

УДК 551.509.313.43

Е.Д. Бабина¹, А.Г. Георгиади²

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И СУММ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ В БАССЕЙНЕ Р. ЛЕНА ГЛОБАЛЬНЫМИ КЛИМАТИЧЕСКИМИ МОДЕЛЯМИ

Приведены результаты оценки качества воспроизведения годовой и сезонной температуры воздуха и количества атмосферных осадков для крупного речного бассейна р. Лена глобальными климатическими моделями общей циркуляции атмосферы в качестве этапа для построения сценариев возможных изменений климата, которые могут быть использованы в гидрологических приложениях. В качестве характеристик наблюдаемого климата использованы данные, интерполированные в узлы регулярной сетки с шагом $0,5^\circ$ по широте и долготе за 1938–1999 гг. из глобального архива CRU (Climatic Research Unit). Для оценки качества модельного воспроизведения современного климата применен метод, основанный на критерии Нэша–Сатклифа. Оценка качества воспроизведения комплекса среднбассейновых годовых и сезонных характеристик температуры воздуха и количества атмосферных осадков в бассейне Лены позволила ранжировать климатические модели, включенные в программу SMIP3.

Ключевые слова: глобальные климатические модели, воспроизведение температуры и осадков, критерий Нэша–Сатклифа, бассейн р. Лена.

Введение. Проблема оценки качества воспроизведения современных климатических условий глобальными моделями общей циркуляции атмосферы возникла в связи со значительными различиями сценариев изменения климата в будущем. Она связана с рядом причин [Георгиади и др., 2011, 2014; Анисимов и др., 2011; IPCC..., 2007], среди которых разница в схемах параметризации процессов, используемых в глобальных климатических моделях. Эти неопределенности затрудняют использование климатических сценариев для оценки последствий изменения климата, в том числе гидрологических.

Использование результатов глобальных климатических моделей, включенных в ряд экспериментов по их сравнению [Георгиади и др., 2011, 2014], выполняемых в рамках программы Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC), основано на следующих подходах. Один из них, который развивается преимущественно в нашей стране, состоит в предварительном отборе моделей на основе сравнения характеристик наблюдаемого и модельного климата для какого-либо региона или страны в целом [Георгиади и др., 2011, 2014; Кислов, Бабина, 2008; Кокорев, Анисимов, 2013; Менжулин и др., 2005]. Другой подход используется в ряде стран Европы и Северной Америки. Он основан на коррекции (bias correction) характеристик современного модельного климата с использованием специальной функции, которая определяется на основе статистического анализа многолетних модельных и наблюдаемых климатических полей [Haerter et al., 2011].

Для сравнения привлекаются различные характеристики современного климата (средне-многолетние годовые и сезонные климатические харак-

теристики и их многолетние тренды, а также климатические индексы). Их перечень определяется задачами исследований и площадью регионов, для которых проводится сравнение. Площадь варьирует в широких пределах в зависимости от решаемых задач [Кислов, Бабина, 2008; Менжулин и др., 2005; Haerter et al., 2011; Торопов, 2005; IPCC..., 2007]. Главный критерий выделения того или иного региона – его физико-географическая однородность, определяемая, например, на основе классификаций климата [Menzhulin et al., 2008] или синхронности долговременных тенденций в многолетних изменениях климатических характеристик [Кокорев, Анисимов, 2013].

В ряде последних исследований отмечается [там же], что для сравнения модельных и наблюдаемых характеристик климата оптимален именно региональный уровень с выделением однородных в климатическом (гидрологическом) отношении крупных регионов, для которых глобальные модели относительно надежно воспроизводят наблюдаемые климатические характеристики. В рамках регионализации результатов расчетов, полученных на глобальных климатических моделях, этот этап имеет важнейшее значение для построения их региональных ансамблей, на основе которых можно получить оптимальную сценарную оценку климатических изменений [Кокорев, Анисимов, 2013; Вильфанд и др., 2010].

Для оценки качества модельных расчетов используются как данные наблюдений на метеостанциях [Кислов, Суркова, 2009; Кокорев, Анисимов, 2013; Менжулин и др., 2005], так и глобальные сеточные архивы, подготовленные на основе данных наблюдений и реанализов [Павлова и др., 2014; Торопов, 2005; IPCC..., 2007; Reichler, Kim, 2008].

¹ Институт географии РАН, лаборатория климатологии, науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: babina_ekaterina@mail.ru

² Институт географии РАН, лаборатория гидрологии, вед. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: gallex50@gmail.com

Основная задача исследования состоит в оценке качества воспроизведения характеристик наблюдаемого климата глобальными климатическими моделями общей циркуляции атмосферы для крупного речного бассейна, который характеризуется распространением многолетнемерзлых грунтов, а также редкой сетью метеорологических станций. При этом сравниваются многолетние среднегодовые значения температуры воздуха и сумм атмосферных осадков, а также среднесезонные величины для зимы, половодья и летне-осеннего периода, осредненные для всего водосбора. В последующем полученные результаты послужат основой для оценки соответствующих сценарных гидрологических изменений.

Материалы и методы исследований. Для оценки результатов модельных расчетов применялся подход «окрестность–окрестность», который состоит в сравнении окрестностей модельных расчетов и наблюдений [Кислов, Бабина, 2008]. Сравняются модельные и наблюдаемые данные, осредненные для всей площади бассейна Лены. В качестве источника наблюдаемых данных использован глобальный архив CRU TS3.10 (Climatic Research Unit Time-Series Version 3.10 of High Resolution Gridded Data of Month-by-month Variation in Climate, <http://climexp.knmi.nl>) с шагом $0,5^\circ$ по широте и долготе. Отметим, что архивные данные для сопоставления с ними исходных модельных оценок интерполировались на равномерную сетку с тем же разрешением методом кригинга из пакета Surfer [Кислов и др., 2008]. Математическая основа этого метода представляет собой обобщенный вид линейной регрессии [Zeng, 2005].

За основной критерий оценки качества модельного воспроизведения современного климата принят критерий Нэша–Сатклифа [Nash, Sutcliffe, 1970], который успешно применяется в гидрологии при оценке качества прогнозов и моделирования гидрологических процессов [Виноградов, Никифоровский, 2015; Гусев, Насонова, 2010; Moriasi et al., 2007]:

$$Eff = 1 - \frac{\sum (x_{cal} - x_{obs})^2}{\sum (x_{obs} - \bar{x}_{obs})^2},$$

где Eff – критерий Нэша–Сатклифа, x_{cal} – модельные значения, x_{obs} – наблюдаемые значения, \bar{x}_{obs} – средние наблюдаемые значения.

Критерий Нэша–Сатклифа определяется как разность единицы и отношения сумм квадратов отклонений модельных и наблюдаемых данных к дисперсии наблюдаемых данных. Он также рекомендован Всемирной метеорологической организацией для сравнительного анализа моделей [Виноградов, Никифоровский, 2015]. Отметим, что этот критерий уже используется для оценки качества модельного воспроизведения не только гидрологических [Виноградов, Никифоровский, 2015; Гусев, Насонова, 2010; Moriasi et al., 2007], но и климатических характери-

стик глобальной климатической системы [Reichler, Kim, 2008].

Нами для оценки качества модельных расчетов применялся метод, основанный на выделении ряда градаций указанного критерия, что позволяет ранжировать климатические модели по качеству воспроизведения наблюдаемых климатических характеристик [Moriasi et al., 2007; Аполлов, 1974]. В качестве первого приближения мы вслед за [Аполлов, 1974; Гусев, Насонова, 2010] использовали следующие три градации. Первую группу образуют модели с наименьшими расчетными отклонениями от наблюдаемых данных ($Eff \geq 0,75$), во вторую включаются модели, для которых $0,36 \leq Eff < 0,75$, а к третьей группе отнесены модели с наибольшими отклонениями ($Eff < 0,36$). Граничные значения критерия можно в дальнейшем уточнять в зависимости от задачи исследований.

Такой подход позволяет объективно выделить (ранжировать) группы климатических моделей с учетом качества воспроизведения комплекса климатических характеристик. Алгоритм такого ранжирования применительно к 8 рассматриваемым нами характеристикам температуры воздуха и атмосферных осадков приведен ниже.

Отметим, что для ранжирования моделей, сравниваемых не по одной, а по нескольким климатическим характеристикам, используются и другие подходы. В основе одного из них [Жоков, Анисимов, 2013; Менжулин и др., 2005] в качестве интегральных показателей качества моделей применяется сумма занимаемых той или иной моделью позиций в рядах, ранжированных по точности воспроизведения отдельных характеристик. При таком подходе основой для ранжирования моделей служат оценки относительной (условной) точности расчетов (определяемой по положению в соответствующем ранжированном ряду), что может не отражать реальный уровень надежности (ошибок) модельных расчетов. В другом подходе [Reichler, Kim, 2008], который, по существу, близок к предыдущему, модели ранжируются на основе сумм абсолютных величин ошибок воспроизведения каждой характеристики, входящей в их рассматриваемый набор.

Характеристика исходных климатических данных. Верификация модельных результатов проводилась для бассейна р. Лена – одного из крупнейших речных бассейнов Северной Евразии (площадь $\sim 2,5$ млн км²), протяженность которого с севера на юг составляет 2500 км. Он крайне неравномерно освещен данными метеорологических наблюдений. Станции расположены преимущественно в южной части бассейна, практически нет станций на севере и в горах. В качестве характеристик наблюдаемого климата использованы данные, интерполированные в узлы регулярной сетки с шагом $0,5^\circ$ по широте и долготе за период 1938–1999 гг. из глобального архива CRU (Climatic Research Unit, <http://climexp.knmi.nl>).

Данные климатического моделирования. Сравнение характеристик модельного и наблюдаемого климата проводилось для каждой из 21 глобаль-

ных климатических моделей, включенных в ансамбль проекта «20С3М-20th Century Climate in Coupled Models» [Meehl, 2007] (архив <http://ensembles-eu.metoffice.com/>) (табл. 1). Модели различаются пространственным разрешением, числом вертикальных уровней, а также алгоритмами параметризации подсеточных процессов [Meehl et al., 2007].

Очевидно, что решение ряда гидрологических задач требует пространственной детализации наблюдаемых и модельных данных о климатических характеристиках [Кислов и др., 2007; Бабина, 2011; Wilby, 1997].

Результаты исследований и их обсуждение.
Диапазон межмодельного разброса отклонений.
Сравнивались наблюдаемые и модельные средние

многолетние значения климатических характеристик, средние за год, за зимний период (ноябрь–апрель), за период половодья (май–июль) и летне-осенний период (август–октябрь), осредненные для всего бассейна Лены.

Результаты сравнения показывают, что диапазон межмодельного разброса отклонений среднегодовой температуры воздуха (здесь и далее они приведены в абсолютных величинах) составляет 0,8–3,3 °С (табл. 2). Размах межмодельного разброса отклонений среднезимней температуры воздуха варьирует в пределах 1,3–4,2 °С, средней температуры воздуха за период половодья – 1–4,8 °С, а за лето-осень – 0,7–4,7 °С.

Таблица 1

Модели, результаты интегрирования которых использованы в работе

Модель	Организация	Страна	Пространственное разрешение
CCSM3.0	Национальный центр атмосферных исследований	США	T85L26
CNRM	Национальный центр климатических исследований	Франция	T42L45
CSIRO	Общественно-благотворительная научная и производственно-исследовательская организация «Атмосферные исследования»	Австралия	T63L18
ECHAM5 MPI-OM	Институт метеорологии Макса Планка	Германия	T63L32
ECHO G	Университет Бонна	Германия	T30L19
GFDL-CM2.0	Лаборатория геофизической гидродинамики Национальной администрации исследований атмосферы и океана	США	N45L24
GFDL-CM2.1	то же	США	M45L24
IPSL	Институт Пьера Симона Лапласа	Франция	96x72x19
MIROC3.2 (hires)	Центр исследований климатической системы	Япония	T42L20
MIROC3.2 (medres)	то же		
MRI CGCM 2.3.2	Метеорологический исследовательский институт	Япония	T42L30
PCM	Национальный атмосферный центр	США	T42L18
CGCM	Канадский центр климатического моделирования и анализа	Канада	T47L31
BCCR BCM2.0	Центр климатических исследований Бергена	Норвегия	T63L31
FGOALS g.1	Институт атмосферной физики в Академии наук Китая	Китай	2,8x2,8x26
GISS AOM	Годдард Институт метеорологических исследований	США	4x3x12
GISS EH	то же	США	4x5x20
GISS ER	— " —	США	4x5x20
INGV	Национальный институт геофизики и вулканологии	Франция	T42L19
INM	Институт вычислительной математики РАН	Россия	5x4L21
UKMO HadCM3	Центр атмосферных исследований и прогноза Хэдлей	Великобритания	2,75x3,75

Таблица 2

Значения характеристик, рассчитанных за период 1938–1999 гг.

Среднебассейновые средние многолетние среднегодовые наблюдаемые значения							
температура воздуха, °С				сумма атмосферных осадков, мм			
год	зима, XI–IV	половодье, V–VII	лето–осень, VIII–X	год	зима, XI–IV	половодье, V–VII	лето–осень, VIII–X
–10,0	–27,1	13,2	2,4	363	93	136	134
Диапазон отклонений модельных и наблюдаемых значений среднебассейновых средних многолетних среднегодовых значений							
температура воздуха, °С				сумма атмосферных осадков, мм			
год	зима	половодье	лето–осень	год	зима	половодье	лето–осень
Разница наблюдаемых и среднемодельных значений							
Все модели							
1,9	2,6	2,0	2,0	27	25	23	31
Самые худшие оценки							
3,3	4,2	4,8	4,7	49	49	43	55
Оценки, осредненные по расчетам на моделях, для которых $Eff < 0,36$							
2,5	4,0	2,3	2,8	33	27	24	34
Оценки, осредненные по расчетам на моделях, для которых $0,36 \leq Eff < 0,75$							
1,8	2,6	1,9	2,4	26	26	23	32
Оценки, осредненные по расчетам на моделях, для которых $Eff \geq 0,75$							
1,0	1,4	1,1	1,2	26	18	15	22
Наилучшие оценки							
0,8	1,3	1,0	0,7	13	12	12	22

Диапазон межмодельного разброса отклонений количества атмосферных осадков, в отличие от температуры воздуха, не сильно отличается для разных сезонов года и года в целом (табл. 2), в то время как наибольшие относительные ошибки характерны для зимнего сезона, что связано с их небольшим количеством.

Среднемодельные отклонения температуры воздуха составляют (°С) 1,9 для годовой температуры, 2,6 для среднезимней, 2,0 для половодья, 2,0 для лета–осени. Для количества атмосферных осадков оно равно (мм) для годовых сумм 27 (7%), для зимы 25 (27%), лета–осени 31 (23%), и для половодья 23 (17%).

Отметим, что ошибки модельных оценок температуры воздуха и количества атмосферных осадков сопоставимы с ошибками расчетов, полученных для территории Восточно-Европейской равнины [Кислов и др., 2008].

Разброс отклонений, осредненных по группам моделей. В табл. 2 и на рисунке показаны осредненные для площади бассейна Лены средние по трем группам моделей (составленных на основе указанных выше градаций критерия Eff) отклонения модельных оценок наблюдаемых значений среднегодовой и среднесезонной температуры воздуха, годовой и сезонной сумм количества атмосферных осадков. В них приведены также наименьшие и наибольшие отклонения, которые выбраны

из результатов расчетов, проведенных для каждой модели.

Сравнение средних отклонений по группам моделей показывает, что для температуры воздуха максимальные значения, как правило, характерны для зимы, а наименьшие – для лета–осени.

Разброс отклонений для температуры воздуха максимален в период половодья и летом–осенью, а минимален – для их годовых значений. Размах отклонений количества атмосферных осадков в основные гидрологические сезоны года примерно одинаков.

Группы климатических моделей, выделенные на основе критерия Нэша–Сатклифа. В табл. 3 приведены результаты расчетов критерия качества Eff для средних многолетних средних годовых и средних по гидрологическим сезонам отклонений климатических характеристик (температура воздуха и количество атмосферных осадков) наблюдаемого и модельного климатов, осредненных для бассейна Лены.

К группе моделей с наименьшими отклонениями ($Eff \geq 0,75$) среднегодовой и сезонной температуры воздуха от наблюдаемых данных относятся модели CCSM3.0, FGOALS g.1, IPSL. К промежуточной группе ($0,36 \leq Eff < 0,75$) – модели CNRM, ECHAM5 MPI-OM, GFDL-CM2.1, GFDL-CM2.0, IPSL, MIROC3.2 (hires), UKMO HadCM3 (табл. 3),

Таблица 3

Значения критерия Нэша–Сатклифа для средних многолетних климатических характеристик, осредненных для бассейна р. Лена

Модель	Средняя температура воздуха за				Сумма атмосферных осадков за			
	год	зиму	половодье	лето–осень	год	зиму	половодье	лето–осень
CCSM3.0	0,94	0,32	0,96	0,71	0,92	0,24	0,93	0,29
CNRM	0,72	0,70	0,52	0,76	0,96	0,30	0,52	0,23
CSIRO	0,57	0,61	0,57	0,34	0,84	0,30	0,57	0,33
ECHAM5 MPI-OM	0,66	0,59	0,37	0,38	0,34	0,75	0,37	0,48
ECHO G	0,35	0,68	0,32	0,55	0,49	0,69	0,32	0,50
GFDL-CM2.0	0,8	0,35	0,69	0,35	0,32	0,28	0,69	0,74
GFDL-CM2.1	0,69	0,51	0,72	0,42	0,82	0,31	0,72	0,92
IPSL	0,42	0,37	0,97	0,92	0,90	0,33	0,98	0,49
MIROC3.2 (hires)	0,52	0,93	0,32	0,70	0,50	0,90	0,4	0,38
MIROC3.2 (medres)	0,68	0,60	0,28	0,80	0,87	0,70	0,26	0,75
MRI CGCM 2.3.2	0,72	0,61	0,45	0,25	0,71	0,72	0,45	0,39
PCM	0,56	0,46	0,42	0,24	0,47	0,29	0,42	0,35
CGCM	0,31	0,83	0,29	0,68	0,28	0,31	0,29	0,32
BCCR BCM2.0	0,33	0,43	0,51	0,65	0,30	0,34	0,51	0,51
FGOALS g.1	0,93	0,99	0,30	0,84	0,37	0,33	0,30	0,39
GISS AOM	0,31	0,40	0,30	0,89	0,62	0,43	0,65	0,62
GISS EH	0,27	0,26	0,68	0,95	0,50	0,27	0,68	0,60
GISS ER	0,30	0,25	0,23	0,27	0,51	0,87	0,33	0,33
INGV	0,41	0,79	0,26	0,23	0,84	0,88	0,28	0,69
INM	0,22	0,55	0,29	0,54	0,90	0,62	0,30	0,26
UKMO HadCM3	0,53	0,56	0,69	0,83	0,96	0,89	0,69	0,29

тогда как аналогичную группу для отклонений годовых и сезонных сумм количества атмосферных осадков составляют модели MIROC3.2 (hires), MRI CGCM 2.3.2, PCM, GISS AOM (табл. 3).

Группу моделей, для которых расчетные отклонения как для температуры воздуха, так и для количества атмосферных осадков (среднегодовых и среднесезонных) попадают в диапазон $0,36 \leq \text{Eff} < 0,75$, составляют модели ECHO G, MRI CGCM 2.3.2, MIROC3.2 (hires), PCM, GISS AOM, а к группе с наименьшими отклонениями ($\text{Eff} \geq 0,75$) относятся модели ECHAM5 MPI-OM, CCSM3.0, GFDL-CM2.1, IPSL, MIROC3.2 (medres), INGV, UKMO HadCM3 (табл. 3). Отметим, что некоторые модели дают наименьшие отклонения лишь для отдельных характеристик температуры воздуха и количества атмосферных осадков (табл. 3).

На основе анализа способности моделей воспроизводить комплекс рассматриваемых характеристик температуры воздуха и количества атмосферных осадков, исходящей из выбранных градаций критерия Eff (табл. 3), выделены их следующие

группы (по снижению точности): модели ECHAM5 MPI-OM, GFDL-CM2.1, IPSL, MIROC3.2 (hires), MRI CGCM 2.3.2, UKMO HadCM3, которые лишь одну характеристику из 8 воспроизводят наилучшим образом (это преимущественно осадки, причем зимние). Вторая группа объединяет модели с двумя такими характеристиками: ECHO G, BCCR BCM2.0, CNRM, MIROC3.2 (medres), PCM, GISS AOM; третья группа с тремя характеристиками: CCSM3.0, CSIRO, FGOALS g.1, GISS EH, INGV; четвертая группа с четырьмя характеристиками: GFDL-CM2.0, INM. В последнюю группу входят две модели – CGCM и GISS ER, в которых точность только 2 характеристик из 8 соответствует $\text{Eff} \geq 0,36$.

Аналогичным образом можно ранжировать модели по качеству воспроизведения набора характеристик по отдельным сезонам, а также по другим характеристикам (например, многолетним трендам, климатическим индексам). Полученные оценки позволяют обосновывать выбор моделей для исследования сценарных изменений тех или иных характеристик регионального климата.

Отметим также, что включение той или иной модели в разные по ранжиру группы (табл. 3) иногда определяется различием величины критерия в сотые доли, что в ряде случаев вносит некоторую условность в такое разделение. Поэтому в подобных случаях необходим дополнительный анализ для того, чтобы обосновать включение той или иной модели в определенную группу.

Выводы:

– для оценки качества воспроизведения глобальными климатическими моделями наблюдаемых характеристик регионального климата использован метод, основанный на критерии Нэша–Сатклифа и выделении его граничных значений, определяющих качество модельных расчетов. Такой подход в течение нескольких десятилетий широко используется для оценки результатов гидрологических расчетов, в том числе для моделирования гидрологических процессов;

– оценка качества воспроизведения комплекса среднеевропейских годовых и сезонных характеристик температуры воздуха и количества атмосферных осадков в пределах крупного речного бассейна р. Лена позволила ранжировать климатические модели, включенные в программу SMIP 3;

– полученные результаты создают основу для обоснования выбора регионального ансамбля климатических моделей, на основе которого может быть получена оптимальная сценарная оценка изменений регионального климата и соответствующих гидрологических изменений.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 11-05-01057).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Анисимов О.А., Борзенкова И.И., Жильцова Е.Л. и др. Гидрометеорологические условия Волжского региона и современные изменения климата // Метеорология и гидрология. 2011. № 5. С. 33–42.

Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 420 с.

Бабина Е.Д. Развитие метода динамической интерполяции метеорологических полей на базе модели MM5: Автореф. канд. дисс. М., 2011. 20 с.

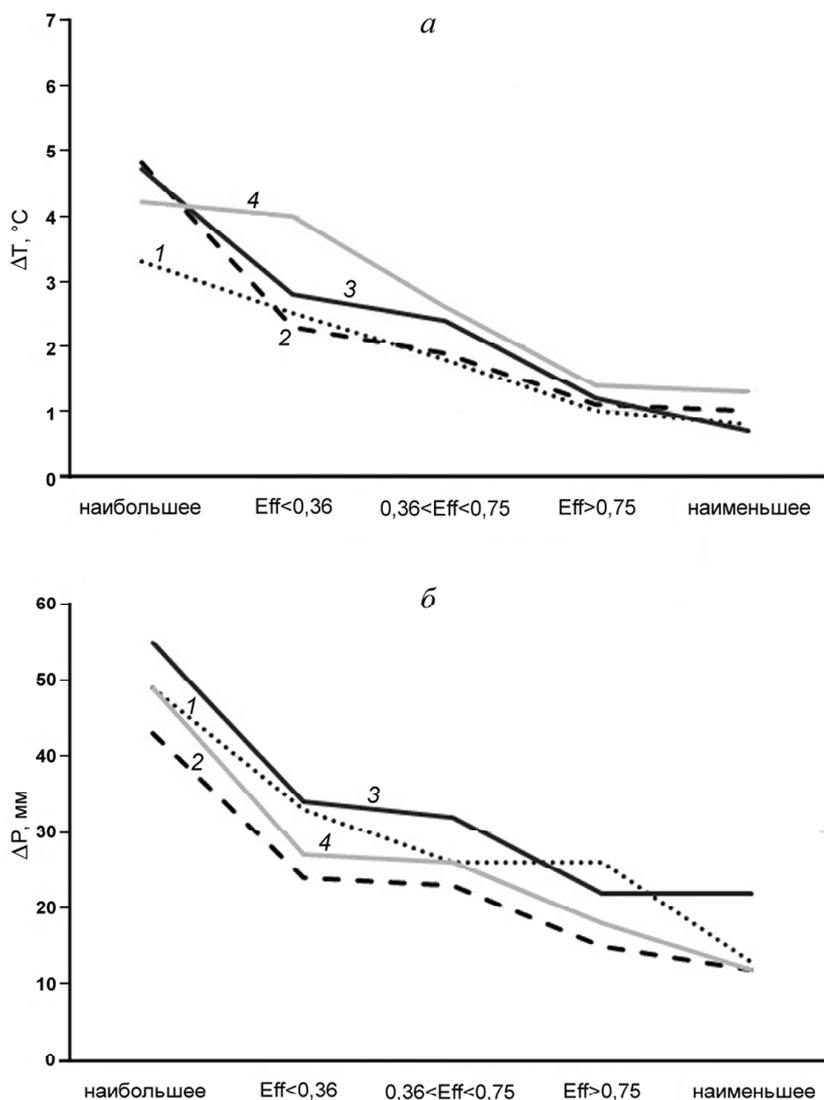
Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А. Мезомасштабный краткосрочный прогноз погоды в Гидрометцентре России на примере COSMO-RU // Метеорология и гидрология. 2010. № 1. С. 5–17.

Виноградов А.Ю., Никифоровский А.А. Анализ соответствия критериев качества моделирования процессов формирования стока малых рек // Вестн. МГОУ. Сер. Естест. науки. 2015. № 2. С. 33–38.

Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милукова И.П. и др. Сценарная оценка вероятных изменений речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Ч. 1. Бассейн реки Лены. М.: Макс Пресс, 2011. 179 с.

Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милукова И.П. и др. Современные и сценарные изменения речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Ч. 2. Бассейны рек Волги и Дона. М.: Макс Пресс, 2014. 214 с.

Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 328 с.



Средние по группам моделей отклонения от наблюдаемых значений (осредненных по площади бассейна Лены) температуры воздуха (а) и атмосферных осадков (б): 1 – среднегодовые, 2 – за период паводья, 3 – за летне-осенний период, 4 – за зимний период

The average variation from observations in groups of models (averaged Lena basin area) air temperature (a) and atmospheric precipitation (b): 1 – annual, 2 – flood period, 3 – summer-autumn period, 4 – winter period

Кислов А.В., Бабина Е.Д. Мезомасштабная модель атмосферной циркуляции как средство интерполяции метеорологических полей с высоким пространственным разрешением // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2008. № 4. С. 17–21.

Кислов А.В., Евстигнеев В.М., Малхазова С.М. Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления. М.: Макс Пресс, 2008. 290 с.

Кислов А.В., Георгиади А.Г., Алексева Л.И., Бородин О.О. Физико-статистическая модель «даунскейлинга» температуры и осадков в регионах с редкой измерительной сетью (на примере бассейна р. Лена) // Метеорология и гидрология. 2007. № 8. С. 29–36.

Кислов А.В., Суркова Г.В. Пространственно-детализированный климатический прогноз температуры воздуха и осадков в Восточной Сибири на основе учета локальных особенностей подстилающей поверхности // Метеорология и гидрология. 2009. № 3. С. 43–52.

Кокорев В.А., Анисимов О.А. Построение оптимизированной ансамблевой климатической проекции для оценки последствий изменений климата на территории России. М.: Планета, 2013. 131 с.

Менжулин Г.В., Шамиурин В.И., Савватеев С.П. К оценке точности модельных сценариев изменений климата, рекомендованных комиссией IPCC для расчетов сценариев изменений климата, рекомендованных комиссией последствий глобального потепления // Современные проблемы экологической метеорологии и климатологии. СПб.: Наука, 2005. С. 55–85.

Павлова Т.В., Катцов В.М., Мелешко В.П. и др. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата на территории Российской Федерации. Гл. 3.1. Новое поколение климатических моделей. М.: Росгидромет, 2014. С. 286–320.

Торопов П.А. Оценка качества воспроизведения моделью общей циркуляции климата Восточно-Европейской равнины // Метеорология и гидрология. 2005. № 5. С. 5–22.

Haerter O.J., Hagemann S., Moseley C., Piani C. Climate model bias correction and the role of timescales // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2011. Vol. 15. P. 1065–1079.

IPCC Fourth Assessment Report // Climate Change 2007. Switzerland, Geneva, 2007. 104 p.

Meehl G.A., Covey C., Delworth T. et al. The WCRP CMIP3 multi-model dataset: A new era in climate change research // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2007. Vol. 8. P. 1383–1394.

Menzhulin G., Peterson G., Shamshurina N. Availability of the new climate models to reproduce the historical climate variations: Whether the climate changes scenarios recommended in the 4th IPCC report can be ranked by their accuracy? // Symposium on Climate Change and Variability – Agrometeorological Monitoring and Coping Strategies for Agriculture. Norway, Oscarsborg, 2008. June 3–6.

Moriasi D.N., Arnold J.G., VanLiew M.W. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations // Amer. Soc. Agricult. and Biol. Engineers. 2007. Vol. 50(3). P. 885–900.

Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I. A discussion of principles // J. Hydrology. 1970. Vol. 10(3). P. 282–290.

Reichler T., Kim J. How well do coupled models simulate today's climate? // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2008. Vol. 3. P. 303–311.

Wilby R.L. Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations // Progr. in Phys. Geogr. 1997. Vol. 21. P. 4–12.

Zeng L.H. Kriging variance and other error related output // Minesight in the Foreg. 2005. Vol. 21(7). P. 1–4.

Поступила в редакцию 11.06.2015
Принята к публикации 02.06.2016

E.D. Babina¹, A.G. Georgiadi²

EVALUATION FOR SIMULATION OF AIR TEMPERATURE AND ATMOSPHERIC PRECIPITATION IN THE LENA RIVER BASIN BY GLOBAL CLIMATE MODELS

The quality of annual and seasonal temperature and precipitation simulation by global climate models for the Lena river basin is evaluated as a stage for the construction of possible climate change scenarios, which can be used in hydrological applications. The observed climate is characterized by climatic data of the CRU (Climatic Research Unit) global archive; they were interpolated to the 0,5° latitude/longitude grid for 1938–1999 period. To assess the quality of model climate simulation the Nash-Sutcliffe criterion was used. The evaluation of the quality of simulation of annual and seasonal temperature and precipitation characteristics in the Lena River basin allow ranking the CMIP3 climate models.

Key words: global climate models, simulation of air temperature and precipitation, Nash-Sutcliffe criterion, Lena River basin.

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Scientific Foundation (project N 11-05-01057)

REFERENCES

Anisimov O.A., Borzenkova I.I., Zhiltsova E.L. et al. Gidrometeorologicheskie usloviya Volzhskogo regiona i sovremennye izmeneniya klimata [Hydrometeorological conditions of the Volga region and the current climate change], Meteorologiya i gidrologiya, 2011, no 5, pp. 33–42 (in Russian).

Apollova B.A., Kalinin G.P., Komarov V.D. Kurs gidrologicheskikh prognozov [Course of hydrological forecasts], Leningrad, Gidrometeoizdat, 1974, 420 p. (in Russian).

Babina E.D. Razvitie metoda dinamicheskoy interpolatsii meteorologicheskikh poley na baze modeli MM5 [Development of meteorological fields dynamic interpolation method based on MM5 model], Avtoref. Phd. Moscow, 2011, 20 p. (in Russian).

Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Milyukov I.P. et al. Scenarnaya otsenka veroyatnykh izmeneniy rechnogo stoka v basseynah krupneyshih rek Rossii. Chast' 1. Basseyn reki Leny [Scenario assessment of the likely changes in the river flow in large

¹ Institute of Geography, RAS, Laboratory of Climatology, Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: babina_ekaterina@mail.ru

² Institute of Geography, RAS, Laboratory of Climatology, Leading Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: galex50@gmail.com

river basins of Russia. t. 1. Basin of Lena River], Moscow, Maks Press, 2011, 179 p. (in Russian).

Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Milyukov I.P. et al. Sovremennye i scenariye izmeneniya rechnogo stoka v basseynah krupneyshih rek Rossii. Chast' 2. Basseyny rek Volgi i Dona [Modern and scenic river flow changes in large river basins of Russia. t. 2: River basins of the Volga and the Don], Moscow, Maks Press, 2014, 214 p. (in Russian).

Gusev E.M., Nasonova O.N. Modelirovanie teplo- i vlagoobmena poverhnosti sushy s atmosferoy [Modeling of heat and moisture of the land surface to the atmosphere], Moscow, Nauka, 2010, 328 p. (in Russian).

Haerter O.J., Hagemann S., Moseley C., Piani C. Climate model bias correction and the role of timescales // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2011. Vol. 15. P. 1065–1079.

IPCC Fourth Assessment Report // *Climate Change 2007.* Switzerland, Geneva, 2007. 104 p.

Kislov A.V., Babina E.D. Mezomashtabnaya model' atmosfery cirkulatsii kak sredstvo interpolatsii meteorologicheskikh poley s vysokim prostranstvennym razresheniem [Mesoscale model of atmospheric circulation as a means of interpolation of meteorological fields with high spatial resolution], *Vestnik Moskovskogo Universiteta, seria 5, Geografiya*, 2008, no 4, pp. 17–21 (in Russian).

Kislov A.V., Evstigneev V.M., Malhazova S.M. Prognoz klimaticheskoy resursoobespechennosti Vostochno-evropeyskoy ravniny v usloviyakh potepeniya. [Climate Prediction resource supply East European Plain in a warming], Moscow, Maks Press, 2008, 290 p. (in Russian).

Kislov A.V., Georgiadi A.G., Alekseeva L.I., Borodin O.O. Fiziko-statisticheskaya model' «daunskaylinga» temperatury i osadkov v regionah s redkoy izmeritel'noy set'yu (na primere basseyna r. Lena) [Physico-statistical model of «downscaling» of temperature and precipitation in regions with sparse measuring network (for example, river Lena basin)], *Meteorologiya i gidrologiya*, 2007, no 8, pp. 29–36 (in Russian).

Kislov A.V., Surkova G.V. Prostranstvenno-detalizirovanniy klimaticheskii prognoz temperatury vozduha i osadkov v Vostochnoy Sibiri na osnove ucheta lokal'nykh osobennostey podstilaushhey poverhnosti [Spatially-detailed forecast climate temperature and precipitation in Eastern Siberia by taking into account local features of the underlying surface], *Meteorologiya i gidrologiya*, 2009, no 3, pp. 43–52 (in Russian).

Kokorev V.A., Anisimov O.A. Postroenie optimizirovannoy ansamblevoy klimaticheskoy proektsii dlya otsenki posledstviy izmeneniy klimata na territorii Rossii [Building an optimized ensemble climate projections to assess the impact of climate change on the territory of Russia], Moscow, Planeta, 2013, 131 p. (in Russian).

Meehl G.A., Covey C., Delworth T. et al. The WCRP CMIP3 multi-model dataset: A new era in climate change research // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2007. Vol. 8. P. 1383–1394.

Menzhulin G., Peterson G., Shamshurina N. Availability of the new climate models to reproduce the historical climate variations: Whether the climate changes scenarios recommended in the 4th IPCC report can be ranked by their accuracy? // *Symposium on Climate Change and Variability – Agrometeorological Monitoring and Coping Strategies for Agriculture.* Norway, Oscarsborg, 2008. June 3–6.

Menzhulin G.V., Shamshurin V.I., Savvateev S.P. K otsenke tochnosti model'nykh scenariyev izmeneniy klimata, rekomendovannykh komissiyey IPCC dlya raschetov scenariyev izmeneniy klimata, rekomendovannykh komissiyey posledstviy global'nogo potepeniya [To estimate the accuracy of model scenarios of climate change, recommended by the Commission for the calculation of IPCC climate change scenarios recommended by the Commission of the effects of global warming], *Sovremenniy problemy ekologicheskoy meteorologii i klimatologii*, SPb., Nauka, 2005, pp. 55–85 (in Russian).

Moriassi D.N., Arnold J.G., VanLiew M.W. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations // *Amer. Soc. Agricul. and Biol. Engineers.* 2007. Vol. 50(3). P. 885–900.

Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles // *J. Hydrology.* 1970. Vol. 10(3). P. 282–290.

Pavlova T.V., Katzov V.M., Meleshko V.P. et al. Vtoroy otsenochniy doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii. Glava 3.1. Novoe pokolenie klimaticheskikh modeley [Second Assessment Report of Rosgidromet on climate change in the Russian Federation. Chpt. 3.1. The new generation of climate models.], Moscow, Rosgidromet, 2014, pp. 286–320 (in Russian).

Reichler T., Kim J. How well do coupled models simulate today's climate? // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2008. Vol. 3. P. 303–311.

Toropov P.A. Ocenka kachestva vosproizvedeniya modeljami obshhey cirkulatsii klimata Vostochno-Evropeyskoy ravniny [Assessment of quality of integration of climate models of the general circulation of the East European Plain], *Meteorologiya i gidrologiya*, 2005, no 5, pp. 5–22. (in Russian).

Vilfand R.M., Rozinkina I.A. Mezomashtabniy kratkosrochniy prognoz pogody v Gidrometcentre Rossii na primere COSMO-RU [Mesoscale short-term weather forecast at the Hydrometeorological Center of Russia in the example of COSMO-RU], *Meteorologiya i gidrologiya*. 2010, no 1, pp. 5–17 (in Russian).

Vinogradov A.Y., Nikiforovskiy A.A. Analiz sootvetstviya kriteriyev kachestva modelirovaniya protsessov formirovaniya stoka malih rek [The analysis of compliance of quality criteria simulation process flow formation of small rivers], *Vestnik MGOU, seria estestv. nauki*, 2015, no 2, pp. 33–38 (in Russian).

Wilby R.L. Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations // *Progr. in Phys. Geogr.* 1997. Vol. 21. P. 4–12.

Zeng L.H. Kriging variance and other error related output // *Minesight in the Foreg.* 2005. Vol. 21(7). P. 1–4.

Received 11.06.2015

Accepted 02.06.2016