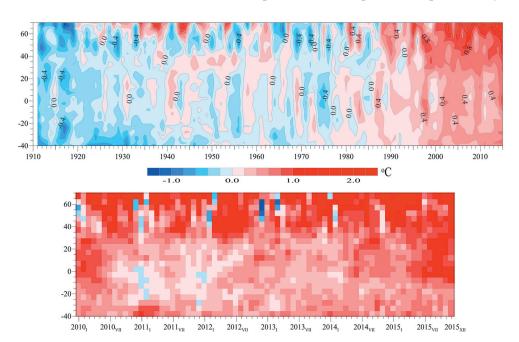


Рисунок 8. Изменение с широтой (ось Y) и во времени (ось X) среднеширотных аномалий среднегодовой (вверху, 1911–2015) и среднемесячной (внизу, $2010_{\rm I}$ – $2015_{\rm XII}$) температуры у поверхности земли.

Pасчет выполнен по данным Hadley/CRU (HadCRUT4, cyua+ mope).

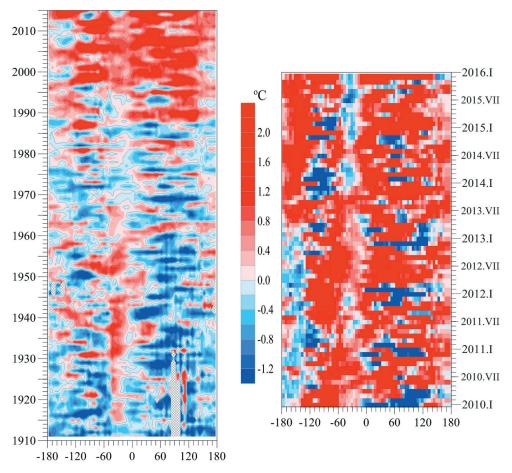


Рисунок 9. Изменение с долготой (ось X) и во времени (ось Y) аномалий среднегодовой (слева, 1850-2015 гг.) и среднемесячной (справа, $2010_{\rm I}-2015_{\rm XII}$) приповерхностной температуры, осредненных вдоль каждого меридиана в широтном поясе 40-60 с. ш. *Расчет выполнен по данным Hadley/CRU (HadCRUT4, суща + море)*.

шария наблюдаются эпизоды чередующихся холодных и теплых периодов, снижающие интегральную оценку годовых трендов. Судя по рис. 9, наибольший вклад в изменение температурного режима умеренных широт Северного полушария принадлежит континентам. Примерно с 2010 г. в восточном регионе России скорость потепления уменьшалась (за счет экстремально холодных зимних сезонов). Данные 2015 г. четко указывают на продолжающееся потепление, по крайней мере, в экваториальных широтах и умеренных широтах Северного полушария (особенно над сушей).

4. Изменение приземной температуры в крупных регионах мира в течение 1911–2015 гг.

На рис. 10 приведены временные ряды пространственно осредненных аномалий приземной температуры для континентов, океанов (Атлантический и Тихий в северном полушарии) и широтных поясов земного шара

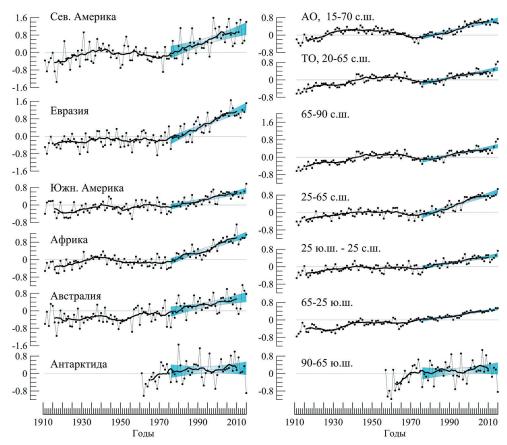


Рисунок 10. Временные ряды пространственно осредненных среднегодовых аномалий приземной температуры для континентов (слева), северных частей Атлантического и Тихого океанов (справа вверху) и основных широтных поясов земного шара (справа внизу).

Расчеты выполнены по методике ИГКЭ по данным Т3288 (для континентов) и HadCRUT4 (для океанов и широтных поясов). Аномалии приведены в отклонениях от средних за 1961–1990. Сглаженные кривые (жирная линия) получены как ход 11-летних скользящих средних. Показан линейный тренд за 1976–2015 гг. с 95 %-м доверительным интервалом (голубая заливка).

с 1911 года по текущий период. Временные ряды сезонных аномалий можно найти в (ИГКЭ, 2016).

Расчет временных рядов выполнен по методике ИГКЭ в применении к массиву Т3288 (*только суща*) для континентов и HadCRUT4 (суща + море) для океанов и широтных поясов. Как указывалось выше, период до 1911 г. исключен из рассмотрения, т. к. данные этого периода (особенно над океанами) представляются недостаточно полными и надежными. На всех временных рядах показан тренд за период 1976–2015 гг., условно принятый за период современного глобального потепления. Численные оценки трендов приведены в табл. 6 в среднем за год и по сезонам, и в табл. 7 — для 12 месяцев.

Можно видеть, что для среднегодовых температур (табл. 6) все тренды положительны, т.е. тенденция к потеплению приземного климата на протяжении последних 40 лет характерна для всех рассмотренных крупных регионов земного шара. Более того, во всех регионах, кроме Антарктики, оценки

Таблица 6. Оценки линейного тренда приземной температуры для северных частей Атлантического и Тихого океанов, континентов и широтных поясов земного шара, в среднем за год и по сезонам (1976–2015 гг.):

b — коэффициент тренда (°C/10 лет); D% — вклад тренда в дисперсию ряда

Da	Го,	Д	Зима		Весна		Лето		Oce	НЬ			
Регион	b	D%	b	D%	b	D%	В	D%	b	D%			
HadCRUT4 (суша + море)													
Атлантика (15–70° с. ш.)	0.208	77	0.201	75	0.175	69	0.217	60	0.246	74			
Тихий океан (40–60° с. ш.)	0.169	67	0.129	67	0.136	56	0.218	56	0.189	62			
65–90° с. ш.	0.548	72	0.501	36	0.626	55	0.434	70	0.583	62			
25–65° с. ш.	0.282	80	0.225	36	0.278	70	0.308	81	0.313	66			
25° ю. ш. – 25° с. ш.	0.141	61	0.135	36	0.138	46	0.146	59	0.147	54			
65–25° ю.ш.	0.134	82	0.087	51	0.136	71	0.130	70	0.121	78			
90–65° ю.ш.	0.057	2	-0.030	1	-0.052	1	0.093	1	0.280	23			
		IGCE	T-T3288	(суша	ı)								
Северная Америка	0.276	34	0.364	16	0.127	5	0.259	43	0.334	33			
Евразия	0.391	72	0.267	14	0.505	63	0.376	76	0.397	50			
Южная Америка	0.186	56	0.164	45	0.123	20	0.189	33	0.241	62			
Африка	0.307	73	0.265	36	0.338	62	0.305	68	0.302	58			
Австралия	0.168	24	0.100	6	0.073	2	0.169	15	0.325	32			
Антарктида	0.034	1	-0.027	1	-0.071	1	0.064	1	0.301	21			

Примечание. **Черным жирным** шрифтом выделены оценки, статистически значимые на 1%-м уровне (в т. ч. *жирным курсивом* — значимые только на 5%-уровне); **цветным шрифтом** показаны значения с уровнем значимости $\alpha > 10\%$. В этих случаях тренд статистически незначим даже на 10%-уровне, как положительный (красный шрифт), так и отрицательный (синий шрифт).

статистически значимы на 1%-м уровне. Наиболее существенный тренд (вклад в дисперсию более 80%) отмечается в умеренных широтах северного и южного полушарий, а также в Северной Атлантике и в арктическом поясе, где в целом за год вклад в дисперсию более 70%.

Для сезонных трендов (табл. 6) во всех регионах, кроме Антарктики в зимний и весенний сезоны, оценки также положительны и убедительное большинство из них статистически значимы на 1%-м уровне. Для осеннего сезона статистически значимая тенденция к потеплению подтверждается оценками для всех регионов без исключения.

Следует отметить, что даже в оценках месячных трендов (табл. 7) отрицательных значений коэффициентов тренда не было обнаружено ни в одном из месяцев и ни в одном регионе, кроме южной полярной области, где в целом по широтному поясу 90–65 гр. ю.ш. и по территории Антарктиды тренд ста-

Таблица 7. Коэффициенты линейного тренда среднемесячной приземной температуры для северных частей Атлантического и Тихого океанов, основных широтных поясов и континентов земного шара

		Месяцы, 1976–2015 гг.												
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	X1	XII		
HadCRUT4 (суша+море)														
АО, 15-70 с. ш.	0.21	0.18	0.17	0.18	0.18	0.19	0.21	0.26	0.24	0.27	0.22	0.22		
ТО, 40–60 с. ш.	0.12	0.13	0.11	0.13	0.17	0.19	0.23	0.24	0.20	0.19	0.18	0.15		
65–90 с. ш.	0.33	0.49	0.64	0.73	0.52	0.50	0.42	0.40	0.39	0.70	0.69	0.72		
25-65 с. ш.	0.25	0.23	0.30	0.27	0.27	0.28	0.30	0.34	0.30	0.33	0.30	0.24		
25 ю. ш. – 25 с. ш.	0.12	0.14	0.13	0.15	0.14	0.15	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15	0.14		
65–25 ю. ш.	0.09	0.09	0.11	0.14	0.13	0.15	0.12	0.12	0.11	0.14	0.11	0.07		
90–65 ю. ш.	-0.05	-0.05	-0.04	-0.19	0.03	0.09	-0.02	0.22	0.39	0.27	0.17	-0.04		
			I	GCE-1	3288	(суша)								
Сев. Америка	0.49	0.16	0.12	0.12	0.14	0.27	0.23	0.27	0.34	0.33	0.33	0.51		
Евразия	0.25	0.37	0.60	0.49	0.43	0.39	0.35	0.39	0.32	0.46	0.43	0.24		
Южн. Америка	0.18	0.14	0.13	0.16	0.07	0.26	0.11	0.19	0.31	0.21	0.21	0.18		
Африка	0.22	0.28	0.34	0.31	0.34	0.33	0.33	0.25	0.24	0.34	0.33	0.26		
Австралия	0.22	0.05	0.05	0.13	0.03	0.14	0.23	0.13	0.36	0.39	0.23	0.03		
Антарктида	0.05	-0.06	0.12	-0.33	0.00	-0.09	0.01	0.30	0.38	0.26	0.17	-0.09		

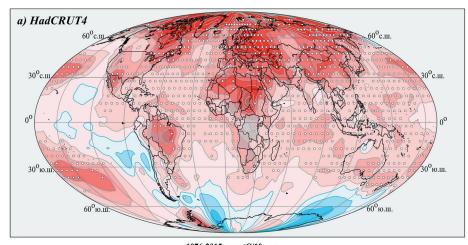
Примечание. **Черным жирным** шрифтом выделены оценки, статистически значимые на 1%-м уровне (в т. ч. *жирным курсивом* — значимые только на 5%-уровне); **цветным шрифтом** показаны значения с уровнем значимости $\alpha > 10\%$. В этих случаях тренд статистически незначим даже на 10%-уровне, как положительный (красный шрифт), так и отрицательный (синий шрифт). Обычный черный шрифт соответствует уровню значимости $5\% < \alpha <= 10\%$ (тренд статистически незначим на 5%-уровне, но значим на 10%-м).

тистически незначим. По-видимому, следует обратить внимание также и на случаи статистически незначимого положительного тренда, в основном на континентах. В южном полушарии — это Австралия и, в отдельные месяцы Южная Америка, а в Северном полушарии — Евразия и Северная Америка в зимне-весенний период года. Эти особенности хорошо согласуются с рассмотренными выше распределениями аномалий.

Наиболее значительный тренд (табл. 6, 7) отмечается весной и осенью в Арктическом поясе и Евразии — в отдельные месяцы до 0.6—0.7 °C/10 лет. Во внетропической зоне Северного полушария (Тихий океан в течение всего года, Евразия — весной и летом), в Атлантике и в южных умеренных широтах (осенью) линейный тренд объясняет более 60% изменчивости температуры. Из континентов, помимо Евразии, устойчивая тенденция к потеплению летних и осенних сезонов получена для Африки (вклад в дисперсию более 60%).

5. Географические особенности современных изменений климата земного шара, 1976—2015 гг.

Пространственные распределения оценок локальных трендов на территории земного шара, рассчитанные по данным о глобальных полях среднегодовых аномалий температуры за 1976—2015 гг., приведены на рис. 11. На верхнем фрагменте представлены оценки по объединенным данным HadCRUT4 над всей территорией земного шара, а на нижнем — только над сушей, по станционным данным Т3288. Распределения оценок для каждого из сезонов приведены на рис. 12.



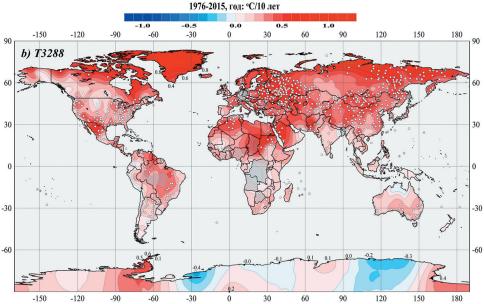
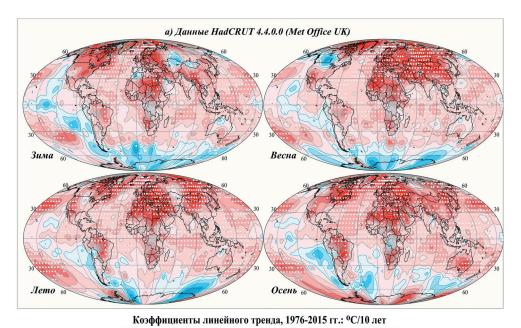


Рисунок 11. Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда среднегодовой температуры у поверхности Земного шара за период 1976–2015 гг. (°C/10 лет).

Использованы данные: a) HadCRUT4, Hadley/CRU (сеточные данные 5 × 5-гр. над континентами и океанами); б) Т3288, ИГКЭ (данные 3288 станций, суша). Для станций Антарктиды и Гренландии показаны числовые значения коэффициентов тренда. Белыми кружками выделены боксы/станции, на которых тренд статистически значим на 1 %-м уровне.

Напомним, что из анализа трендов были исключены станции (боксы) с отсутствием данных за 2015 г. или имеющие менее 30 лет наблюдений в течение 1976–2015 гг. Оставшихся станций в массиве Т3288 оказалось 1713 (на суше земного шара), а из 2592 боксов в массиве HadCRUT4 отвечают этим требованиям 1505 боксов (на всей территории континентов



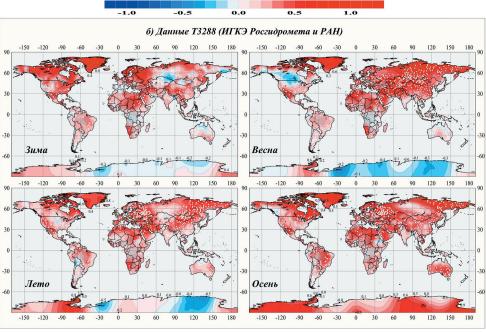


Рисунок 12. См. рис. 11, но для сезонных аномалий приземной температуры: а) над всей территорией Земного шара, включая океаны (по данным HadCRUT4 в центрах 5-градусных боксов, Hadley/CRU); б) над сушей Земного шара (по станционным данным Т3288, ИГКЭ Росгидромета и РАН)

и океанов). Тем не менее, эти станции/боксы достаточно равномерно покрывают рассматриваемую территорию земного шара. Исключение представляют отдельные районы в Африке и Южной Америке — на рис. 11, 12 они показаны штриховкой.

Глобальная картина трендов в изменении температурного режима последних 40 лет (1976–2015 гг.), представленная на рис. 11, в сравнении с 1976–2014 гг. изменилась незначительно. Напомним, что годовые локальные тренды приземной температуры за 1976–2014 гг. были положительны практически на всей территории суши Земного шара и статистически значимы на 5%-м уровне на 67% рассматриваемых станций. Эти станции расположены, в основном, в Северном полушарии — в Северной Америке (на территории США) и в Евразии (исключая Западную и Среднюю Сибирь и частично Казахстан).

По данным за 1976–2015 гг. оказалось, что *на суше земного шара* положительный тренд имеет место на 95.7% всех используемых станций (массив Т3288). При этом 65.8% полученных оценок статистически значимы на 1%-м уровне и еще 13.4% — на 5% уровне, то есть всего на 5%-м уровне тренд статистически значим на 79.2% общего числа используемых станций. Соответствующая статистика *для всей территории земного шара, включая океаны* (массив HadCRUT 4) практически та же: положительный тренд получен для 95.4% «боксов», статистически значимых на 1% уровне — 65.7% всех оценок, на 5%-м — 75.5%.

Наибольшая скорость потепления (более 0.6–0.8 °C/10 лет) отмечается в арктических широтах (по станционным данным — на арктическом побережье России и в Гренландии). Менее значительное по интенсивности, но статистически значимое ($\alpha = 1$ %) потепление отмечается на большой территории в Европе, Китае, в США и на востоке России, а также на севере Африки и Южной Америки, в западной части Антарктики.

От сезона к сезону картина «потепления» существенно менялась (рис. 12). Однако во все сезоны, по-прежнему, на большей части земного шара доминирует тенденция к потеплению.

Потепление *зимних сезонов*, в сравнении с 1976—2014 гг., несколько усилилось в регионе Северной Атлантики, включая восточное побережье Северной Америки и Скандинавию. Область похолодания заметно сократилась в Евразии и в Тихом океане (у берегов Северной Америки), но расширилась в Антарктических морях Южного океана. В целом интенсивность всех трендов зимнего сезона, положительных и отрицательных, достаточно слабая, особенно на территории континентов. Тренд к похолоданию зим практически всюду (кроме Антарктических морей) статистически незначим даже на 15% уровне.

Потепление *весенних сезонов* в 1976–2015 гг. также сохраняется на большей части земного шара (в Евразии, Африке, в западной части Тихого океана, в Индийском и Атлантическом океанах). Однако в Северной Америке, в восточных районах Тихого океана, в Антарктиде и Антарктических морях тренд отрицательный. При этом значения коэффициентов тренда во всех областях

похолодания статистически незначимы ($\alpha > 20\%$), а положительные тренды на значительных территориях статистически значимы на 1%-м уровне.

Для летних сезонов 1976—2015 гг., как было уже отмечено выше, положительный тренд также статистически значим ($\alpha = 1\%$) на большей части земного шара. Наиболее высокая скорость потепления (0.8–1.0 °C/10лет) отмечается в центральной Европе, в юго-восточных районах Евразии, на юго-востоке Австралии, в некоторых районах Северной и Южной Америки и Африки. В Сибири, Казахстане и Средней Азии, а также в Антарктиде и Антарктических морях и в Тихом океане (у западного побережья Южной Америки) тренд отрицательный. Однако, по-прежнему, тренд похолодания во всех случаях статистически незначим.

В изменении температурного режима осенних сезонов тенденция к потеплению последнего 40-летия проявляется еще более убедительно. Помимо обширных океанических акваторий, потепление отмечается на территории всех континентов, включая Антарктиду, и охватывает, таким образом, всю сушу земного шара. Для обширных областей в Атлантике и Индийском океане (практически вся северная акватория), в Тихом океане (в умеренных широтах Северного полушария и тропической зоне) и на всех континентах (прежде всего, в Евразии, на востоке США и Канады) получены оценки, статистически значимые на 1 %-м уровне. Слабое, статистически незначимое похолодание отмечено на востоке Тихого океана (в тропиках и вдоль побережья Южной Америки), в Антарктических морях и на западном побережье Канады.

Выводы

- 1. 2015 год стал на Земле самым теплым годом за всю историю наблюдений по всем трем наборам данных (HadCRUT4, T3288 и CRUTEM4) и для всех трех территорий (Земной шар, Северное и Южное полушария соответственно, ЗШ, СП, ЮП), с учетом и без учета океанов. Более того, каждый из 4-х сезонов 2015 г. попал в число первых двух самых теплых сезонов в Северном полушарии и в целом на Земном шаре с 1911 года. (Исключение: в среднем по территории суши СП, лето 2015 г. оказалось третьим из самых теплых летних сезонов, а год в целом для суши ЮП вторым после 1998 г.)
- 2. Аномалия глобальной приповерхностной температуры (HadCRUT4, суша + море) в 2015 г. составила 0.745 °C (ЗШ), что на 0.178 °C выше предыдущего максимума в 2014 г.; полушарные аномалии (СП, ЮП) впервые достигли значений 1.002, 0.490 °C. В среднем по территории суши (по данным Т3288 для ЗШ, СП и ЮП), аномалии в 2015 г. составили 1.158, 1.346 и 0.704 °C, соответственно.

Повышение глобальной температуры (Земной шар, СП, ЮП с учетом океанов) относительно доиндустриального уровня (1891—1900 гг.) достигло к 2015 г. 1.08, 1.30 и 0.87 °С, причем отметка «1 °С» глобальной температурой перекрыта впервые. Для этих же территорий, но без океанов (по данным Т3288, *только суща*) потепление составило 1.65, 1.83, 1.24 °С.

- 3. Основной вклад в температурный рекорд 2015 г. (по данным над сушей и океанами, с учетом площади региона) принадлежит умеренному поясу СП (около 36%) и тропикам (34%). Вклад Арктического пояса составил около 23%. Соответствующие аномалии равны: 1.08, 0.73 и 1.87 °С. Из регионов следует, прежде всего, выделить теплый в течение всего года Тихий океан. Здесь в северных умеренных широтах (20–65 гр. с.ш.) экстремально теплый режим сохраняется непрерывно в течение всего года, а в восточной тропической части с начала года развивается мощный Эль-Ниньо, который по некоторым оценкам, к концу года еще не достиг своего пика. На суше земного шара основной вклад в аномалию 2015 г. принадлежит Евразии (~50%), затем Африке и Северной Америке (по ~20%).
- 4. Во всех регионах, кроме Антарктики, 2015 год в целом был теплее уровня 1961—1990 гг. (базовый период для оценки норм). Во многих районах аномалии достигли рекордно высоких значений, в том числе: в Северной и Южной Америке, на западе Северной Атлантики, в Европе и центральной Сибири, в восточных тропиках Тихого океана и в Индийском океане, в Индии, Малайзии и в южных районах Австралии. В Тихом океане (20—65 гр. с. ш.) в течение всего года наблюдался экстремально теплый температурный режим, который сохраняется здесь непрерывно, от месяца к месяцу, с декабря 2013 г. Отрицательные аномалии, в среднем за год отмечены лишь в Антарктической области и в северной Атлантике (включая восточное побережье Канады).

Самый теплый сезон 2015 г. — осень, когда в обоих полушариях и в целом по Земному шару, с учетом и без учета океанов, были перекрыты прежние сезонные и, в ряде случаев, месячные «рекорды».

5. В изменении глобальной температуры (в среднем по территории Земного шара, Северного и Южного полушарий) на протяжении последнего столетия по-прежнему наблюдается тенденция к потеплению. Средняя скорость потепления (линейный тренд среднегодовых аномалий температуры) в течение 1976—2015 гг. составила 0.280, 0.335, 0.149 °C/10 лет над сушей (по данным Т3288) и только 0.172, 0.239, 0.106 °C/10 лет над всей территорией (по данным HadCRUT4). Таким образом, современное потепление над сушей более значительно, чем интегрально (суша + море), и в Северном полушарии более значительно, чем в Южном. Наиболее выражен тренд в Северном полушарии осенью.

В целом, по-видимому, можно заключить, что основной вклад в современное глобальное потепление (у поверхности земли) принадлежит Северному полушарию при доминирующей роли континентов.

В сравнении с трендами 1916—2015 гг., современное (1976—2015 гг.) глобальное потепление у поверхности земли ускорилось, в среднем, в 2.5—3.5 раза в северном полушарии и в 1.5—2.5 раза в южном. При этом в 100-летних трендах разрыв между потеплением суши и океанов заметно меньше, а разрыв между вкладом северного и южного полушарий практически отсутствует.

6. По данным о среднегодовой температуре приземного воздуха (массив Т3288) за 1976–2015 гг., тенденция к потеплению отмечается на 95.7% ис-

пользуемых станций. При этом 65.8% полученных оценок статистически значимы на 1%-м уровне (79.2% — на 5%-м).

Тренды среднегодовых температур, осредненных по крупным территориям (Земной шар и полушария, континенты, океаны, широтные пояса) во всех случаях положительны и всюду, кроме Антарктики, статистически значимы на 1%-м уровне. В сезонных и даже месячных оценках тренда тенденция к похолоданию также выявлена только в Антарктике (в зимний и весенний сезоны), притом статистически незначимая.

7. В соответствии с географическим распределением локальных трендов, наибольшая скорость потепления (более 0.6–0.8 °C/10 лет) отмечается в арктических широтах (по станционным данным — на арктическом побережье России и в Гренландии). Менее значительное по интенсивности, но статистически значимое ($\alpha = 1$ %) потепление отмечается на обширной территории в Европе, Китае, в США и на востоке России, а также на севере Африки и Южной Америки, в западной части Антарктики.

От сезона к сезону картина «потепления» в деталях меняется, но во все сезоны на большей части земного шара доминирует тенденция к потеплению. Потепление осенних сезонов отмечается на территории всех континентов, включая Антарктиду, и таким образом охватывает всю сушу Земного шара.

8. В южной полярной области оценки трендов в изменении приземной температуры в течение 1976—2015 гг., в целом за год и во все сезоны, кроме осени, статистически незначимы и указывают на отсутствие устойчивых однонаправленных тенденций в изменении температуры этого региона в последнем 40-летии.

Обсуждение

К настоящему времени (март 2016) национальными метеослужбами и ведущими мировыми центрами, осуществляющими мониторинг климата в квазиреальном времени, уже опубликованы предварительные результаты мониторинга приземного климата за 2015 г. (полное заявление ВМО о текущем состоянии климата еще не опубликовано). На наш взгляд, представленные в настоящей статье оценки вполне согласуются с выводами, сформулированными в этих публикациях (NASA, 2016; NOAA, 2016; JMA, 2016; Met Office UK, 2015; Jones Ph., 2015).

Отметим, что в статье рассматриваются характеристики температурного режима разного масштаба (от локального до глобального, и от месячного до 100-летнего) и в двух аспектах — «суша + море» и «только суша». Все результаты и глобальные обобщения для территорий «суша + море» получены в статье по данным апробированного и общепризнанного массива HadCRUT4 и потому не требуют дополнительного уточнения. Оценки для суши земного шара получены авторами по независимому источнику (данные станционных наблюдений на сети 3288 станций), с использованием собственной методики обработки. Репрезентативность этих данных, на наш взгляд достаточно убедительно, показана в статье сравнением с одноименными глобальными рядами Hadley/CRU (CRUTEM4, «только суша»). Для сопоставления реги-

ональных оценок, к сожалению, авторы пока не располагают необходимой информацией. На сегодня, можно привести дополнительно независимые оценки наблюдаемой в 2015 г. среднегодовой аномалии, в среднем для суши Земного шара, Северного и Южного полушарий, в сравнении со средним за 1901–2000 гг. (°C):

NOAA	1.33 ± 0.18	1.44 ± 0.21	1.04 ± 0.11
NASA	1.02	1.28	0.74
Hadley/CRU	1.21	1.38	0.86
ИГКЭ	1.25	1.42	0.83

Здесь данные NOAA взяты непосредственно из (NOAA, 2016). Для остальных источников использованы соответствующие глобальные временные ряды (NASA, 2016), CRUTEM4 и T3288 и рассчитаны разности между значениями в 2015 г. и средними за 1901–2000 гг.

Второй вопрос, который представляется важным для предстоящего более тщательного анализа, — экстремально теплый температурный режим в Тихом океане в течение всего года. Здесь на самом деле две крупных аномалии. С одной стороны — мощный Эль-Ниньо в восточной тропической части океана, а с другой — экстремально теплая область в северных умеренных широтах (20-65 гр. с.ш.), сохраняющаяся непрерывно, от месяца к месяцу, с декабря 2013 г. Эль-Ниньо отмечается практически во всех публикациях как основная возможная причина состоявшегося температурного рекорда 2015 г. (WMO, 2016б; NOAA/NASA, 2016; Sullivan, 2016; и др.). В этой связи представляется полезным обратить внимание исследователей на работы (Бондаренко и др., 2004, 2012), в которых обсуждается принципиально другой механизм формирования Эль-Ниньо, основанный на малоизвестном представлении о формировании апвеллинга в океане долгопериодными волнами-солитонами. Что касается северной части Тихого океана, то столь длительная (уже более 2 лет) и еще продолжающаяся экстремальная положительная аномалия, притом на фоне тающих ледников и холодной Северной Атлантики, требует, на наш взгляд, внимательного отслеживания дальнейшей динамики и более глубокого изучения.

Наконец, оценка статуса современного глобального потепления. По формальным критериям тренд глобальных температур на исследуемом 40-летнем периоде положительный, статистически значимый при очень жестких критериях, все годы 21-го столетия теплее всех предыдущих (кроме 1998) и т.д. Но при этом в отдельные сезоны есть весьма обширные территории с тенденцией похолодания, и даже в среднем за год тренд, в целом по Антарктическому региону и по Антарктиде, отрицательный (хотя и статистически незначим).

После публикации 5-го Оценочного доклада МГЭИК (IPCC, 2013), где тренд в изменении глобальной приземной температуры 1998–2012 гг. был оценен как «существенно ниже тренда за предыдущие 30–60 лет», активно обсуждалась проблема замедления современного глобального потепления

(«hiatus»). Позже, в (Karl et al., 2015), был представлен обновленный анализ расширенного массива данных станционных наблюдений GHCN.v3 и было показано, что в первые 15 лет XXI века продолжается потепление и его скорость, по крайней мере, не меньше таковой во второй половине 20-го столетия. На основании новых оценок в этой работе вывод о замедлении потепления признавался преждевременным и объяснялся, с одной стороны, недостаточным качеством используемых данных (огромные пространства вообще не освещены данными наблюдений) и, с другой стороны, коротким временным интервалом для подобных заключений.

На наш взгляд, целесообразнее отказаться от однозначных ответов на такие вопросы. Безусловно, качество данных и, тем более, период оценивания определяют накладываемые на ответ ограничения (Jones, 2016; Wehner, Easterling, 2015). В этой связи представляется более обоснованным рассматривать скользящие тренды в двумерной окрестности интересующих нас временных масштабов (Груза и др., 1992; Ранькова, 2005). На рис. 13 приведена такая диаграмма для коэффициентов линейного тренда, оцененных на скользящих отрезках временного ряда среднегодовых аномалий глобальной приземной

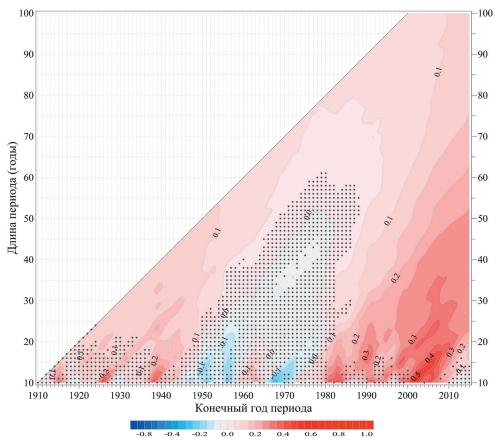


Рисунок 13. Коэффициенты линейного тренда среднегодовой глобальной температуры воздуха над сушей Земного шара по данным T3288 (ИГКЭ) в зависимости от длины периода (OY) и от его конечного года (OX)

температуры. Коэффициенты тренда рассматриваются здесь как функция продолжительности периода оценивания (ось *OY*) и текущего момента (ось *OX*). Такая диаграмма создает полную картину временной структуры изменений рассматриваемой величины (в данном случае — интенсивности глобального потепления). Метод алгоритмически более простой, чем вейвлетный анализ, и более наглядный для интерпретации. Дополнительно на рисунке затенены области, где тренд статистически незначим на 5%-м уровне.

Можно видеть, что тренд за последние 15 лет (2001–2015 гг.) положительный, равен примерно 0.1 °C/10 лет, статистически значим на 5%-м уровне (за 14 лет еще не был значимым). Начиная с 20-летнего периода (1996–2015 гг.) тренд уже равен 0.2 °C/10 лет и далее не опускается ниже этого уровня почти до 65-ти летнего интервала (1951–2015 гг.). На рисунке хорошо видно начало современного потепления во второй половине 1970-х гг., которое только к 1990-м годам стало проявляться на отрезках любой продолжительности внутри анализируемого периода.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю признательность коллегам В.Д. Казначеевой за внимательное прочтение рукописи и полезные обсуждения результатов, В.Д. Смирнову и А.В. Шевцовой за участие в работе по подготовке и сопровождению базы данных.

Список литературы

Бондаренко А. Л., Жмур В. В. 2004. О природе и возможности прогнозирования явления Эль-Ниньо — Ла-Нинья. — Метеорология и гидрология, N = 11, с. 39–49.

Бондаренко А. Л., Борисов Е. В., Серых И.В, Суркова Г.В., Филиппов Ю. Г. 2012. Закономерности формирования апвеллинга Мирового океана. — Метеорология и гидрология, № 11, с. 75–82. http://www.randewy.ru/gml/rossbi.html.

Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Рочева Э.В. 1992. Структура долгопериодных трендов глобальной температуры воздуха. — В сб. «Мониторинг и вероятностный прогноз климата». — С. — Петербург, Гидрометеоиздат, с. 3–20.

Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Рочева Э.В., Смирнов В.Д. 2015. Географические и сезонные особенности современного глобального потепления. — Фундаментальная и прикладная климатология, № 2, с. 41–62.

ИГКЭ, 2016. Бюллетень мониторинга изменений климата Земного шара. Приземная температура — 2015. http://climatechange.igce.ru, http://climatechange.su

Ранькова Э. Я. 2005. Климатическая изменчивость и изменения климата за период инструментальных наблюдений. — Диссертация в виде научного доклада на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, с. 40–41.

Brennan Pat. 2016. El Niño 2015–16: As California waits, Latin America is hit hard. NASA/Sea Level News/February 9, 2016. https://sealevel.nasa.gov/news/31.

CPC/NCEP/NWS, 2016. El-Nino/Southern oscillation (ENSO) diagnostic discussion. http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/enso_advisory/ensodisc.html.

IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, T.F. Stocker, D. Qin, G. — K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley, Eds. (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2013).

JMA, 2016. Global warming. Annual Anomalies of Global Average Surface Temperature (1891–2015). Global Average Surface Temperature Anomalies. http://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/gwp/temp/ann wld.html.

Jones Ph. 2015. Global Temperature Record. Updated January 2016. — Climate Research Unit: http://www.cru.uea.ac.uk/information-sheets.

Jones, P. 2016. The reliability of global and hemispheric surface temperature records. Adv. Atmos. Sci., 33(3), p. 269–282, doi: 10.1007/s00376–015–5194–4.

Osborn, T.J. and Jones, P. D., 2014. The CRUTEM4 land-surface air temperature data set: construction, previous versions and dissemination via Google Earth. Earth System Science Data 6, 61–68, doi:10.5194/essd-6–61–2014.

Karl, T.R., A. Arguez, B. Huang, J.H. Lawrimore, J.R. McMahon, M. J. Menne, T.C. Peterson, R. S. Vose, and H. — M. Zhang. 2015. Possible artifacts of data biases in the recent global surface warming hiatus. Science, 348, p. 1469–1472.

Met Office UK/ 2015. Our changing climate — the current science November 2015. http://www.metoffice.gov.uk/media/pdf/4/b/Our_changing_climate_-_the_current_science.pdf.

Morice, C. P., J.J. Kennedy, N.A. Rayner, and P.D. Jones, 2012. Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 dataset, J. Geophys. Res., 117, D08101, doi: 10.1029/2011JD017187.

NASA GISS. 2016. NASA, NOAA Analyses Reveal Record-Shattering Global Warm Temperatures in 2015. Jan. 20, 2016. http://www.giss.nasa.gov/research/news/20160120/.

NOAA. 2016. Annual Global Analysis for 2015. http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201601.

NOAA/NASA. 2016. Schmidt G.A., T.R. Karl. Annual Global Analysis for 2015. January 2016.

Sullivan, C. 2016. Record global warmth in 2015, but some places bucked the trend, Eos, 97, doi:10.1029/2016EO044463. Published on 25 January 2016.

Wehner, M.F., D.R. Easterling. 2015. The global warming hiatus's irrelevance. Science, 350, p. 1482–1483, doi:10.1126/science.350.6267.1482-d.

WMO. 2016 a. 2015 is hottest year on record, Press Release No 2, 25 January 2016.

WMO. 2016 b. Exceptionally strong El Niño has passed its peak, but impacts continue, Press Release No 3, 18 February 2016.

Статья поступила в редакцию 28.03.2016