

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 551.583

О.А. Анисимов¹, В.А. Кокорев²**КЛИМАТ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РОССИИ: АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ И МОДЕЛЬНЫЕ ПРОЕКЦИИ НА XXI ВЕК**

Сравниваются данные о температуре воздуха и осадках в российской части Арктики, полученные из различных источников. Рассмотрены измерения на метеостанциях, глобальные климатические архивы в узлах регулярной пространственной сетки и результаты расчетов по гидродинамическим моделям климата. Оценивается точность каждого вида данных. Предложен метод ранжирования моделей климата на основе тестирования по данным наблюдений в Арктике за исторический период. С помощью этого метода построена оптимизированная для российской Арктики ансамблевая климатическая проекция на XXI в., объединяющая результаты высокорейтинговых моделей, и оценена ее неопределенность.

Ключевые слова: температура воздуха, осадки, проекция.

Введение. В последние несколько десятилетий увеличение среднегодовой температуры в Арктике в 2 раза превышает среднеглобальную величину [Второй..., 2014; Доклад..., 2015]. Это несет как потенциальные экономические выгоды в виде сокращения топливных затрат, увеличения продолжительности периода речной и морской навигации, улучшения условий для северного земледелия и лесного хозяйства и т.п. [Snow..., 2011], так и новые риски, прежде всего связанные с усилением частоты и интенсивности лесных пожаров [Шерстюков, Шерстюков, 2014], таянием мерзлоты [Аржанов и др., 2013], разрушением дорог [Stephenson et al., 2011] и инфраструктуры [Стрелецкий и др., 2012]. Для оценки такого рода последствий и реалистичного планирования социально-экономического развития Арктики необходимы сведения о современных и прогнозируемых на будущее изменениях климата в этом регионе, прежде всего о температуре воздуха и количестве осадков. Нами проанализированы данные наблюдений на метеостанциях и оценены погрешности глобальных сеточных архивов и гидродинамических моделей для Арктической зоны России. На основе моделей с лучшими региональными показателями построена ансамблевая климатическая проекция, оптимизированная для Российской Арктики. Полученные результаты и размещенная в электронном приложении база данных позволяют при моделировании природных и социально-экономических последствий изменений климата в Арктике минимизировать погрешности за счет оптимального выбора климатических архивов и гидродинамических моделей.

Материалы и методы исследований. Оценка качества метеорологических данных. В модель-

ных оценках последствий изменений климата наиболее часто используют два параметра – температуру воздуха и сумму атмосферных осадков, а также различные индексы, рассчитываемые на их основе. Данные о метеорологических параметрах для 600 метеостанций России представлены на сайте ВНИИГМИ-МЦД (<http://meteo.ru/data>). Непосредственное применение этих данных осложнено двумя обстоятельствами – наличием пропусков в наблюдениях и неравномерным размещением метеостанций. Небольшое число пропусков можно восстановить, используя разные алгоритмы, показавшие эффективность для территории России [Анисимов и др., 2007]. Для минимизации ошибок, связанных с осреднением данных редкой и неоднородной сети, разработаны методы, основанные на анализе пространственной корреляционной функции метеозадающих элементов и выделении регионов, характеризующихся однородностью современных климатических изменений [Анисимов, Жильцова, 2012; Anisimov et al., 2013]. На рис. 1 выделено 5 таких регионов на севере европейской территории России (ЕТР), в Западной и Центральной Сибири, Якутии и на Дальнем Востоке. Последующий анализ проводился с использованием данных, осредненных для каждого из этих регионов.

Широкое применение получили глобальные климатические архивы, в которых первичные наблюдения на метеостанциях подвергнуты обработке и приведены к узлам регулярной сетки. Вопрос о том, насколько хорошо такие архивы описывают климат России, в значительной степени остается открытым. Нами рассмотрены четыре архива, два из которых CRU TS [Harris et al., 2014] и CRUTEM 4.3.0.0 [Jones et al., 2012] получены интерполяцией данных наблю-

¹ Федеральное бюджетное государственное учреждение «Государственный гидрологический институт», отдел исследований изменений климата, заведующий, докт. геогр. н.; e-mail: oleg@oa7661.spb.edu

² Федеральное бюджетное государственное учреждение «Государственный гидрологический институт», отдел исследований изменений климата, аспирант; e-mail: vasilykokorev@gmail.com



Рис. 1. Разделение рассматриваемой территории на регионы, характеризующиеся однородными изменениями температуры воздуха в современный период

Fig. 1. Regions of the Russian Arctic with similar recent temperature changes

дений на метеостанциях, а два другие получены посредством модельного реанализа (Era-Interim [Dee et al., 2011] и NCEP2 [Kanamitsu et al., 2002]). Архив CRUTEM4 имеет низкое пространственное разрешение ($5^\circ \times 5^\circ$). При создании его четвертой версии было использовано большее количество данных, полученных для Российской Арктики, что заметно улучшило качество архива для этого региона, а также повысило оценку полушарной температуры на $0,1^\circ\text{C}$. Архив CRU TS 3.22 обладает на порядок более высоким разрешением ($0,5^\circ \times 0,5^\circ$), что достигнуто за счет использования сплайновой интерполяции. Архив Era-Interim [Dee et al., 2011] содержит метеоданные с 12-часовым временным разрешением в узлах сетки T255 ($\sim 80 \times 80$ км) за период с 1979 г. по настоящее время (архив обновляется в реальном времени). Также существует вариант архива с месячным разрешением, он и был нами использован. Архив NCEP2 [Kanamitsu et al., 2002] использует сетку $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ и охватывает период с 1979 по 2014 г., его основное отличие от архива ERA заключается в использовании спутниковых наблюдений за температурой, которые дополняют данные наблюдений на станциях.

При оценке точности архивов мы использовали методологию сравнения точечных и площадных данных, основанную на осреднении обоих видов данных по показанным на рис. 1 регионам, которые имеют достаточно большую площадь и характеризуются однородными климатическими изменениями в современный период. Оценивалась точность воспроизведения значений среднегодовой и сезонной температуры, суммы температуры вегетационного ($>5^\circ\text{C}$) и отопительного ($<8^\circ\text{C}$) периодов, а также количества сезонных и годовых осадков. В табл. 1 приведены выборочные результаты сравнения этих характеристик, которые рассчитаны по се-

точным архивам и по фактическим данным наблюдений и осреднены за десятилетие (1981–1990). Этот период характеризовался наименьшим числом пропусков наблюдений.

Отметим, что сеточные архивы в целом занижают температуру воздуха по сравнению с наблюдениями. Исключения составляют летняя температура на севере ЕТР, которую все архивы (кроме NCEP) незначительно завышают, а также зимняя температура во всех азиатских регионах по архиву NCEP, которая значительно (до $5,2^\circ\text{C}$) завышается. Отличия во все сезоны года заметно больше в азиатской части Арктики (до $-3,8^\circ\text{C}$ у архива CRU ts 3.22), чем для севера ЕТР ($< -1,9^\circ\text{C}$). В сезонном ходе наибольшие различия между архивами и наблюдениями выявлены для весны и лета, наименьшие – для зимы. Следствие несимметричного распределения ошибок по сезонам – смещенная, в большинстве случаев увеличенная оценка годовой амплитуды температуры, получаемой по сеточным архивам; например, по архиву NCEP для Якутии она завышена на $7,2^\circ\text{C}$. Эта величина используется в моделях многолетнемерзлых грунтов, ее смещенная оценка может привести к систематической ошибке результатов моделирования температуры грунта и мощности сезонно-талого слоя.

Анализ не позволяет однозначно определить, какой из сеточных архивов наилучший, поскольку отличия от наблюдений меняются по регионам и в течение года. Можно использовать статистические метрики, такие, как число случаев, когда архив при сравнении оказался лучшим или же худшим (соответствующие значения выделены в табл. 2 полужирным шрифтом и курсивом). Худшими наименьшее число раз оказались архивы CRUTEM и ERA (1 и 2 раза соответственно), а наибольшее число раз –

Таблица 1

Среднерегиональные сезонные нормы температуры, значений суммы температуры за вегетационный и активный период и дефицита тепла за 1981–1990 гг. по архивным данным

Параметр	Архив	Регионы				
		1	2	3	4	5
Зима	Наблюдения	–13	–19,6	–27,3	–34,1	–22,8
	CRU ts 3.22	–14,9 (–1,9)	–19,8 (–0,2)	–29,5 (–2,2)	–37,4 (–3,3)	–25,4 (–2,6)
	CRUTEMP4	–14,5 (–1,5)	–19,8 (–0,2)	–27,5 (–0,2)	–36,8 (–2,7)	–23,5 (–0,7)
	Era–Interim	–14 (–1,0)	–20,3 (–0,7)	–28,2 (–0,9)	–34 (0,1)	–25,5 (–2,7)
	NCEP2	–13,3 (–0,3)	–17,7 (1,9)	–24 (3,3)	–28,9 (5,2)	–22,4 (0,4)
Весна	Наблюдения	–1,1	–5,2	–8,9	–9,6	–8,9
	CRU ts 3.22	–1,6 (–0,5)	–5,6 (–0,4)	–12,7 (–3,8)	–12,6 (–3,0)	–12,7 (–3,8)
	CRUTEMP4	–1,6 (–0,5)	–5,7 (–0,5)	–10,8 (–1,9)	–12,5 (–2,9)	–11,4 (–2,5)
	Era–Interim	–1,6 (–0,5)	–6,5 (–1,3)	–12,4 (–3,5)	–11,2 (–1,6)	–10,7 (–1,8)
	NCEP2	–2,9 (–1,8)	–6,6 (–1,4)	–12,1 (–3,2)	–11,5 (–1,9)	–11,4 (–2,5)
Лето	Наблюдения	12,7	13,8	12,3	12,7	10,4
	CRU ts 3.22	13,1 (0,4)	13 (–0,8)	10,2 (–2,1)	11,2 (–1,5)	7,9 (–2,5)
	CRUTEMP4	12,9 (0,2)	12,8 (–1,0)	10,9 (–1,4)	10,9 (–1,8)	7,9 (–2,5)
	Era–Interim	12,8 (0,1)	13,1 (–0,7)	9,9 (–2,4)	11,3 (–1,4)	9,9 (–0,5)
	NCEP2	12,6 (–0,1)	12,5 (–1,3)	9,2 (–3,1)	10,7 (–2,0)	8,5 (–1,9)
Осень	Наблюдения	0,5	–3,2	–7,8	–11,2	–5,2
	CRU ts 3.22	–0,3 (–0,8)	–3,2 (0,0)	–10,2 (–2,4)	–13,6 (–2,4)	–8,1 (–2,9)
	CRUTEMP4	–0,1 (–0,6)	–3,3 (–0,1)	–8,6 (–0,8)	–13,3 (–2,1)	–6,7 (–1,5)
	Era–Interim	–0,1 (–0,6)	–3,6 (–0,4)	–9,5 (–1,7)	–12 (–0,8)	–7,6 (–2,4)
	NCEP2	–0,5 (–1,0)	–3,4 (–0,2)	–9 (–1,2)	–11,2 (0,0)	–8,2 (–3,0)
Год	Наблюдения	–0,2	–3,6	–7,9	–10,6	–6,7
	CRU ts 3.22	–0,9 (–0,7)	–3,9 (–0,3)	–10,6 (–2,7)	–13,1 (–2,5)	–9,6 (–2,9)
	CRUTEMP4	–0,8 (–0,6)	–4 (–0,4)	–9 (–1,1)	–12,9 (–2,3)	–8,5 (–1,8)
	Era–Interim	–0,7 (–0,5)	–4,4 (–0,8)	–10,1 (–2,2)	–11,5 (–0,9)	–8,5 (–1,8)
	NCEP2	–1 (–0,8)	–3,8 (–0,2)	–9 (–1,1)	–10,2 (0,4)	–8,4 (–1,7)
$\Sigma T > 5$	Наблюдения	1412	1397	1153	1208	973
	CRU ts 3.22	1440 (28)	1313 (–84)	870 (–283)	987 (–221)	635 (–338)
	CRUTEMP4	1419 (7)	1289 (–108)	976 (–177)	953 (–255)	650 (–323)
	Era–Interim	1389 (–23)	1289 (–108)	837 (–316)	1006 (–202)	867 (–106)
	NCEP2	1326 (–86)	1208 (–189)	762 (–391)	919 (–289)	694 (–279)
$\Sigma T < 8$	Наблюдения	3005	4507	6371	7772	5494
	CRU ts 3.22	3355 (350)	4576 (69)	7159 (788)	8644 (872)	6518 (1024)
	CRUTEMP4	3292 (287)	4595 (88)	6608 (237)	8522 (750)	6043 (549)
	Era–Interim	3219 (214)	4753 (246)	6904 (533)	7897 (125)	6269 (775)
	NCEP2	3153 (148)	4314 (–193)	6188 (–183)	7005 (–767)	5863 (369)

Примечание. В скобках – отличия от данных наблюдений. Курсив и полужирный – наибольшая и наименьшая по всем архивам ошибка норм температуры для каждого сезона и региона соответственно.

Таблица 2

Тренды зимней (слева от черты) и летней (справа от черты) температуры воздуха по регионам российской Арктики за 1981–2005 гг. по данным наблюдений, сеточным архивам и по модельным расчетам (°C/10 лет), а также относительная ошибка воспроизведения этих трендов

Источник	Регион 1	Регион 2	Регион 3	Регион 4	Регион 5	Ошибка
Наблюдения	0,70 / 0,55	0,38 / 0,48	0,55 / 0,39	0,22 / 0,52	–0,29 / 0,42	0,00 / 0,00
ACCESS1,3	0,36 / 0,25	0,35 / 0,23	0,42 / 0,10	0,35 / 0,47	0,40 / 0,45	0,75 / 0,40
ACCESS1-0	1,33 / 0,52	0,72 / 0,15	0,38 / 0,37	0,34 / 0,53	0,45 / 0,55	1,04 / 0,22
bcc-csm1-l	2,37 / 0,75	1,82 / 0,80	1,10 / 0,28	0,45 / 0,28	0,37 / 0,38	2,10 / 0,37
bcc-csm1-l-m	0,10 / 0,32	0,17 / 0,11	0,71 / –0,03	1,05 / 0,08	1,69 / 0,40	2,46 / 0,63
BNU-ESM	–0,55 / 0,26	–0,26 / 0,54	0,20 / 0,87	0,69 / 0,97	1,11 / 1,05	2,21 / 0,85
CanCM4	1,28 / 0,59	0,56 / 0,70	0,30 / 0,55	0,34 / 0,46	0,39 / 0,43	0,93 / 0,22
CanESM2	0,43 / 1,19	0,46 / 0,91	0,56 / 0,46	0,47 / 0,25	0,60 / 0,53	0,96 / 0,60
CCSM4	0,16 / 0,23	0,31 / 0,22	0,22 / 0,21	0,36 / 0,26	0,56 / 0,57	1,02 / 0,49
CESM1-BGC	1,41 / 0,34	1,77 / 0,41	1,06 / 0,58	0,71 / 0,64	0,38 / 0,70	2,03 / 0,38
CESM1-CAM5	0,02 / 0,14	–0,35 / 0,51	–0,11 / 0,66	–0,03 / 0,35	–0,54 / –0,29	1,22 / 0,70
CESM1-FASTCHEM	0,74 / 0,03	1,02 / 0,17	0,90 / 0,67	0,39 / 0,89	–0,13 / 0,60	0,74 / 0,69
CESM1-WACCM	0,64 / 0,63	0,80 / 0,72	1,00 / 1,00	0,93 / 0,79	0,25 / 0,56	1,42 / 0,61
CMCC-CESM	0,86 / 0,35	1,13 / 0,11	0,55 / 0,38	0,40 / 0,16	0,25 / –0,23	0,98 / 0,68
CMCC-CM	1,21 / 0,34	1,33 / 0,22	0,90 / 0,62	0,35 / 0,55	0,31 / 0,02	1,30 / 0,50
CMCC-CMS	–0,31 / 0,30	–0,29 / 0,39	0,00 / 0,24	0,01 / 0,04	0,12 / 0,12	1,31 / 0,53
CNRM-CM5	2,02 / 0,11	2,38 / 0,25	2,19 / 0,48	1,39 / 0,39	1,35 / 0,57	4,22 / 0,42
CNRM-CM5-2	1,22 / 0,21	0,21 / 0,40	0,20 / –0,09	0,45 / –0,07	0,13 / 0,46	0,86 / 0,65
CRU_ts	0,38 / 0,32	–0,62 / 0,15	–0,71 / 0,36	–0,35 / 0,47	–0,53 / 0,35	1,76 / 0,29
CRUTEMP4	0,26 / 0,36	–0,73 / 0,11	–0,58 / 0,38	–0,31 / 0,56	–0,68 / 0,47	1,87 / 0,27
CSIRO-Mk3	0,33 / 0,43	0,21 / 0,56	0,45 / 0,33	0,25 / 0,11	0,55 / 0,03	0,84 / 0,45
EC-EARTH	0,58 / 0,18	0,38 / 0,55	0,24 / 0,58	0,73 / 0,07	1,09 / 0,21	1,56 / 0,53
ERA_Int	0,27 / 0,46	–0,36 / 0,13	–0,42 / 0,32	–0,09 / 0,40	–0,40 / 0,33	1,22 / 0,30
FGOALS_g2	1,78 / 0,12	0,00 / 0,85	–0,15 / 0,67	0,41 / 0,31	–0,82 / 0,52	1,30 / 0,58
FIO-ESM	0,67 / –0,17	1,36 / 0,07	0,97 / 0,28	0,55 / 0,07	0,64 / 0,02	1,62 / 0,85
GFDL-CM2p1	–0,17 / 0,49	0,13 / 0,40	0,00 / 0,35	0,58 / 0,22	1,13 / 0,10	1,89 / 0,34
GFDL-CM3	–0,56 / 0,39	–0,51 / 0,95	–0,02 / 0,54	0,22 / 0,14	0,67 / 0,42	1,70 / 0,48
GFDL-ESM2G	1,59 / 0,41	1,45 / 0,35	1,67 / 0,08	1,76 / –0,06	2,20 / 0,39	4,34 / 0,50
GFDL-ESM2M	–0,09 / –0,01	0,17 / –0,16	0,52 / –0,01	0,50 / 0,37	0,66 / 0,19	1,26 / 0,84
GISS-E2-H	0,63 / 0,21	0,73 / 0,06	0,43 / 0,01	0,26 / 0,23	0,66 / 0,58	0,94 / 0,68
GISS-E2-H-CC	0,95 / –0,17	0,42 / 0,08	0,74 / 0,41	0,76 / 0,53	1,06 / 0,34	1,58 / 0,48
GISS-E2-R	0,53 / –0,05	0,70 / 0,07	1,03 / 0,43	0,90 / 0,51	0,52 / 0,50	1,57 / 0,45
GISS-E2-R-CC	0,02 / 0,57	–0,13 / 0,48	–0,03 / 0,28	0,41 / 0,26	0,92 / 0,23	1,68 / 0,25
HadCM3	1,34 / 0,45	1,22 / –0,06	0,86 / –0,10	0,72 / 0,61	0,00 / 0,49	1,39 / 0,58
HadGEM2-AO	0,71 / 0,09	0,87 / 0,57	1,14 / 0,89	0,75 / 0,69	0,64 / 0,30	1,60 / 0,58
HadGEM2-CC	0,86 / 0,79	1,14 / 0,36	1,07 / –0,32	0,88 / –0,05	0,65 / 0,31	1,88 / 0,77
HadGEM2-ES	0,81 / 0,54	0,38 / 0,20	0,53 / 0,09	0,63 / 0,60	0,81 / 0,66	1,17 / 0,42
inmcm4	–0,42 / 0,06	–0,25 / 0,32	–0,23 / 0,30	0,08 / 0,10	0,10 / 0,10	1,33 / 0,60
IPSL-CM5A-LR	–0,18 / 0,53	0,21 / 0,40	0,31 / 0,35	0,27 / 0,24	0,44 / 0,19	0,98 / 0,28
IPSL-CM5A-MR	0,95 / 0,37	0,74 / 0,63	0,72 / 0,37	0,40 / 0,14	–0,28 / 0,83	0,49 / 0,48
IPSL-CM5B-LR	0,30 / 0,52	0,29 / 0,46	0,08 / 0,03	–0,13 / 0,00	–0,18 / 0,21	0,73 / 0,50
MIROC4h	–0,25 / 0,21	0,16 / –0,22	0,28 / 0,39	0,56 / 0,59	0,56 / 0,42	1,38 / 0,44

Окончание табл. 2

MIROC5	1,80 / 0,69	1,19 / 0,19	0,79 / 0,29	0,94 / 0,46	1,04 / 0,60	2,40 / 0,33
MIROC-ESM	-0,12 / 0,14	-0,07 / 0,25	0,16 / 0,46	0,38 / 0,26	0,39 / 0,49	1,23 / 0,41
MIROC-ESM-CHEM	0,08 / 0,83	-0,42 / 1,01	-0,19 / 0,65	0,26 / 0,14	0,48 / 0,30	1,43 / 0,66
MPI-ESM-LR	-0,43 / -0,43	0,20 / -0,07	0,14 / -0,07	0,43 / 0,09	0,75 / 0,36	1,47 / 1,02
MPI-ESM-MR	1,19 / -0,08	1,00 / 0,24	0,60 / 0,11	0,57 / 0,43	0,80 / 0,43	1,55 / 0,51
MPI-ESM-P	0,65 / 0,55	1,01 / 0,37	0,80 / 0,56	0,36 / 0,39	0,40 / 0,21	1,04 / 0,28
MRI-CGCM3	0,07 / 0,12	-0,14 / 0,17	-0,31 / 0,37	-0,06 / -0,06	0,34 / -0,17	1,46 / 0,80
MRI-ESM1	0,67 / 0,08	0,42 / 0,08	0,27 / 0,00	0,57 / 0,01	0,77 / -0,01	1,18 / 0,94
NCEP2	0,21 / 0,17	-0,11 / 0,04	0,01 / 0,36	-0,14 / 0,30	0,27 / 0,18	1,31 / 0,54
NorESM1-M	1,06 / 0,38	0,96 / 0,15	0,59 / 0,14	0,35 / 0,18	1,09 / 0,78	1,49 / 0,63
NorESM1-ME	0,57 / 0,62	0,72 / 0,67	0,52 / 0,34	0,01 / -0,14	0,17 / 0,17	0,74 / 0,50

Примечание. Полужирным шрифтом выделены модели, отобранные в результирующий ансамбль.

архивы NCEP2 и CRU ts 3.22 (10 и 8 раз соответственно). Последние два архива наименьшее число раз оказались лучшими (по 4 раза каждый), в то время как архивы Era-Interim и CRUTEM4 стали лучшими 9 и 8 раз. Это согласуется с выводами в работах [Жильцова, Анисимов, 2009; Anisimov et al., 2007], где по результатам сравнения интерполированных данных архивов в местоположения метеостанций наилучший результат показала предыдущая версия архива ERA-40. При региональном осреднении архив CRUTEM4 показывает близкий результат, но он имеет очень низкое пространственное разрешение.

Анализ воспроизведения значений годовых сумм количества осадков в работе [Жильцова, Анисимов, 2009] показал, что архивы, основанные на реанализе, обладают большой погрешностью и значительно уступают в точности воспроизведения количества осадков архивам, использующим методы интерполяции данных с метеостанций.

Результаты исследований и их обсуждение.

Климатические проекции. Нами для оценки будущих изменений климата использованы результаты расчетов по гидродинамическим моделям, исчерпывающий обзор которых дан в [Кокорев, Анисимов, 2013]. В современной климатологии их принято называть проекциями, поскольку (в отличие от прогнозов) изначально не предполагается, что они с большой вероятностью реализуются в будущем. Проекция представляет собой различные траектории развития климатической системы, расчет которых выполнен в соответствии с заданными условиями изменения климатообразующих факторов, прежде всего концентрации парниковых газов (ПГ) в атмосфере. Заданные условия в свою очередь принято называть сценариями. Нами основное внимание уделено оценке неопределенности модельных проекций для Российской Арктики. Несмотря на значительное улучшение качества современных моделей CMIP5 по сравнению с предшествующим поколением моделей CMIP3, она остается высокой [Flato et al., 2013]. Дальнейшее совершенствование моделей может несколько уменьшить неопределенность проекций, связанную с межмодельными раз-

личиями. Принципиальное и неустранимое ограничение – отсутствие точных оценок антропогенной эмиссии ПГ, по которым рассчитывается воздействие на климат.

Разработаны четыре сценария эмиссии ПГ: RCP8.5 [Riahi et al., 2011], RCP6 [Masui et al., 2011], RCP4.5 [Thomson et al., 2011] и RCP2.6 [van Vuuren et al., 2011]. Аббревиатура RCP (Representative Climate Pathway) указывает на то, что в основу положены разные модели глобального экономического развития, последующие цифры указывают итоговую величину радиационного воздействия к 2100 г., т.е. обусловленное эмиссиями ПГ увеличение глобального радиационного баланса (Вт/м²). В практическом плане сценарий RCP2.6 не представляет интереса, поскольку он был разработан с тем, чтобы изучить картину гипотетического мира, в котором уже сейчас значительно сокращены эмиссии парниковых газов. Оказалось, что даже в этом случае глобальная температура к середине XXI в. повысилась бы на 1 °C с последующей стабилизацией. Три других сценария к середине XXI в. дают глобальное потепление на 1,4; 1,3; и 2,0 °C соответственно и последующее увеличение на 1,8; 2,2; и 3,7 °C до конца XXI в. [IPCC, 2013]. Если же оценивать изменение климата до 2030 г., то различия глобальной температуры, рассчитанной по любой модели для всех сценариев RCP, не превышают 0,2 °C, что в 2 раза меньше межмодельного разброса, который для каждого RCP составляет около 0,4 °C [Stocker et al., 2013]. На региональном уровне наибольшие различия как между моделями, так и между RCP выявлены для Арктики [Collins et al., 2013]. Рассмотрим результаты наиболее агрессивного сценария RCP8.5.

Широкое распространение получил ансамблевый метод, состоящий в том, что расчеты по большому числу моделей усредняются и случайные ошибки компенсируются. Считается, что чем больше моделей входит в ансамбль, тем более точен результат. Однако в ряде работ [Анисимов, Кокорев, 2013; Knutti, 2010] показана целесообразность проводить тестирование и исключать модели с большой ошибкой. Нами проведено тестирование 46

моделей CMIP5 по тому, как они воспроизводят температурные характеристики и осадки в регионах Российской Арктики за исторический период. Полностью результаты представлены в электронном приложении к статье, здесь же рассматриваются лишь два параметра теплообеспеченности – зимняя и летняя температура. Первая – важный показатель, на основе которого проводятся экономические расчеты затрат на отопление и потребление транспортного топлива, вторая важна для оценки биоклиматических показателей (продолжительность вегетационного периода и сумма значений температуры) и инженерно-строительных характеристик (температура и глубина сезонно-талого слоя многолетнемерзлых грунтов). В табл. 2 сравниваются тренды

этих параметров, рассчитанные по моделям и по данным наблюдений за 1981–2005 гг. В сравнение добавлены также рассмотренные выше сеточные архивы. Для каждого региона рассчитывалась относительная ошибка, определяемая как разность модельного и наблюдаемого трендов, деленная на наблюдаемый тренд и взятая по абсолютной величине. В последнем столбце табл. 2 приведены значения этой ошибки, осредненные по 5 регионам Российской Арктики.

Можно отметить, что лучшие модели дают результат, сопоставимый с некоторыми сеточными архивами, однако лучшие архивы обладают заметно меньшей погрешностью, чем все модели. При переходе к значениям сезонной температуры точ-

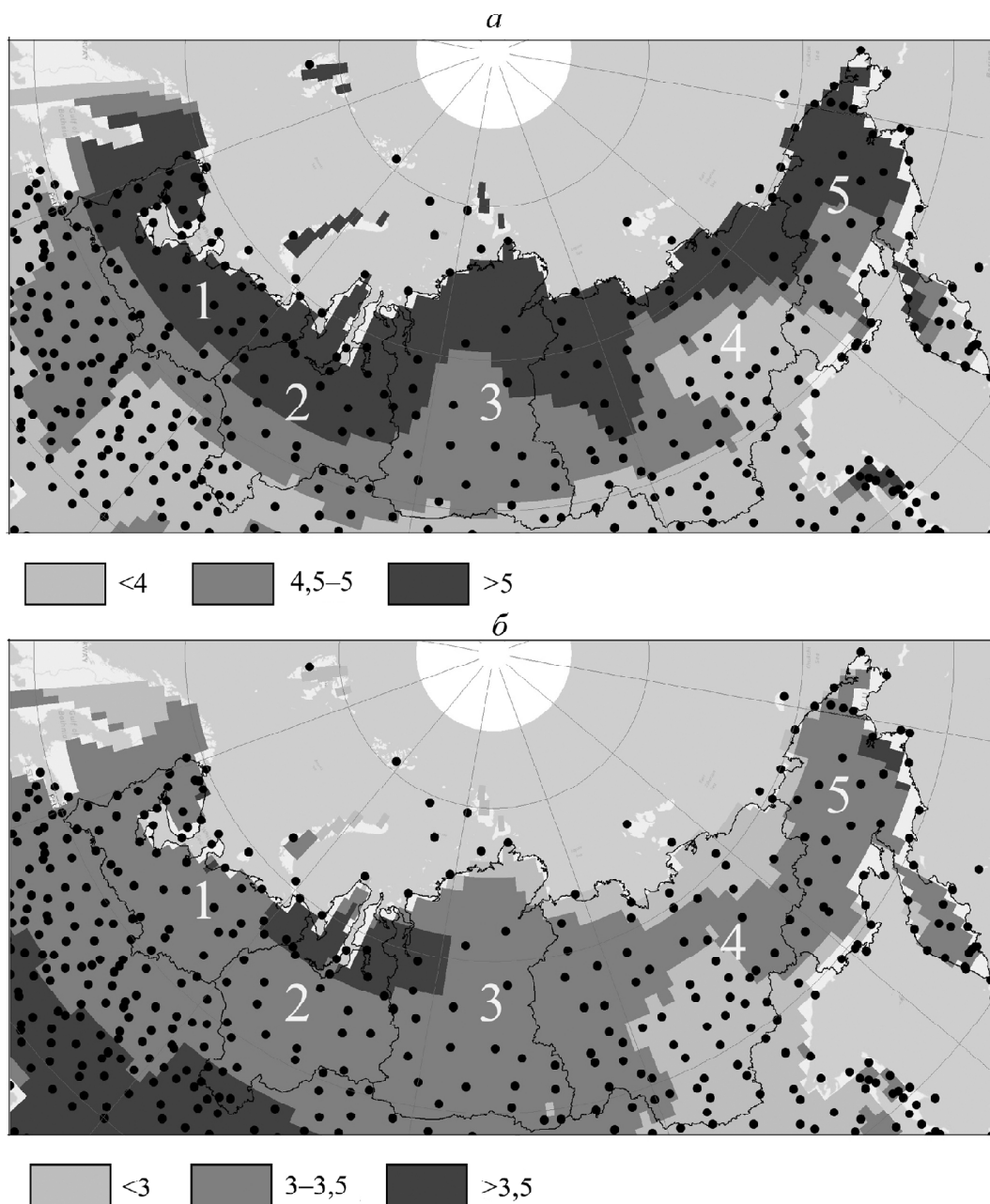


Рис. 2. Проекция зимней (а) и летней (б) температуры воздуха (в отклонениях от нормы за период 1961–1990 гг.) на середину XXI в. по оптимальному ансамблю моделей. Цифры на рисунке – номера регионов

Fig. 2. Optimal ensemble projection of winter (a) and summer (b) air temperature for the mid-21st century (deviations from the 1961–1990 means). Numbers are for the Russian Arctic regions (see Fig. 1)

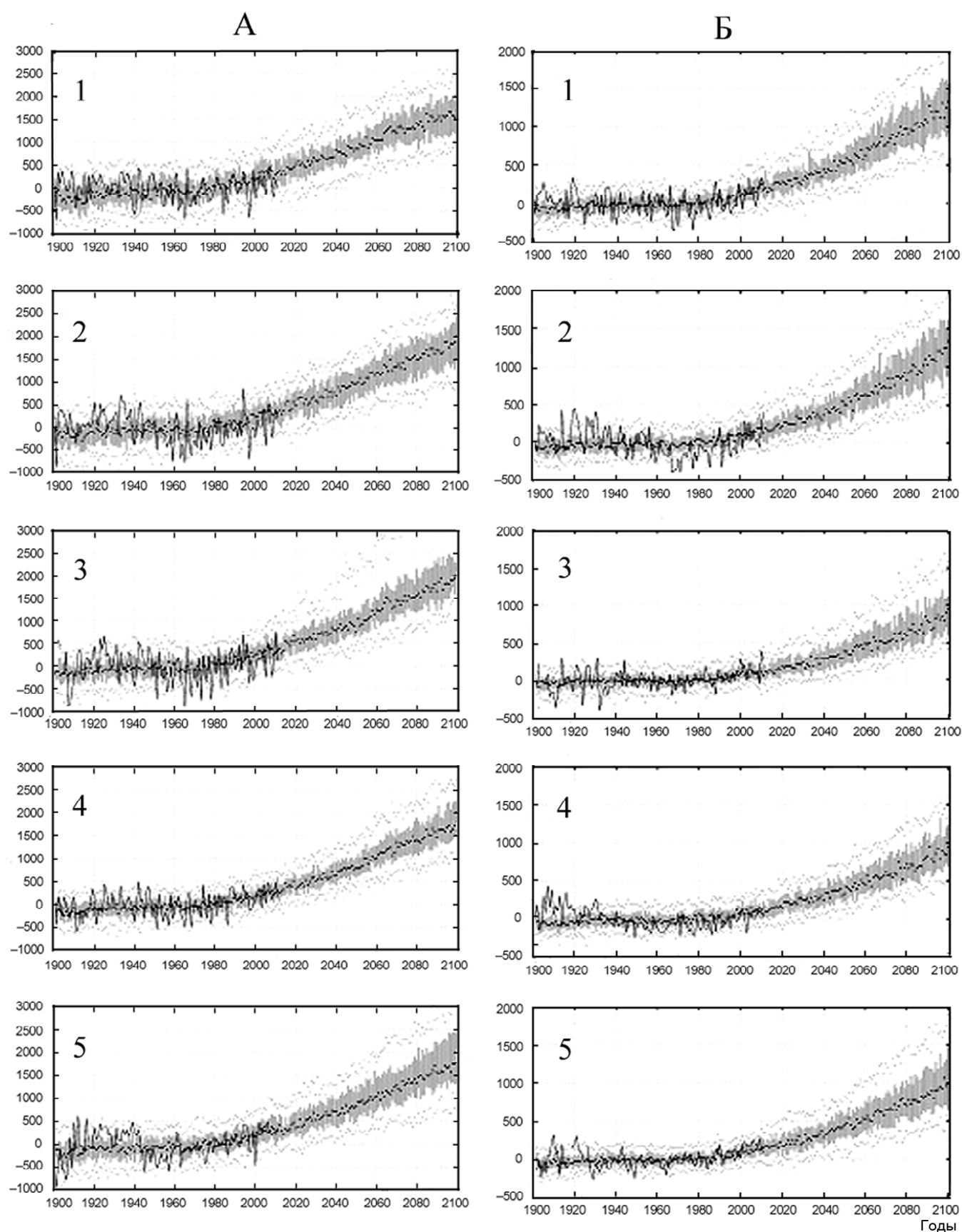


Рис. 3. Изменения в XX и XXI в. сумм отрицательной температуры за отопительный период (А) и сумм положительной температуры (Б) в отклонениях от нормы 1961–1990. Цифры на рисунке – номера регионов (см. рис. 1)

Fig. 3. Changes of the sums of below-zero (A) and above-zero (B) temperatures during the heating period for the 20th and 21st centuries (deviations from the 1961–1990 means). Numbers are for the Russian Arctic regions (see Fig. 1)

ность воспроизведения трендов моделями уменьшается, чем у сеточных архивов, но лучшие модели все же дают погрешность, близкую к погрешности сеточных архивов с низким рейтингом.

Результаты тестирования дают возможность уменьшить неопределенность оценки влияющих параметров в рассматриваемых регионах и построить оптимальную ансамблевую климатическую проекцию, усреднив результаты лишь тех моделей, ошибка которых не превышает заданной величины. В нашем случае были выбраны 15 моделей (выделены полужирным шрифтом в табл. 2), ошибки которых по трендам как зимней, так и летней температуры не превышали средние по всему рассмотренному ансамблю, составившие в целом для Российской Арктики 1,47 и 0,55 соответственно.

Изменения климата Арктики в XXI веке. Проекция зимней и летней температуры воздуха (в отклонениях от нормы за период 1961–1990 гг.) на середину XXI в. по оптимальному ансамблю показаны на рис. 2. Во всех районах Арктики зимняя температура может увеличиться на 5 °C и более. Обращает на себя внимание прогнозируемая картина изменения летней температуры, в которой отсутствует широтная зональность. Прогнозируется максимальное увеличение до 4 °C на ограниченной территории вблизи Арктического побережья Центральной Сибири, увеличение не более чем на 2,5 °C на всей территории Якутии и промежуточное по величине потепление в остальных регионах.

Анализ результатов для других сезонов и для осадков (приведены в электронном приложении к статье) показывает, что значительный рост температуры на 5 °C и более ожидается также осенью на прибрежной территории во всех регионах Российской Арктики. Во все сезоны (кроме летнего) изменения подчинены широтной зональности. Годовые и сезонные суммы количества осадков будут увеличиваться повсеместно в арктической области России. Можно отметить прогнозируемый сильный рост количества осадков осенью и зимой на ЕТР по сравнению с их умеренным увеличением в Сибири.

На рис. 3 показаны изменения в XX и XXI вв. двух экономически важных показателей – дефицита тепла за отопительный период (А) и сумм положительных значений температуры (Б). Непрерывными линиями показаны результаты, рассчитанные по данным наблюдений. Статистика результатов

расчетов по оптимальному ансамблю моделей представлена в виде компактной диаграммы («ящик с усами»), на которой показаны медианы (черные точки в средней части диапазона), нижний и верхний квартили по всем моделям (обозначены серой заливкой) и выбросы, т.е. 5%-ные и 95%-ные квантили распределения (обозначены серыми точками по краям распределения).

Полученные данные полностью соответствуют парадигме антропогенного изменения климата, в частности такому ее индикаторному показателю, как больший рост температурных минимумов по сравнению с максимумами, что прослеживается на всех временных и пространственных масштабах. В соответствии с этим данные наблюдений, а также модельные проекции указывают на уменьшение дефицита тепла за отопительный период во всех регионах Арктики, темп которого будет возрастать в XXI в. Суммы положительных температур также будут увеличиваться, но не столь интенсивно. Можно отметить асимметричное относительно медианы расположение выбросов модельных оценок уменьшения дефицита тепла, что особенно ярко выражено для Центральной Сибири (регион 3), где небольшое число моделей предсказывает потепление, намного превосходящее среднее по ансамблю. Это может свидетельствовать о необходимости дальнейшего совершенствования моделей в части описания сложных процессов формирования термического режима поверхности в зимний период при наличии температурных инверсий, характерных для Сибири и Якутии.

Выводы:

- климатические модели и архивы протестированы по большому набору параметров, результаты доступны в веб-приложении URL: <http://permafrost.su/gcm.html>;
- лучшие глобальные сеточные архивы хорошо согласуются с данными наблюдений на метеостанциях и обладают небольшой погрешностью на территории России;
- оптимально отобранный ансамбль климатических моделей удовлетворительно воспроизводит современные изменения климата в Российской Арктике;
- для оценки современных и ожидаемых в будущем изменений климата арктических регионов России можно использовать сеточные архивы и оптимизированную ансамблевую климатическую проекцию.

Благодарности: Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-37-00038).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Анисимов О.А., Жильцова Е.Л. Об оценках изменений климата регионов России в XX и начале XXI веков по данным наблюдений // Метеорология и гидрология. 2012. № 6. С. 95–107.

Анисимов О.А., Кокорев В.А. Об оптимальном выборе гидродинамических моделей для оценки влияния изменений климата на криосферу // Лед и снег. 2013. Т. 121, № 1. С. 83–92.

Анисимов О.А., Лобанов В.А., Ренева С.А. Анализ изменений температуры воздуха на территории России и эмпирический прогноз на первую четверть XXI века // Метеорология и гидрология. 2007. № 10. С. 20–30.

Аржанов М.М., Елисеев А.В., Мохов И.И. Влияние климатических изменений над сушей вне тропических широт на динамику многолетнемерзлых грунтов при сценариях RCP в XXI в.

по расчетам глобальной климатической модели ИФА РАН // Метеорология и гидрология. 2013. № 7. С. 31–42.

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М.: ФГБУ НИЦ «Планета», 2014. 58 с.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2014 год. М.: Росгидромет, 2015. 107 с.

Жильцова Е.Л., Анисимов О.А. О точности воспроизведения температуры и осадков на территории России глобальными климатическими архивами // Метеорология и гидрология. 2009. № 10. С. 79–90.

Кокорев В.А., Анисимов О.А. Построение оптимизированной ансамблевой климатической проекции для оценки последствий изменений климата на территории России // Проблемы экологического моделирования и мониторинга экосистем. Т. 25. М.: Планета, 2013. С. 131–153.

Стрелецкий Д.А., Шикломанов Н.И., Гребенец В.И. Изменение несущей способности мерзлых грунтов в связи с потеплением климата на севере Западной Сибири // Криосфера Земли. 2012. Т. 16, № 1. С. 22–32.

Шерстюков Б.Г., Шерстюков А.Б. Оценки тенденций усиления лесных пожаров в России до конца XXI в. по данным сценарных экспериментов климатических моделей пятого поколения // Метеорология и гидрология. 2014. № 5. С. 17–30.

Anisimov O.A., Kokorev V.A., Ziltova E.L. Temporal and Spatial Patterns of Modern Climatic Warming: Case Study of Northern Eurasia // Climatic Change. 2013. Vol. 118, N 3. P. 871–883.

Anisimov O.A., Lobanov V.A., Reneva S.A. et al. Uncertainties in gridded air temperature fields and their effect on predictive active layer modeling // J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112, Iss. F02. Doi:10.1029/2006JF000593.

Collins M., Knutti R., Arblaster J. et al. Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility // Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. P. 1029–1136.

Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J. et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Quarterly J. Roy. Meteorol. Soc. 2011. Vol. 137, N 656. P. 553–597.

Flato G., Marotzke J., Abiodun B. et al. Evaluation of Climate Models // Climate Change 2013: The Physical Science Basis.

Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. P. 741–866.

Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset // Intern. J. Climat. 2014. Vol. 34, N 3, P. 623–642.

IPCC Summary for Policymakers / Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. P. 1–30.

Jones P.D., Lister D.H., Osborn T.J. et al. Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010 // J. Geophys. Res. Atmospheres. 2012. Vol. 117, N. D5. P. 2156–2202. Doi: 10.1029/2011JD017139.

Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J. et al. NCEP–DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2002. Vol. 83, N 11. P. 1631–1643.

Knutti R. The end of model democracy? // Climatic Change. 2010. Vol. 102. P. 395–404.

Masui T., Matsumoto K., Hijioka Y. et al. An emission pathway for stabilization at 6 Wm⁻² radiative forcing // Climatic Change. 2011. Vol. 109, N 1–2. P. 59–76.

Riahi K., Rao S., Krey V. et al. RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions // Climatic Change. 2011. Vol. 109. P. 33–57.

Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA): climate change and the cryosphere. Oslo, Norway, 2011. 538 p.

Stephenson S.R., Smith L.C., Agnew J.A. Divergent long-term trajectories of human access to the Arctic // Nature Climate Change. 2011. Vol. 1, N 6. P. 156–160.

Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K. et al. Technical Summary / Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. P. 33–115.

Thomson A.M., Calvin K.V., Smith S.J. et al. RCP4.5: A pathway for stabilization of radiative forcing by 2100 // Climatic Change. 2011. Vol. 109. P. 77–94.

van Vuuren D.P., Stehfest E., den Elzen M.G.J. et al. RCP2.6: Exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2 °C // Climatic Change. 2011. Vol. 109. P. 95–116.

Поступила в редакцию 02.11.2015

Принята к публикации 11.12.2015

O.A. Anisimov¹, V.A. Kokorev²

CLIMATE IN THE ARCTIC ZONE OF RUSSIA: ANALYSIS OF CURRENT CHANGES AND MODELING TRENDS FOR THE 21ST CENTURY

Data on temperature and precipitation within the Russian Arctic, taken from the different sources, such as weather stations, gridded archives and CMIP5 ESM, are compared. The accuracy of each archive was estimated and the ESMs were tested against the data of observations in the Russian Arctic for the historical period. The ranking was applied to develop an ESMs projection for the 21st century which integrates the results of high-quality models, and to evaluate its uncertainty

Key words: air temperature, precipitation, climate projection.

Acknowledgements. The study was supported by Russian Science Foundation (project 14-37-00038).

¹ Russian Federal State Budgetary Organization «State Hydrological Institute», Climate Change Research Department, Head of the Department, D.Sc. in Geography; e-mail: oleg@oa7661.spb.edu

² Russian Federal State Budgetary Organization «State Hydrological Institute», Climate Change Research Department, post-graduate student; e-mail: vasilykokorev@gmail.com

REFERENCES

- Anisimov O.A., Kokorev V.A. Ob optimal'nom vybore gidrodinamicheskikh modelej dlja ocenki vlijanija izmenenij klimata na kriosferu [On the optimal selection of hydrodynamical models for evaluation of climate change impacts on permafrost], *Led i Sneg*, 2013, Vol. 121, no 1, pp. 83–92 (in Russian).
- Anisimov O.A., Kokorev V.A., Ziltcova E.L. Temporal and spatial patterns of modern climatic warming: Case study of Northern Eurasia // *Climatic Change*. 2003. Vol. 118, N 3. P. 871–883.
- Anisimov O.A., Lobanov V.A., Reneva S.A. Analiz izmenenij temperatury vozduha na territorii Rossii i jempiricheskij prognoz na pervuju chetvert' 21 veka [Analysis of air temperature in Russia and empirical forecast for the first quarter of the 21st century], *Meteorologija i gidrologija*, 2007, no 10, pp. 20–30 (in Russian).
- Anisimov O.A., Lobanov V.A., Reneva S.A. et al. Uncertainties in gridded air temperature fields and their effect on predictive active layer modeling // *J. Geophys. Res.* 2007. Vol. 112, Iss. F02. Doi:10.1029/2006JF000593.
- Anisimov O.A., Zhil'cova E.L. Ob ocnkah izmenenij klimata regionov Rossii v 20 i nachale 21 vekov po dannym nabljudenij [Evaluating regional climate change in Russia in 20th and early 21st century using observational data], *Meteorologija i gidrologija*, 2012, no 6, pp. 95–107 (in Russian).
- Arzhanov M.M., Eliseev A.V., Mohov I.I. Vlijanie klimaticheskikh izmenenij nad sushej vntropicheskikh shirot na dinamiku mnogoletnemerzlykh gruntov pri scenarijah RCP v XXI v. po raschetam global'noj klimaticheskoy modeli IFA RAN [Effect of climate change over terrestrial extratropical latitudes on permafrost dynamics under the RCP scenarios for XXI century calculated by the global climate model of IFA RAS], *Meteorologija i gidrologija*, 2013, no 7, pp. 31–42 (in Russian).
- Collins M., Knutti R., Arblaster J. et al. Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility // *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. P. 1029–1136.
- Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J. et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // *Quarterly J. Roy. Meteorol. Soc.* 2011. Vol. 137, N 656. P. 553–597.
- Doklad ob osobennostjah klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2014 god [Report on the state of climate in Russia in 2014], Moscow: Rosgidromet, 2015, 107 p. (in Russian).
- Flato G., Marotzke J., Abiodun B. et al. Evaluation of Climate Models // *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. P. 741–866.
- Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset // *Internat. J. Climat.* 2014. Vol. 34, N 3, P. 623–642.
- IPCC Summary for Policymakers / *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. P. 1–30.
- Jones P.D., Lister D.H., Osborn T.J. et al. Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010 // *J. Geophys. Res. Atmospheres*. 2012. Vol. 117, N D5. P. 2156–2202. Doi: 10.1029/2011JD017139.
- Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J. et al. NCEP–DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 2002. Vol. 83, N 11, P. 1631–1643.
- Knutti R. The end of model democracy? // *Climatic Change*. 2010. Vol. 102. P. 395–404.
- Kokorev V.A., Anisimov O.A. Postroenie optimizirovannoj ansamblevoj klimaticheskoy proekcii dlja ocenki posledstvij izmenenij klimata na territorii Rossii [Constructing optimal ensemble climate projection for studying the climate change impacts in Russia], *Problemy jekologicheskogo modelirovanija i monitoringa jekosistem*, Moscow, Planeta, 2013, Vol. 25, pp. 131–153 (in Russian).
- Masui T., Matsumoto K., Hijioka Y. et al. An emission pathway for stabilization at 6 Wm⁻² radiative forcing // *Climatic Change*. 2011. Vol. 109, N 1–2. P. 59–76.
- Riahi K., Rao S., Krey V. et al. RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions // *Climatic Change*. 2011. Vol. 109. P. 33–57.
- Sherstjukov B.G., Sherstjukov A.B. Ocenki tendencij usilenija lesnyh pozharov v Rossii do konca XXI v. po dannym scenaryh jeksperimentov klimaticheskikh modelej pjatogo pokolenija [Assessment of increasing forest fires in Russia by the end of the XXI century based on experiments with the climate models of the fifth generation], *Meteorologija i gidrologija*, 2014, no 5, pp. 17–30 (in Russian).
- Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA): climate change and the cryosphere. Oslo, Norway, 2011. 538 p.
- Stephenson S.R., Smith L.C., Agnew J.A. Divergent long-term trajectories of human access to the Arctic // *Nature Climate Change*. 2011. Vol. 1, N 6. P. 156–160.
- Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K. et al. Technical Summary / *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. P. 33–115.
- Streleckij D.A., Shiklomanov N.I., Grebenec V.I. Izmenenie nesushhej sposobnosti merzlykh gruntov v svjazi s potepleniem klimata na severe Zapadnoj Sibiri [Changes of permafrost bearing capacity due to climatic warming on the in North West Siberia], *Kriosfera Zemli*, 2012, Vol. 16, no 1, pp. 22–32 (in Russian).
- Thomson A.M., Calvin K.V., Smith S.J. et al. RCP4.5: A pathway for stabilization of radiative forcing by 2100 // *Climatic Change*. 2011. Vol. 109. P. 77–94.
- van Vuuren D.P., Stehfest E., den Elzen M.G.J. et al. RCP2.6: Exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2 °C // *Climatic Change*. 2011. Vol. 109. P. 95–116.
- Vtoroj ocenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmenenijah klimata i ih posledstvijah na territorii Rossijskoj Federacii. Obshee rezjume [Second assessment report on climate change and its impacts in Russia. General summary], Moscow: FGBU NIC «Planeta», 2014. 58 p. (in Russian).
- Zhil'cova E.L., Anisimov O.A. O tochnosti vosproizvedenija temperatury i osadkov na territorii Rossii global'nymi klimaticheskimi arhivami [On the accuracy of air temperature and precipitation replicated by global climate archives], *Meteorologija i gidrologija*. 2009, no 10, pp. 79–90 (in Russian).

Received 02.11.2015

Accepted 11.12.2015