

ОСОБЕННОСТИ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ ПО ДАННЫМ РЕГУЛЯРНОГО МОНИТОРИНГА И ВОЗМОЖНЫЕ ИХ ФАКТОРЫ

М.Ю. Бардин^{1,2}, Т.В. Платова^{1,2}, О.Ф. Самохина¹

¹*Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН*

²*Институт географии РАН*

mick-bardin@yandex.ru

Введение

Регулярный мониторинг температуры воздуха и атмосферных осадков для территории Российской Федерации ведется с 1998 г. (годовые бюллетени мониторинга климата), с 2005 г. выпускаются также сезонные бюллетени; все выпуски доступны на сайте ИГКЭ «Изменение климата России» (<http://climatechange.igce.ru/>). Данные мониторинга климата Российской Федерации представлены в ежегодном Докладе об особенностях климата на территории Российской Федерации Росгидромета; выпуски Доклада с 2005 года доступны на том же сайте. С 2009 года в рамках деятельности СЕАКЦ ведется мониторинг климата СНГ; сезонные и годовые бюллетени доступны на сайте СЕАКЦ на странице мониторинга (<http://seakc.meteoinfo.ru/climatemonitoring>). Все результаты мониторинга температуры и осадков получены с использованием методики, разработанной в ИГКЭ и представленной на сайте Центральной методической комиссии Росгидромета: <http://method.meteorf.ru/methods/long/monitor/monitor.html>.

С 2011 г. по решению Межгосударственного совета по гидрометеорологии СНГ выпускается Сводное ежегодное сообщение о состоянии и изменении климата на территории государств-участников СНГ, в котором данные о климате представлены

НГМС стран СНГ (также доступно на сайте СЕАКЦ на странице мониторинга).

Результаты мониторинга представлены в ряде публикаций в научных изданиях (например, [2, 6]). Здесь представлены новейшие доступные оценки для всей территории СНГ, в том числе полученные для территорий отдельных стран с использованием более густых сетей станций, чем доступные в базе данных ИГКЭ. Для территории Российской Федерации представлены ранее не опубликованные оценки неопределенности региональных трендов температуры. Проанализированы причины наблюдаемых особенностей изменения зимней температуры на территории Российской Федерации.

На рис. 1 представлена сеть 455 станций стран СНГ и Балтии, данные которых используются в мониторинге температуры и осадков, ведущемся в ИГКЭ.

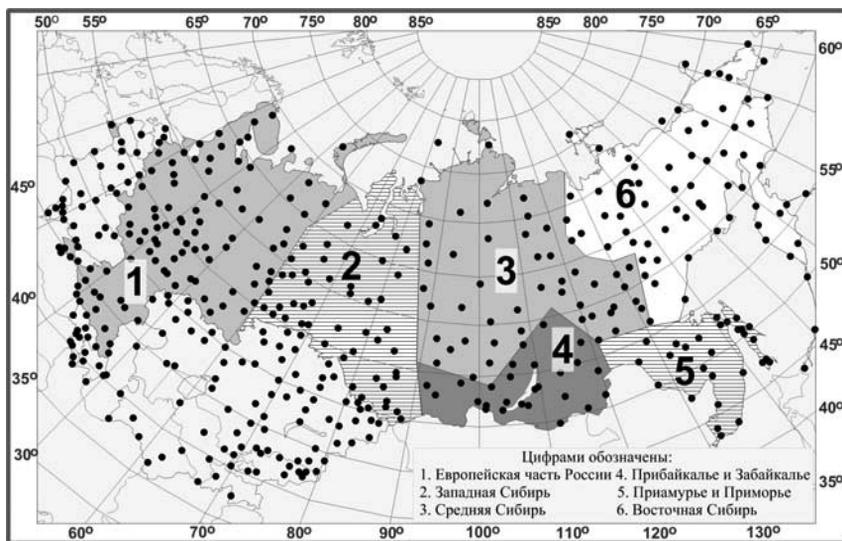


Рис. 1. Сеть 455 станций для мониторинга климата РФ и стран СНГ и физико-географические регионы РФ, по которым ведется региональное осреднение.

1. Годовые и сезонные изменения температуры и осадков в Северной Евразии

На рис. 2 приведено географическое распределение коэффициентов линейного тренда средних годовых и сезонных температур ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) за период 1976–2014 гг., которое дает детальную географическую картину современных тенденций в изменении температурного режима на исследуемой территории за период 1976–2014 гг. Тренд в точках наблюдений рассчитан по данным станционных наблюдений и картирован путем интерполяции в регулярную сетку.

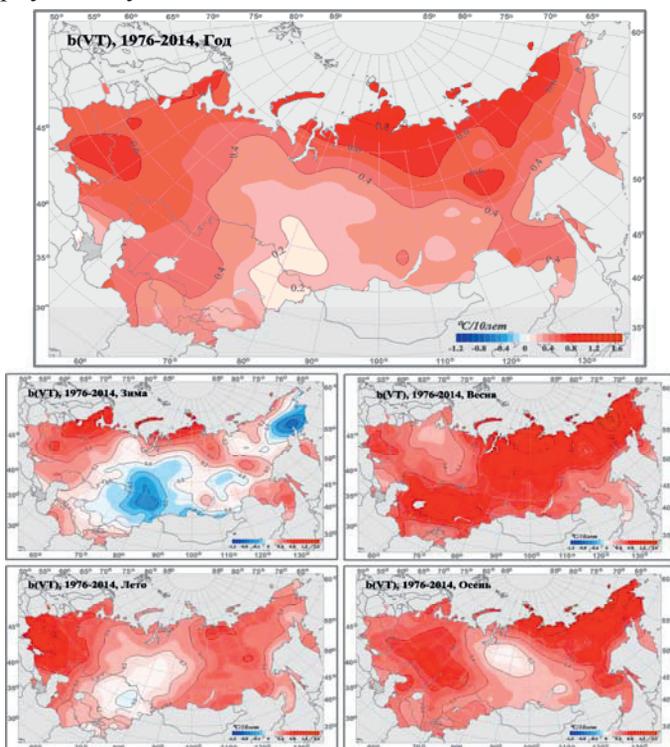


Рис. 2. Географическое распределение коэффициентов линейного тренда годовых и сезонных температур по данным наблюдений за 1976–2014 гг. ($^{\circ}\text{C}/10$ лет). Территория государств, где недостаточно данных для оценки трендов, заштрихована.

На большей части территории СНГ в период 1976–2014 гг. отмечается рост средних годовых температур воздуха, наиболее заметный на арктическом побережье: на Таймыре (около $+0,8$ °C/10 лет), на севере Якутии и Чукотского АО (более $+0,6$ °C/10 лет) и несколько меньше – в западной части региона: Молдове, Украине, Беларуси и европейской части России ($+0,5$ – $+0,6$ °C/10 лет), исключая Северный Кавказ и север Приуралья. Более слабое потепление (менее $+0,2$ °C/10 лет) наблюдается на востоке Казахстана и юге Западной Сибири.

Наиболее интенсивное потепление наблюдается весной и осенью на севере Сибири (на северо-востоке более $+1,40$ °C/10 лет) и в континентальных областях: весной в центральных областях Казахстана (до $+1,10$ °C/10 лет), а осенью несколько севернее – в Северном Казахстане и юге Западной Сибири, на Южном Урале ($+0,80$ – $0,94$ °C/10 лет). Летом максимальный темп роста температуры отмечается в Молдове, Украине, Беларуси и прилегающих к ним областях европейской части России ($+0,80$ – $1,03$ °C/10 лет).

Зимой наибольший рост температуры сосредоточен на арктическом побережье от Кольского п-ова до моря Лаптевых (более $+0,70$ °C/10 лет), в европейской части СНГ, Туркменистане и в Приморье. Выделяются две области, где в среднем за период 1976–2014 гг. температура уменьшалась. Первая из этих областей (на юге Сибири – северо-востоке Казахстана) впервые обнаружилась для периода 1976–2010 гг. и ежегодно расширяется. Скорость похолодания в центре этой области достигает $-0,5$ °C/10 лет. Другая область похолодания зимой (на дальнем северо-востоке России) – до $-0,6$ °C/10 лет – устойчиво наблюдается все последние годы, но уменьшается. Летом имеется небольшая область слабого (более $-0,1$ °C/10 лет) похолодания на северо-востоке Казахстана.

Однонаправленные тенденции современных климатических изменений на территории СНГ выражены в ходе осадков значительно слабее, чем в ходе температуры, и обычно неустойчивы во времени. На рис. 3 приведено географическое распределение локальных коэффициентов линейного тренда годовых сумм осадков за 1976–2014 гг. Оценки получены для относительной аномалии осадков, рассчитанной по точечным (станционным) данным о годовых/сезонных суммах осадков, выраженным в процентах от соответствующих годовых/сезонных норм 1961–1990 гг.

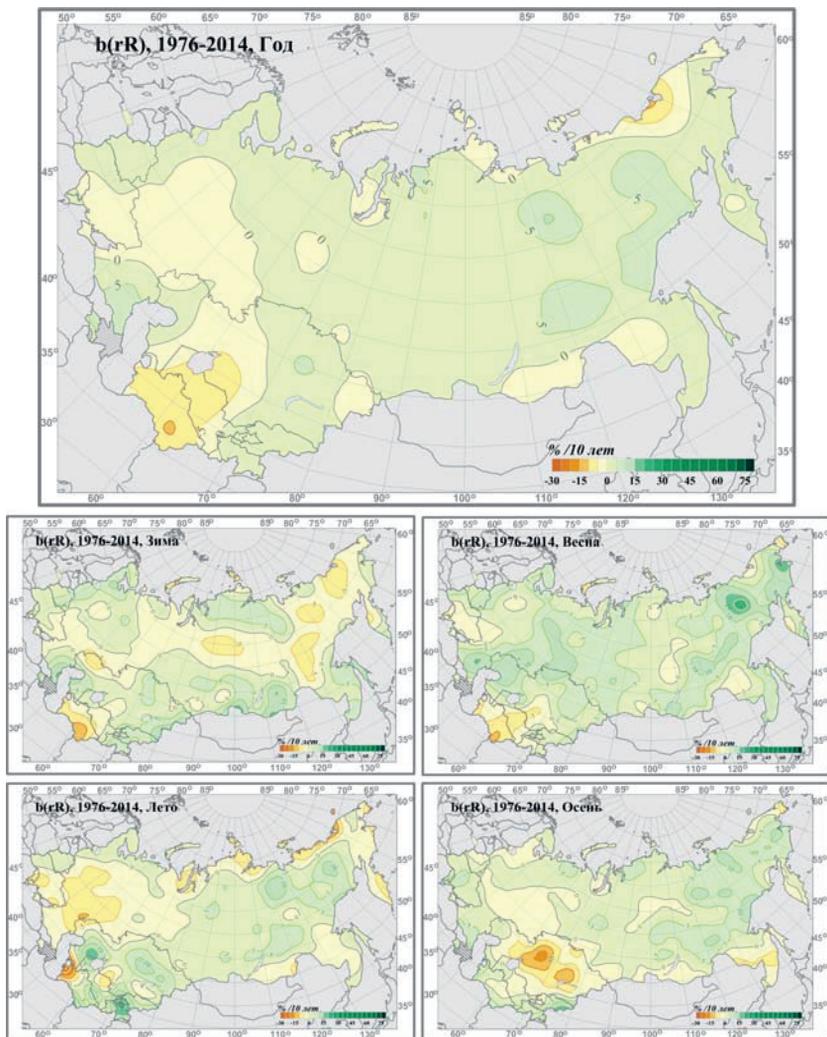


Рис. 3. Географическое распределение коэффициентов линейного тренда аномалий атмосферных осадков за 1976–2014 гг. (% нормы/10 лет), в среднем за год и по сезонам. Территория государств, где недостаточно данных для временного осреднения, заштрихована.

В изменении годовых сумм осадков на территории Северной Евразии преобладает тенденция к увеличению годовых сумм осадков, особенно на юге европейской части России, в Якутии, на побережье Охотского моря (более 5 % нормы за 10 лет). Заметная тенденция к убыванию осадков (более 5 % нормы за 10 лет) отмечается в прилегающих к Аралу областях Казахстана и Узбекистана, в Туркменистане и на побережье Восточно-Сибирского моря.

Тенденция к росту осадков преобладает в Северной Евразии во все сезоны, кроме зимы. Весной она наиболее выражена; летом и осенью на значительных территориях осадки убывают, а зимой территории Северной Евразии, где осадки убывают и где возрастают, примерно одинаковы.

Наиболее заметный рост осадков (более 10 % нормы за 10 лет) отмечается весной вокруг Каспия (российского и казахского побережий), на Урале, в Западной Сибири и на севере Казахстана, в дальневосточных регионах России. Убывание быстрее 5 % нормы за 10 лет наблюдается лишь в Туркменистане, центральных областях Узбекистана и прилегающих областях Казахстана, на юге Кавказского региона.

Осенью рост осадков (более 5 % нормы за 10 лет) наиболее выражен в дальневосточных регионах России, Кавказском регионе, центре Украины, на востоке Таджикистана и Кыргызстана. Крупная область уменьшения осадков (со скоростью, превышающей 5 % нормы за 10 лет) охватывает большую часть Казахстана. Уменьшение осадков отмечается также в Приамурье и Приморье.

Зимой существенный рост осадков (более 5 % нормы за 10 лет) наблюдается на северо-западе России, в Беларуси, северной части Каспийского региона, на севере Западной и Средней Сибири, Прибайкалье и Забайкалье, Приморье и на Сахалине, в южных приграничных регионах азиатской части России, Казахстане и Кыргызстане. Основные области убывания осадков: Южный Урал, Туркменистан, центр Сибири и дальний северо-восток России.

Летом осадки растут (местами сильно) в Казахстане и Средней Азии, в восточных регионах Сибири. Области убывания охватывают запад Туркменистана, центральные районы Узбекистана, территорию Молдовы и смежные области Украины, центр европейской части России, арктическое побережье азиатской части России.

В табл. 1 приведены региональные оценки линейных трендов для температур, осредненных по территориям государств СНГ. Оценки трендов получены с использованием рядов ежемесячных стационарных данных [10], предоставленных НГМС стран-участниц СНГ, либо приведены оценки, полученные непосредственно НГМС. По территории Азербайджана оценки трендов не получены. В таблице: а – коэффициент линейного тренда; D – коэффициент детерминации (доля учтенной трендом дисперсии ряда).

Таблица 1

Оценки линейного тренда осредненных по территориям государств СНГ средних сезонных температур за период 1976–2014 гг.

Регион	Год		Зима		Весна		Лето		Осень	
	а	D	а	D	а	D	а	D	а	D
Армения	0,36	25	0,21	2	0,38	16	0,38	22	0,37	17
Беларусь	0,56	41	0,51	6	0,52	29	0,75	47	0,42	20
Казахстан	0,32	20	-0,05	0	0,67	24	0,18	8	0,26	5
Кыргызстан ³	0,18	15	0,10	2	0,42	15	0,05	6	0,24	9
Молдова	0,58	46	0,30	3	0,64	30	0,91	66	0,45	26
Россия ¹	0,42	40	0,15	1	0,58	33	0,42	60	0,50	26
Таджикистан ²	0,18	16	0,11	1	0,36	14	0,03	0	0,21	13
Туркменистан ¹	0,38	39	0,28	4	0,53	28	0,32	30	0,39	18
Узбекистан	0,29	32	0,07	0	0,57	24	0,23	18	0,35	16
Украина ²	0,57	44	0,40	6	0,52	24	0,73	51	0,44	24

Примечание: тренды рассчитаны с использованием следующих рядов:

- ¹ данные БД мониторинга климата (ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН»;
- ² 1936–2012 гг. – данные НГМС Таджикистана и Украины, 2013 и 2014 гг. – данные телеграмм КЛИМАТ, полученные в оперативном потоке. Остальные оценки получены по данным, предоставленным НГМС;
- ³ оценки получены НГМС Кыргызстана.

В целом за год на территориях всех государств СНГ наблюдается потепление: разброс линейного тренда за 1976–2014 гг. составляет преимущественно от +0,3 °C/10 лет до +0,6 °C/10 лет (для Кыргызстана и Таджикистана – +0,18 °C/10 лет); тренды значимы

на уровне 1 %. Наибольшая скорость потепления (более +0,55 °C/10 лет) отмечена на территориях Молдовы, Беларуси и Украины.

Сезонные тренды также положительны во всех государствах, за исключением зимы в Казахстане, где отмечается небольшой отрицательный тренд (тренд за 1976–2012 гг. был еще положительным). Отметим, что в зимний сезон тренды температуры наименее существенны (в смысле вклада в суммарную изменчивость) и незначимы. Стоит отметить значимые на 1%-ном уровне тренды осенних температур в Молдове, Беларуси, на Украине и в России.

2. Изменения температуры регионов Российской Федерации

В табл. 2 представлены оценки годовых и сезонных трендов физико-географических регионов РФ (карта регионов представлена на рис. 1). В таблице: b_1 – коэффициент линейного тренда, °C/10 лет; I – полуширина доверительного интервала ($b_1 - I$, $b_1 + I$); $D\%$ – вклад тренда в дисперсию. Тренды положительны для всех регионов за год и во все сезоны, кроме зимы, когда в Западной Сибири тренд отрицателен (–0,14 °C/10 лет), нулевой – в Прибайкалье и Забайкалье, близок к нулю – в Восточной Сибири. Наибольшая скорость роста среднегодовой температуры отмечается в европейской части России (+0,52 °C/10 лет) и Восточной Сибири (+0,51 °C/10 лет).

Весной во всех регионах европейской части России (кроме Приамурья и Приморья) наблюдается самый быстрый сезонный рост температуры, особенно в регионах Средняя Сибирь и Восточная Сибирь (более +0,7 °C/10 лет). Летом наиболее быстрый рост температуры отмечается в азиатской части России (0,58 °C/10 лет). В Западной Сибири рост температуры мал (лишь +0,17 °C/10 лет), и тренд незначим даже на уровне 5 %. Осенью наиболее быстрый рост температуры наблюдается на западе и на востоке страны: в регионах европейской части России (+0,59 °C/10 лет) и Восточной Сибири (+0,76 °C/10 лет); в Средней Сибири и Прибайкалье и Забайкалье рост температуры значительно слабее (+0,37 и +0,27 °C/10 лет соответственно) и тренд незначим на уровне 5 %.

Таблица 2

Оценки линейного тренда регионально осредненной температуры приземного воздуха для регионов России за 1976–2014 гг.

		Россия	Европейская часть РФ	Западная Сибирь	Средняя Сибирь	Прибайкалье и Забайкалье	Приамурье и Приморье	Восточная Сибирь
Год	b_1	0,42**	0,52**	0,27*	0,42**	0,32**	0,38**	0,51**
	I	0,174	0,211	0,244	0,262	0,212	0,149	0,189
	D%	40	40	12	22	20	42	45
Зима	b_1	0,15	0,43	-0,14	0,10	0,00	0,31*	0,07
	I	0,460	0,609	0,763	0,715	0,569	0,420	0,352
	D%	1	5	0	0	0	7	0
Весна	b_1	0,58**	0,42**	0,64**	0,73**	0,54**	0,29*	0,77**
	I	0,274	0,299	0,407	0,407	0,378	0,297	0,347
	D%	33	18	21	26	18	10	35
Лето	b_1	0,42**	0,58**	0,17	0,42**	0,47**	0,38**	0,45**
	I	0,114	0,252	0,256	0,189	0,192	0,170	0,164
	D%	60	37	4	35	40	36	45
Осень	b_1	0,50**	0,59**	0,38	0,37	0,27	0,53**	0,76**
	I	0,279	0,325	0,453	0,478	0,333	0,231	0,306
	D%	26	27	7	6	7	37	40

Примечание: * тренд значим на уровне 5 %,
 ** тренд значим на уровне 1 %.

Наибольшая неопределенность оценок региональных трендов температуры воздуха наблюдается в зимний период, когда во всех регионах, кроме Приамурья и Приморья, тренд незначим даже на 5%-ном уровне; наименьшая – летом, когда почти во всех регионах полуширина 5%-ого доверительного интервала не превышает половины величины тренда (значим на 1%-ном уровне, кроме Западной Сибири). Весной оценки тренда также имеют высокую значимость, но относительная величина неопределенности выше, чем летом. Осенью тренд значим на уровне 1 % в регионах Европейской части России, Приамурье и Приморье, Восточная Сибирь; в остальных регионах страны тренд незначим даже на уровне 5 %;

полуширина 5%-ного доверительного интервала больше величины тренда, т. е. доверительный интервал содержит нулевое значение.

Ниже описан метод оценки доверительного интервала для величины линейного тренда и его ошибки, связанной с неопределенностью расчета региональных средних температур.

Для оценки тренда рассматривается обычная модель:

$$Y_i = b_1 x_i + b_0 + w_i.$$

Здесь x_i – время (годы); Y_i – соответствующие значения региональной средней климатической переменной; w_i – климатический шум, который мы полагаем некоррелированным (что вообще говоря не так; но межгодовые корреляции невелики, их учет значительно усложняет, но не сильно улучшает оценки).

Согласно стандартной теории линейной регрессии [11] угловой коэффициент b_1 вычисляется по формуле:

$$b_1 = \frac{\sum Y_i(x_i - E_x)}{\sum (x_i - E_x)^2}.$$

Рассмотрение совместных доверительных интервалов для углового коэффициента b_1 и свободного члена b_0 с вероятностью одновременного накрытия равной $1 - \alpha$ дает для b_1 доверительный интервал:

$$b_1 \pm u_{2,n-2,p}^\alpha S / \{ \sum (x_i - E_x)^2 \}^{1/2},$$

где $\rho = -nE_x / (n\sum x_i^2)^{1/2}$; $(n-2)S^2 = \text{RSS} = \{ \sum (Y_i - EY)^2 - b_1^2 \sum (x_i - E_x)^2 \} = (1 - R^2) \sum (Y_i - EY)^2$; RSS – остаточная сумма квадратов; R^2 – коэффициент детерминации:

$$R^2 = \{ \sum (Y_i - EY)(x_i - E_x) \} / \{ \sum (Y_i - EY)^2 \sum (x_i - E_x)^2 \};$$

$u_{2,n-2,p}^\alpha$ – распределение максимума из k наблюдений переменной с распределением Стьюдента $t(\alpha, n-2)$ с попарной корреляцией ρ . Значения величины u табулированы для разных уровней значимости α . Вычисленные по формуле доверительные интервалы для региональных трендов температуры воздуха и осадков представлены в табл. 2. Там же выделены значения тренда, значимые на уровне 5 % и 1 %, но значимость оценивалась по простому t -критерию для гипотезы $H: b_1=0$ ($T = b_1 \{ \sum (x_i - x_{cp})^2 \}^{1/2} / S$).

Преыдущие оценки предполагали, что имеются точные значения региональных средних: это, разумеется, не так – имеется

дополнительная неопределенность, связанная с ошибкой осреднения (см. выше), и уравнение регрессии должно быть записано как $Y_i = b_1 x_i + b_0 + w_i + e_i$, где e_i – ошибка осреднения, которую мы полагаем случайной величиной с нулевым средним, некоррелированной с w_i (и также нулевой автокорреляцией). Тогда остаточная сумма квадратов регрессии равна сумме квадратов w_i и e_i :

$$\begin{aligned} (n-2)S^{*2} &= \text{RSS}^* = (1-R^2)\sum (Y_i - EY)^2 + \sum e_i^2 = \\ &= (n-1)\{(1-R^2)\sigma^2(Y) + \sigma^2(e_i)\} = \\ &= (n-1)\sigma^2(Y)\{(1-R^2) + \sigma^{*2}(e_i)\}. \end{aligned}$$

Для оценки $\sigma^2(e_i)$ можно использовать величину среднеквадратической разности между истинными значениями осредненных по регионам аномалий температуры, и значениями, полученными осреднением данных наблюдений. Однако, разумеется, истинное значение недоступно. Если бы значения поля были известны на сети станций, а также в достаточно густой равномерной сети, то в качестве аппроксимации истинного значения можно было бы использовать среднее по густой сети. Поскольку наблюдения не доступны в такой сети, использовался искусственный метод (примененный, например, в [13]), при котором в качестве данных наблюдений в густой сети использовались данные реанализа NCEP/NCAR [17, 18], а в точках расположения станций – значения, интерполированные из узлов реанализа (использовалась простая билинейная интерполяция): мы будем называть их «псевдостанционными».

Таким образом, в качестве оценки неопределенности («среднеквадратической ошибки осреднения») использовалась среднеквадратическая разность между регионально осредненными по методу, используемому в действующем мониторинге, аномалиями «псевдостанционных» данных и «эталонными» значениями средних по регионам, полученными непосредственно по аномалиям данных реанализа в узлах равномерной сетки: $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ осреднением с весами, учитывающими косинус широты. Метод осреднения, используемый в мониторинге, состоит в том, что аномалии на станциях предварительно осредняются внутри боксов $2,5^\circ \text{ш.} \times 5^\circ \text{д.}$, образующих регулярное разбиение (таким образом каждая станция

получает вес, обратно пропорциональный числу станций в боксе, т.е. плотности станций), а затем полученные значения в боксах осредняются по региону с весами, пропорциональными площади пересечения бокса с регионом.

Можно показать, что $\sigma^{*2}(e_i) (= \sigma^2(e_{\text{obs}}) / s_{\text{obs}}^2) = \sigma^2(e_r) / s_r^2$; здесь индекс obs относится к наблюдениям, а r – к псевдостанционным данным; s_{obs}^2 и s_r^2 – дисперсии соответствующих региональных средних.

Расчет по описанному методу показывает, что для всех регионов во все сезоны добавочный член $\sigma^{*2}(e_i)$ (квадрат стандартизованной ошибки осреднения) мал по сравнению с $1 - R^2$ (не более нескольких процентов), соответственно

$$S^* = [(n-1)/(n-2)]^{1/2} \sigma(Y) (1-R^2)^{1/2} \{1 + \sigma^{*2}(e_i) / (1-R^2)\}^{1/2} \approx [(n-1)/(n-2)]^{1/2} \sigma(Y) (1-R^2)^{1/2} \{1 + 0,5 \sigma^{*2}(e_i) / (1-R^2)\}$$

отличается от S (а расширенный доверительный интервал – от интервала, не учитывающего ошибку осреднения) на единицы процентов: максимум на 3 %.

3. Особенности зимних изменений температуры на территории Российской Федерации; связь с глобальным потеплением и изменениями атмосферной циркуляции

В разделе 2 было отмечено, что тренды зимней температуры России и почти всех регионов малы и незначимы, а для Западной Сибири тренд отрицателен. Рис. 4 показывает, что в целом для территории России зимние температуры очень быстро росли до середины 1990-х гг. (+1,1 °C/10 лет), а затем убывают с несколько меньшей скоростью (–0,63 °C/10 лет). На рис. 5 показано географическое распределение зимних трендов для периодов 1976–1994 и 1994–2014 гг. В первом периоде почти везде наблюдается рост температуры, почти везде превышающий +1 °C/10 лет и достигающий более +2,5 °C/10 лет на западе европейской части России и на юге Средней Сибири. Имеется обширная область убывания на дальнем Северо-Востоке, а также на Таймыре и юге Кавказского региона. Напротив, после 1995 г. почти повсеместно происходит

убывание температуры, достигающее $-2\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет на юге Западной и Средней Сибири. Рост температуры наблюдается на арктическом побережье.

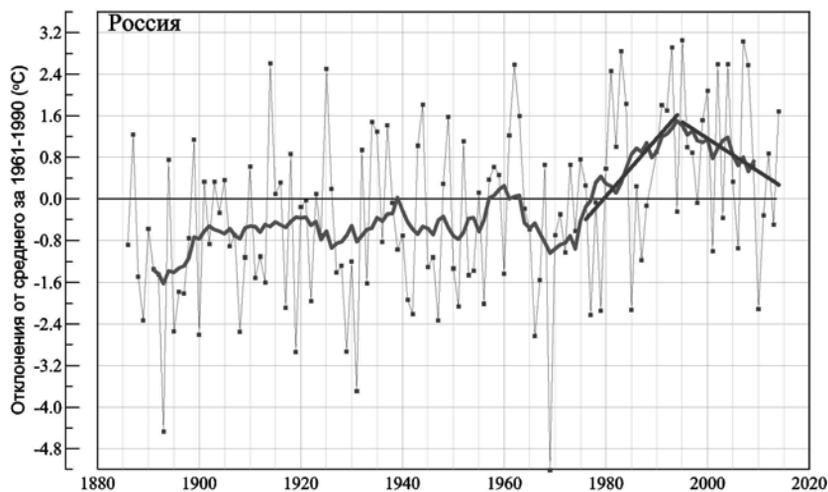


Рис. 4. Аномалия (отклонение от средней за 1961–1990 гг.) зимней температуры ($^{\circ}\text{C}$), осредненная по территории РФ. Жирная кривая – 11-летнее скользящее среднее. Показаны также линейные тренды за 1976–1994 и 1995–2014 гг.

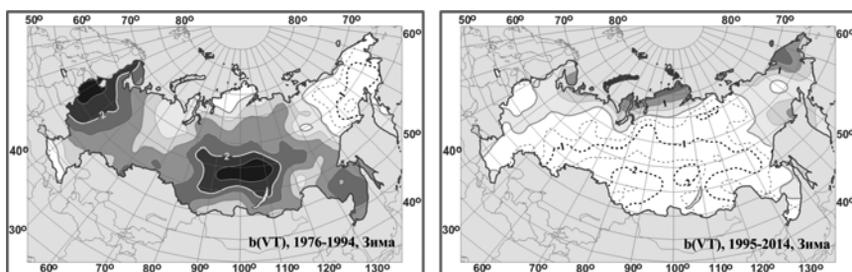


Рис. 5. Линейный тренд зимней температуры на территории РФ ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) для периодов 1976–1994 и 1995–2015 гг. Положительные значения представлены градациями серого, отрицательные – пунктирными изолиниями на белом фоне. Шаг изолиний $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет.

Указанная смена знака тренда на большей территории России на фоне продолжающегося глобального потепления нуждается, конечно, в объяснении, тем более, что она очевидно ассоциируется с общим замедлением потепления в первом десятилетии XX века [15]. В ряде работ показано, что в зимний период в умеренных широтах мощные циркуляционные процессы, связанные с взаимодействием океана и атмосферы, вызывают значительные колебания температуры с масштабами от межгодового до нескольких десятилетий, накладывающиеся на общий процесс глобального потепления и существенно изменяющие его проявление ([19]; для Евразии [3, 7, 8, 9, 14, 16]). Преимущественно для Евразии рассматривался вклад Североатлантического колебания (САК), однако в [9] было показано, что влияние некоторых других атмосферных мод также весьма значительно. Здесь мы попробуем связать конкретное явление – смену знака тренда в изменении зимней температуры на территории России – с совместным влиянием глобального потепления и естественных колебаний, связанных с влиянием некоторых атмосферных мод. Были выбраны моды САК ([16]; данные с сайта: https://climatedataguide.ucar.edu/sites/default/files/climate_index_files/pao_pc_monthly.ascii) ВАМ (Восточно-Атлантическая мода), СКА (Скандинавская) и ВА/ЗР (Восточно-Атлантическая/Западно-Российская). Последние три моды [12] характеризовались индексами, доступными на

ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd52dg/data/indices/tele_index.nh

Для характеристики связи атмосферных мод с температурой воздуха использовался композитный анализ: на рис. 6 приведены карты средней аномалии температуры зимних месяцев (январь, февраль, март) в положительной фазе циркуляционных индексов САК, ВАМ, ВА/ЗР и СКА. Положительная фаза определялась как 15 % наибольших значений индекса соответствующего месяца из полной выборки за 1951–2014 гг. (всего 25 случаев). Для температуры использовались станционные месячные данные из расширенной БД мониторинга климата (1383 станции земного шара [6]). Отметим, что композиты положительной и отрицательной фазы несколько несимметричны (возможно, выборочный эффект, но возможно и реальное различие фаз), но различия локальны, за исключением ВАМ, для которой композит отрицательной фазы

демонстрирует лишь малые значения средней аномалии везде, кроме полярной области, там же, где и для положительной фазы, но обратного знака.

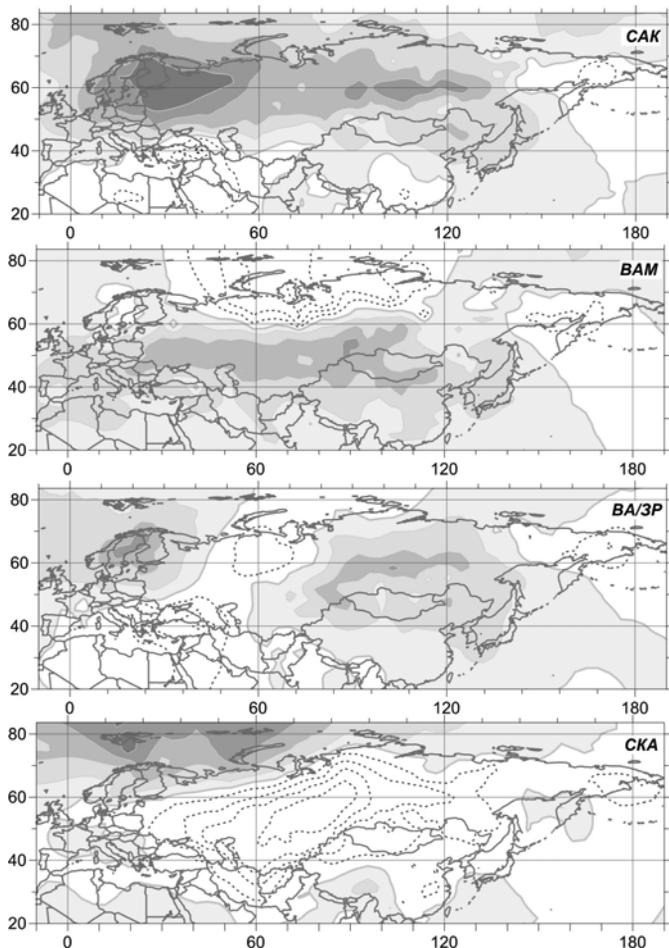


Рис. 6. Композиты полей аномалии температуры ($^{\circ}\text{C}$) зимних месяцев, относящихся к положительной фазе циркуляционных индексов САК, ВАМ, ВА/ЗР и СКА (15 % наибольших месячных значений индекса из полной выборки за 1951–2014 гг.). Шаг изолиний 1°C . Положительные значения показаны градациями серого, отрицательные пунктирными изолиниями.

Совместное рассмотрение изменений в рядах индексов атмосферной циркуляции (рис. 7) и связи соответствующих атмосферных мод с географическим распределением аномалий температуры воздуха (рис. 6) позволяет дать качественное объяснение наблюдаемым изменениям температуры на территории России. Для индексов САК, ВА/ЗР и СКА наблюдаются в период с 1976 г. до середины 1990-х гг. выраженные тенденции, обеспечивающие дополнительный по отношению к глобальному потеплению рост температуры почти для всей России. Рост индекса САК обеспечивает дополнительное потепление почти повсеместно (кроме дальнего Северо-Востока), в особенности в западных регионах. Рост индекса ЗА/ВР также на большей части страны приводит к усилению потепления, особенно в Средней Сибири; в то же время, он ослабляет потепление в районе Северного Урала, а также дальнего Северо-Востока и Кавказского региона (где даже наблюдается похолодание). Индекс СКА в этот период убывает, что также почти везде приводит к дополнительному потеплению, наиболее выраженному в Западной Сибири. Убывание температуры на Таймыре по крайней мере частично связано с положительным трендом моды ВАМ.

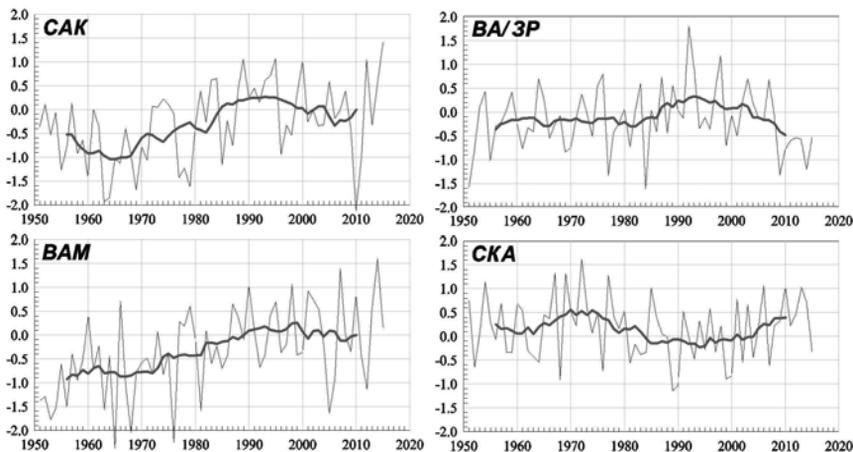


Рис. 7. Ряды индексов атмосферной циркуляции для зимнего сезона. Жирная кривая – 11-летнее скользящее среднее.

В середине 1990-х гг. происходит практически синхронное изменение знака тенденций рассматриваемых мод атмосферной циркуляции, которое приводит к обращению знака вклада циркуляционных условий в наблюдаемые тренды температуры. Положительный тренд в полярной зоне связан, по-видимому, с максимумом антропогенного потепления в этой зоне, который подтверждается результатами климатического моделирования [5: рис. ОРЗ.4]; скорость роста температуры за период 1995–2020 гг. для арктического побережья (около $1\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет) почти вдвое превышает скорость роста для умеренных широт ($\sim 0,6\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет). Предложены различные механизмы усиленного потепления в Арктике: рост меридионального переноса тепла [1] и влаги [20], изменения радиационного баланса, связанные с содержанием водяного пара и частоты облачных и безоблачных ситуаций [4], различными обратными связями, вызванными уменьшением ледового покрова Арктического бассейна.

Отметим еще, что знак тренда САК, вероятно, изменился после 2010 г.: во всяком случае, в 2012 и 2014 гг. наблюдались очень высокие значения индекса, так что результирующий тренд за 1995–2014 гг. оказался фактически нулевым и даже слабо положительным. Таким образом, общий вклад САК в тренд температуры этого периода оказывается априори несколько неопределенным. До 2010 г. он определенно отрицательный; два указанных года в конце, когда индекс САК был велик, тем не менее, не характеризовались высокими значениями температуры для России в целом и для регионов, где его вклад значителен – европейской части России, Западной и Средней Сибири (ниже половины зимних температур периода 1995–2010 гг., хотя и выше, чем в 2010 г.), – но надо иметь в виду потенциально отрицательный вклад ВА/ЗР и СКА.

Попытаемся получить некоторые численные оценки, соответствующие приведенным качественным рассуждениям. Для этого исследуем уравнения множественной регрессии с предиктантами – зимней температурой для физико-географических регионов Российской Федерации (см. рис. 1) и предикторами – глобальной среднегодовой температурой (для характеристики вклада глобального потепления в изменения региональных температур) и индексами мод атмосферной циркуляции зимнего сезона (для характеристики естественных изменений климата):

$$T_{\text{reg}} = b_T T_{\text{gl}} + b_N I_{\text{NAO}} + b_E I_{\text{EAWR}} + b_S I_{\text{SCA}} + b_0.$$

Мы не включили индекс ВАМ, поскольку у него отсутствует тренд после 1995 года.

Наилучшее уравнение получается в целом для России, европейской части России, Западной и Средней Сибири (коэффициент детерминации $> 0,5$), почти так же для Прибайкалья и Забайкалья, хуже – для Приамурья – Приморья, и совсем неудачно – для Восточной Сибири (где, по-видимому, естественные колебания объясняются тихоокеанскими модами и, возможно, полярной); в дальнейшем мы не будем рассматривать эту регрессию. «Чувствительность» предиктанта к одинаковым изменениям предикторов (предварительно стандартизованных делением на среднеквадратическое отклонение) характеризуется β -коэффициентами. Коэффициенты b_x для ненормированных переменных x зависят от единиц измерения. Произведение $b_x \Delta x$ характеризует вклад изменения Δx переменной x в изменения предиктанта (ненормированной региональной температуры). В частности, произведение $b_x \text{tr}_x$, где tr_x – тренд переменной x на определенном интервале, является вкладом этого тренда в тренд предиктанта на том же интервале.

В табл. 3 представлены оценки регрессии. Приводятся коэффициенты регрессии (b_T – для глобальной температуры, безразмерный; b_M – для индексов циркуляции, $^{\circ}\text{C}$), их стандартные ошибки, β – коэффициенты (безразмерные) и коэффициент детерминации R^2 . k – коэффициент линейной регрессии, se – стандартная ошибка коэффициента регрессии

Зимняя температура, осредненная по России в целом, наиболее чувствительна к изменениям индексов САК и СКА и значимо зависит от изменений глобальной температуры. Для западных регионов, особенно европейской части России, зимняя температура наиболее чувствительна к изменениям САК, для Прибайкалья и Забайкалья – СКА. Вклад СКА в регрессию значим и отрицателен для всех регионов, САК положителен, но значим только для западных регионов. Вклад ВА/ЗР значим лишь для европейской части России (отрицателен), Прибайкалья и Забайкалья и Приамурья – Приморья (положителен).

Таблица 3

Оценки множественной регрессии температуры зимнего сезона, осредненной по регионам РФ, на среднюю годовую (январь–декабрь) глобальную температуру и на индексы атмосферной циркуляции САК, ВА/ЗР и СКА моды. Оценки получены по данным за 1951–2014 гг.

	T _{ГЛ}		САК		ВА/ЗР		СКА		R ²	
	bt	β	b _M	β	b _M	β	b _M	β		
Россия	k	1,47	0,21**	0,75	0,50**	-0,08	-0,03	-1,10	-0,42**	0,67
	se	0,52		0,12		0,20		0,21		
Европейская часть РФ	k	2,03	0,21*	1,24	0,61**	-0,95	-0,27**	-0,85	-0,24*	0,56
	se	0,81		0,20		0,31		0,33		
Западная Сибирь	k	0,78	0,07	1,14	0,48**	-0,17	-0,04	-1,95	-0,46**	0,62
	se	0,89		0,22		0,34		0,37		
Средняя Сибирь	k	1,32	0,12	0,97	0,43**	0,63	0,16	-1,38	-0,35**	0,57
	se	0,89		0,22		0,34		0,37		
Прибайкалье и Забайкалье	k	1,76	0,21*	0,30	0,17	0,59	0,19*	-1,48	-0,48**	0,46
	se	0,78		0,19		0,30		0,32		
Приамурье и Приморье	k	2,23	0,33**	0,18	0,13	0,51	0,21*	-0,94	-0,37**	0,38
	se	0,68		0,17		0,26		0,28		
Восточная Сибирь	k	0,97	0,17	-0,04	-0,04	-0,16	-0,08	-0,23	-0,11	0,00
	se	0,74		0,184		0,28		0,30		

Примечание: * значения коэффициента регрессии, значимые на уровне 5 %, ** значения коэффициента регрессии, значимые на уровне 1 %.

В табл. 4 показаны сравнительные оценки трендов исходных рядов tr и остатков от регрессии tr_r для периодов 1976–1994 и 1995–2014 гг. В таблице $D\%$, $D_r\%$ – вклад тренда в дисперсию.

Таблица 4

Тренды рядов регионально-осредненной температуры зимнего сезона и остатков от регрессии (для периодов 1976–94 и 1995–2014 гг.

(°C/10 лет)

Регион	1976–1994 гг.				1995–2014 гг.			
	tr	$D\%$	tr_r	$D_r\%$	tr	$D\%$	tr_r	$D_r\%$
Россия	1,11	14	-0,18	1	-0,63	6	-0,02	0
ЕЧР	1,40	12	-0,04	0	-0,12	0	0,00	0
Западная Сибирь	1,12	6	-0,67	5	-1,37	8	-0,17	0
Средняя Сибирь	1,70	13	-0,27	1	-1,22	10	0,01	0
Прибайкалье и Забайкалье	1,43	23	0,16	0	-1,30	12	-0,30	1
Приамурье и Приморье	1,43	25	0,39	3	-0,44	4	0,15	0

Практически идеально регрессия объясняет оба тренда для европейской части России и отрицательный тренд второго периода для России в целом и Средней Сибири. Немного переоценивается положительный тренд первого периода для всей России и Средней Сибири (на 16 % наблюдаемого тренда) и недооцениваются тренд первого периода для Прибайкалья и Забайкалья (11 %) и второго для Западной Сибири (12 %). Хуже объясняется тренд первого периода для Приамурья и Приморья (недооценивается на 27 %); во втором периоде тренд здесь незначим, а тренд остатка довольно мал (примерно треть величины исходного: переоценен).

На рис. 8 показаны для западных регионов исходные ряды и ряды остатков, а также кривые, сглаженные НЧ-фильтром с точкой отсечения 21 год (F_{21}). Для европейской части России и Средней Сибири сглаженные остатки после середины 1970-х гг. практически не демонстрируют изменчивости с периодом более 20 лет. Видно также, что убывание зимней температуры в европейской части России начинается не в середине 1990-х, а в начале 2000-х гг.

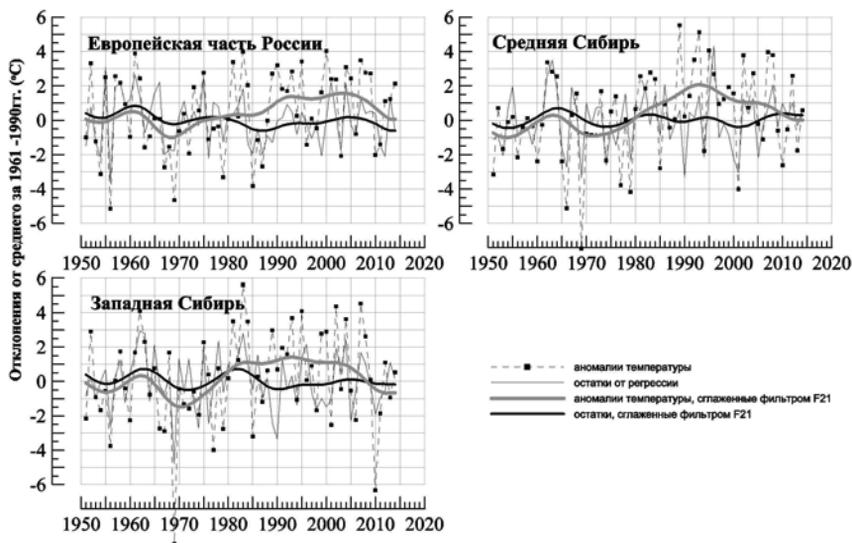


Рис. 8. Регионально осредненная аномалия зимней температуры воздуха (°C) и остатки от регрессии на глобальную среднегодовую температуру и циркуляционные индексы САК, ВА/ЗР, СКА. Жирные кривые получены сглаживанием рядов НЧ-фильтром с точкой отсечения 21 год.

Для Западной Сибири плохо объясняется тренд первого периода: он сильно переоценивается, остаточный тренд $-0,67\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет, более половины исходного положительного тренда. Однако рис. 8 показывает, что в действительности этого отрицательного тренда остатков не существует: имеются сильные колебания с периодом около двух десятилетий на интервале 1951–1990 гг., не полностью объясненные регрессией, а начало интервала, на котором оценивается тренд, приходится на положительную фазу этих колебаний. Заметим, что синхронные два цикла колебаний прослеживаются также и для европейской части России и Средней Сибири (но более выражен первый из них). Таким образом, в модели имеются недоучтенные факторы, ответственные за колебания этого масштаба.

Таким образом, качественные рассуждения, объясняющие природу избыточного потепления Северной Евразии в период 1976–1994 гг. и похолодания в последующий период, подтвержда-

ются также количественно. Из необъясненных феноменов следует упомянуть, в первую очередь, поведение температуры в Восточной Сибири. В целом для региона тренды обоих периодов практически отсутствуют ($-0,18$ и $+0,25$ °C/10 лет), но как видно из рис. 5, для крайних восточных территорий (Магаданская область, Чукотка) они весьма значительны и противоположны по знаку трендам остальной части региона. Факторы, определяющие изменения климата Таймыра, также указаны лишь весьма предположительно. Эти вопросы, а также природа колебаний с периодами около двух десятилетий в западных регионах, нуждаются в дальнейшем исследовании.

Список использованных источников

1. *Алексеев Г.В.* Проявление и усиление глобального потепления в Арктике // *Фундаментальная и прикладная климатология*. – 2015. – № 1. – С. 11–26.
2. *Бардин М.Ю.* Изменчивость температуры воздуха над западными территориями России и странами ближнего зарубежья в 20 веке // *Метеорология и гидрология*. – 2002. – № 8. – С. 5–23.
3. *Бардин М.Ю.* Сценарные прогнозы изменения температуры воздуха для регионов РФ до 2030 г. с использованием эмпирических стохастических моделей климата // *Метеорология и гидрология*. – 2011. – № 4. – С. 5–21.
4. *Бекряев Р.В.* Изменения потоков нисходящей длинноволновой радиации и эффективного излучения подстилающей поверхности в высоких широтах // *Фундаментальная и прикладная климатология*. – 2015. – № 1. – С. 27–48.
5. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской федерации. Общее резюме. – М., 2014. – 58 с.
6. *Груза Г.В., Ранькова Э.Я.* Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. – Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. – 194 с.
7. *Крыжов В.Н.* Связь средних месячной, сезонной и годовой температур воздуха на севере России с индексами зональной циркуляции зимой // *Метеорология и гидрология*. – 2003. – № 2. – С. 15–28.
8. *Нестеров Е.С.* Североатлантическое колебание: Атмосфера и океан. – М.: Триада, лтд, 2013. – 144 с.

9. *Попова В.В., Шмакин А.Б.* Региональная структура колебаний температуры приземного воздуха в северной Евразии во второй половине XX – начале XXI веков // Известия РАН. ФАО. – 2010. – Т. 46, № 2. – С. 161–175.

10. Сводное ежегодное сообщение о состоянии и изменении климата на территориях государств-участников СНГ за 2014 год. Межгосударственный совет по гидрометеорологии государств-участников сотрудничества независимых государств. – М.: Росгидромет, 2014. – 64 с. (<http://seakc.meteoinfo.ru/climatemonitoring>).

11. *Себер Дж.* Линейный регрессионный анализ. – М.: Мир, 1980. – 456 с.

12. *Barnston A.G., Livezey R.E.* Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // Mon. Wea. Rev. – 1987. – Vol. 115. – P. 1083–1126.

13. *Brohan P., Kennedy J.J., Harris I., Tett S.F.B., Jones P.D.* Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850 // J. Geophysical Research. – 2006. – Vol. 111. – D12106. – doi:10.1029/2005JD006548.

14. Climate Change 2007: The Physical Science Basis // S. Solomon et al. (eds.). – Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007. – 996 p.

15. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Technical Summary // Thomas F. Stocker et al. (eds.). – Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013. – P. 37–39.

16. *Hurrell J.W.* Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation // Science. – 1995. – Vol. 269. – P. 676–679.

17. *Kalnay et al.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteor. Soc. – 1996. – Vol. 77. – P. 437–470.

18. *Kistler et al.* The NCEP–NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation // Bull. Amer. Meteor. Soc. – 2001. – Vol. 82, No. 2. – P. 247–267.

19. *Wallace J.M., Zhang Y., Bajuk L.* Interpretation of interdecadal trends in Northern Hemisphere surface air temperature // J. Climate. – 1996. – Vol. 9. – P. 249–259.

20. *Zhang X., He J., Zhang J., Polyakov I., Gerdes R., Inoue J., Wu P.* Enhanced poleward moisture transport and amplified northern high-latitude wetting trend // Nature Climate Change. – 2013. – Vol. 3. – P. 47–51. – doi: 10.1038/nclimate1631.

Поступила в редакцию 30.08.2015 г.