

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ИНСТИТУТ ГЛОБАЛЬНОГО КЛИМАТА И ЭКОЛОГИИ

**ПРОБЛЕМЫ
ЭКОЛОГИЧЕСКОГО
МОНИТОРИНГА
И МОДЕЛИРОВАНИЯ
ЭКОСИСТЕМ**

Том XXV

МОСКВА – 2013

Редакционная коллегия: академик РАН, проф. Ю.А. Израэль (председатель); д.ф.-м.н., проф. С.М. Семенов (зам. председателя); д.б.н., проф. В.А. Абакумов; д.ф.-м.н., проф. Г.В. Груза; к.б.н. Г.Э. Инсаров; д.б.н. В.В. Ясюкевич (ответственный секретарь).

Адрес: ул. Глебовская, д. 20Б, 107258, Москва, РОССИЯ
Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН
Факс: +7 499 160-08-31, тел.: +7 499 169-11-03

Все статьи данного издания рецензируются.

Представлены работы, посвященные мониторингу и оценке ответной реакции природных систем на антропогенные воздействия регионального, континентального и глобального масштабов, в том числе на загрязнение атмосферы и изменение климата. Рассматриваются результаты экспериментальных исследований, а также математические модели процессов.

Для климатологов, биологов и экологов широкого профиля.

Editorial Board: Member of the Russian Academy of Sciences, Prof. Yu.A. Izrael (Chairman); Prof. S.M. Semenov (Vice-Chairman); Prof. V.A. Abakumov; Prof. G.V. Gruza; Dr. G.E. Insarov; Dr. V.V. Yasukevich (Executive Secretary)

Address: 20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, RUSSIA
Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS
Fax: +7 499 160-08-31, Phone: +7 499 169-11-03

All papers published in this book are peer-reviewed.

The issues of monitoring and assessment of Earth's systems' response to anthropogenic impacts of regional, continental and global scale, in particular, to air pollution and climate change, are considered. The results of experimental studies as well as mathematical models of processes are presented.

The book is of interest for climatologists, biologists and environmentalists.

ПОСТРОЕНИЕ ОПТИМИЗИРОВАННОЙ АНСАМБЛЕВОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ПРОЕКЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОСЛЕДСТВИЙ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

*В.А. Кокорев**, *О.А. Анисимов*

Россия, 199053 Санкт-Петербург, 2-ая Линия В.О., 23, Государственный гидрологический институт, *vasilykokorev@gmail.com

Реферат. Цель работы состоит в том, чтобы уменьшить неопределенность модельных оценок последствий изменений климата за счет компоненты, связанной с климатическими проекциями. Для этого территория России была разделена на 14 регионов, характеризующихся однородностью современных климатических изменений. Далее было проведено сравнение трендов нескольких климатических характеристик (сезонных и среднегодовой температуры воздуха, сумм положительных и отрицательных температур, сезонных и годовых сумм осадков и индекса сухости), рассчитанных по моделям семейства CMIP5 и CMIP3, с регионально-осредненными данными наблюдений за два периода 1976-2005 гг. и 1940-1969 гг.. Результаты сравнения были использованы для того, чтобы оценить качество расчетов по индивидуальным моделям CMIP5 и CMIP3, ранжировать их с учетом потребностей моделирования последствий изменений климата, и определить модели, обладающие наибольшей ошибкой в каждом из регионов. В итоге были построены несколько оптимизированных ансамблевых проекций, включающих результаты различного числа высокорейтинговых моделей, и проведено сравнение с ансамблем, состоящим из всех имеющихся моделей. Было показано, что рассчитанные по ансамблю всех моделей изменения температуры на территории России в XXI веке меньше, чем оценки, получаемые при помощи оптимальных ансамблей, из которых исключены модели, обладающие высокой региональной ошибкой.

Ключевые слова. Изменение климата, ансамблевая проекция.

CONSTRUCTING OPTIMAL ENSEMBLE CLIMATIC PROJECTION FOR CLIMATE CHANGE IMPACT ASSESSMENT IN RUSSIA

V.A. Kokorev, O.A. Anisimov*

State Hydrological Institute, 23, Second Line V.O., 199053 St. Petersburg, Russia.

*vasilykokorev@gmail.com

Abstract. The purpose of the study is to narrow the range of uncertainties in climate impact modeling through minimizing the component associated with climatic projections. To accomplish this goal the Russian territory was divided into 14 regions characterized by coherent modern temperature changes. We used data from CMIP5 and CMIP3 models to calculate trends of several climatic characteristics (seasonal and annual mean air temperature, cumulative positive and negative temperature sums, annual and seasonal precipitation and the dryness index), and we compared them with regional-mean observation data for two periods: 1976-2005 and 1940-1969. The results were used for evaluating the skills of individual CMIP5 and CMIP3 GCMs, for ranking them in specific context of regional impact modeling, and for the identification of the models with big errors in each region. Ultimately, we composed several ensembles comprised of different number of selected top-ranked GCMs and compared them with the ensemble consisting of all available models. Results indicate that in most regions the all-model ensemble underestimates the projected temperature changes in Russia for the XXI century in comparison to the optimal ensembles, from which the low-ranked models are eliminated.

Key words. Climate change, ensemble projection.

Введение

Многие современные исследования посвящены изучению последствий ожидаемых изменений климата. В их основе лежит моделирование природных и социально-экономических климатозависимых процессов и объектов (далее в статье называемое импактным моделированием) с применением климатических проекций, получаемых при помощи глобальных или региональных гидродинамических моделей. Обзор результатов таких исследований для России по состоянию на 2008 год дан в Оценочном докладе об

изменении климата и его последствиях на территории Российской Федерации (Оценочный доклад..., 2008). Открытым остается вопрос о неопределенности прогностических расчетов по импактным моделям и влияющих на нее факторах. Под неопределенностью здесь понимается диапазон, в который попадают оценки, получаемые в расчетах по различным импактным моделям с использованием климатических проекций. Актуальность этого вопроса обусловлена необходимостью принятия экономических и политических решений по адаптации к изменению климата в различных областях экономики. Эффективная упреждающая адаптация возможна лишь при условии, если неопределенность оценок соответствующих последствий не слишком велика. В противном случае могут быть приняты ошибочные стратегии, ущерб от которых превысит потери, связанные с самими климатическими воздействиями.

Неопределенность оценок последствий изменений климата обусловлена как погрешностями импактных моделей, так и различиями климатических проекций, применяемых в расчетах. Важно установить, какая из этих составляющих является определяющей. Для этого необходимо сравнить результаты, получаемые в расчетах по нескольким идентичным моделям с использованием одинаковых климатических проекций, с расчетами по каждой из моделей для различных проекций. Притом, что в настоящее время имеется широкий спектр моделей различной сложности для изучения многих климатозависимых процессов и объектов, сравнение их между собой за редким исключением не проводилось. Это является принципиальным отличием от ситуации с глобальными гидродинамическими моделями, для сравнения которых был организован специальный проект, известный по англоязычной аббревиатуре СМIP (Coupled Model Intercomparison Project), который предусматривал проведение расчетов для заданных стандартизованных внешних условий. Результаты этого проекта будут рассмотрены далее в статье.

Несмотря на отсутствие аналогичных СМIP проектов для импактных моделей, можно, используя опубликованные данные, прийти к выводу, что главным источником неопределенности получаемых с их помощью прогнозов являются климатические проекции, а не различия самих моделей, при условии, что сравниваются модели сопоставимого уровня детализации. Такой вывод был сделан в нашей предшествующей публикации на частном

примере моделирования ледников (Анисимов, Кокорев, 2013). В ней проводилось сравнение результатов расчетов динамики массы ледника Сторгласиарен в Швеции по двум моделям различной сложности с использованием шести климатических проекций на конец XX века. Было установлено, что различия оценок прогнозируемого сокращения массы ледника, обусловленные климатическими проекциями, достигают 40% (диапазон 50-90%), притом, что для фиксированной климатической проекции различия результатов по двум моделям не превышают 10%. В оценочном докладе о последствиях изменения климата в Арктике (Walsh et al., 2005) было проведено аналогичное сравнение нескольких моделей многолетнемерзлых грунтов с использованием пяти климатических проекций. Там также было установлено, что неопределенности расчетов, связанные с различиями моделей, много меньше неопределенности, обусловленной климатическими проекциями.

Целью данной работы является создание предпосылок для уменьшения неопределенности модельных оценок последствий изменений климата в регионах России за счет компоненты, связанной с климатическими проекциями. Для этого нами был разработан метод построения оптимальной проекции на основе ансамбля лучших гидродинамических моделей, отбираемых по региональным критериям. Этому предшествовал анализ эволюции гидродинамических моделей в процессе развития проекта CMIP с акцентом на то, как модели различных поколений описывают изменения климатических параметров и индексов, определяющих ключевые климатозависимые процессы в регионах России. Модели были ранжированы в отношении воспроизведения ими наблюдаемых изменений этих параметров, после чего лучшие модели были отобраны для построения оптимизированной ансамблевой климатической проекции. В заключительной части сравниваются построенная нами оптимальная проекция для России и ансамблевая проекция на основе всех моделей CMIP-5 (Coupled Model Intercomparison Project – Phase 5), которая рекомендована Главной геофизической обсерваторией для использования при подготовке Второго оценочного доклада об изменении климата и его последствиях на территории России.

Организация расчетов по гидродинамическим моделям на разных фазах проекта СМIP

Проект СМIP был создан в 1995г. с целью предоставить широкому кругу специалистов расчёты по различным моделям со стандартизованными установками начальных и граничных условий и основных параметров, характеризующих изменение климатообразующих факторов (Meehl et al., 2005). Главным образом это было обусловлено необходимостью получения согласованных оценок для подготовки докладов Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). В первой фазе СМIP были проведены расчёты по 18 гидродинамическим моделям с заданными значениями солнечной постоянной и атмосферной концентрации CO_2 . Во второй фазе был добавлен расчёт с увеличивающейся концентрацией CO_2 на 1% в год, при этом другие антропогенные факторы не учитывались. На первых двух фазах СМIP данные по большинству параметров были представлены лишь для трех временных срезов в первой четверти, середине и конце 21 века, при этом ежемесячные данные были доступны лишь для ограниченного числа параметров (температура воздуха, осадки, давление). Вскоре стало ясно, что этого недостаточно, и была проведена дополнительная фаза СМIP 2+, целью которой было собрать данные расчетов уже проведённых экспериментов по более полному набору параметров. Только 12 модельных групп из 17 участвовавших в СМIP-2 предоставили такие данные (Meehl et al., 2005). Данные этой фазы вызвали большой интерес и стимулировали отдельные проекты, такие как воспроизведение климата 20 века (20С3М), воспроизведение палеоклимата (PMIP) и другие.

Существенным шагом вперед стала организация стандартизованных расчетов СМIP3 по 23 моделям (Meehl et al., 2007). В них были учтены множественные антропогенные факторы. Так, для этих расчетов было разработано несколько сценариев эмиссии парниковых газов, соответствующих различным путям дальнейшего развития мировой экономики (Nakicenovic et al., 2000). Продолжительность расчета зависела от конкретной модели, но все модели охватывали период с последней четверти 19 века до конца 21 века. Важно, что в итоге были рассчитаны среднемесячные значения большого числа параметров климата более чем за 200 лет, которые стали доступны широкому кругу пользователей через центры

распространения данных (например, <http://www-pcmdi.llnl.gov/>). Результаты CMIP3 составили основу Четвёртого оценочного доклада МГЭИК. В процессе подготовки этого доклада в очередной раз изменились представления о том, какие модельные эксперименты необходимы для анализа изменения климата в прошлом, настоящем и будущем, а также для оценки его последствий. Эти изменения нашли отражение в дизайне экспериментов пятой фазы CMIP, которые проводились по 39 гидродинамическим моделям, включая различные версии одних и тех же моделей (Taylor et al., 2011). В сравнении с CMIP3 улучшилось как качество самих моделей за счет использования более надежных параметризаций, так и полнота описания климатообразующих факторов, часто называемых форсингами (далее в статье для краткости используется этот термин). Несколько изменился подход к описанию сценариев будущих эмиссий парниковых газов (Meinshausen et al., 2011). Вместо принятых ранее стали использоваться сценарии, характеризуемые суммарной величиной дополнительного радиационного воздействия на климатическую систему. Помимо долгопериодных (для исторического периода 1850-2005 и прогностические с 2006 до конца 21 века), проводились декадные расчеты от заданных начальных условий, которые можно назвать исследовательскими. Их целью являлось изучение возможностей сезонного прогнозирования, и в данной статье они не рассматриваются.

Главный вопрос в связи с проектом CMIP состоит в том, имело ли место уменьшение неопределенности расчетов на последующих фазах по отношению к предыдущим, и если да, то было ли это обусловлено совершенствованием моделей, или же в большей степени результат был достигнут за счет улучшения описания форсингов. В работе (Reichler, Kim, 2008) авторы проводили сравнения расчётов по трём поколениям моделей по большому числу показателей для крупных регионов мира. Каждая модель сравнивалась с наблюдениями по 14 метеовеличинам за период 1979-1999 года, при этом использовалась сложная метрика, которая показывает сумму отклонений среднепогодных величин в каждом узле модельной сетки, а также учитывает дисперсию. Полученные в этой работе результаты свидетельствуют о прогрессирующем улучшении качества моделей. Так, расчеты CMIP3 по всем метеовеличинам лучше, чем CMIP1, и почти всегда лучше, чем CMIP2. На основании этих результатов авторы делают вывод, что

улучшение воспроизведения климата достигается из-за развития моделей, а не за счёт уточнённых форсингов, которые, по их мнению, играют малую роль. Этот тезис можно поставить под сомнение, поскольку в СМIP3 в исторический период используются намного более точные форсинги, чем в предыдущих экспериментах.

В контексте задач, рассматриваемых в данной статье, наибольшее значение имеет оценка воспроизведения гидродинамическими моделями климатических параметров и индексов, определяющих ключевые климатозависимые процессы в регионах России. Подавляющее большинство импактных моделей используют для прогноза последствий изменений климата в качестве входных параметров лишь две переменные – приземную температуру воздуха и построенные на ее основе индексы (суммы температур холодного и теплого периодов и т.п.) и атмосферные осадки. В ряде работ были предприняты попытки оценить, насколько хорошо гидродинамические модели СМIP-3 описывают эти переменные на территории России. Первые выводы, которые были получены в работах (Груза, Ранькова, 2009; Груза и др., 2006), оказались обескураживающими. Авторы провели сравнение расчетов средних значений и изменений температуры воздуха и осадков с наблюдениями для 6 крупных регионов России и обнаружили очень большие различия. Несколько иной вывод о пригодности использования результатов СМIP-3 для описания климата России был получен в работах (Говоркова и др., 2008; Мелешко и др., 2008). Авторы использовали иные критерии, сравнивая расчеты в целом для территории России по ансамблю из 16 моделей с индивидуальными моделями. На основании того, что случайная погрешность ансамблевых расчетов оказалась меньше, чем у любой отдельно взятой модели, был сделан вывод, что ансамблевые проекции по моделям СМIP-3 можно использовать на территории России. Заметим, что собственно различия расчетов и наблюдений на региональном уровне в этих публикациях не рассматривались. Иные оценки неопределенности воспроизведения климата в регионах России, в том числе по моделям СМIP-5, до настоящего времени получены не были.

Исходя из результатов предшествующих работ, можно сделать вывод о необходимости тестирования моделей на региональном уровне, сравнивая с наблюдениями расчетные значения регионально осредненных трендов тех параметров и индексов, которые наиболее

важны для ключевых климатозависимых процессов. Следующим шагом является построение оптимального ансамбля, из которого исключаются модели с низким региональным рейтингом. Притом, что преимущества ансамблевого осреднения не вызывают сомнений, вопрос об отборе моделей для включения в ансамбль остается открытым и продолжает обсуждаться в научных публикациях (Бекряев, 2010; Генихович и др., 2010; Knutti, 2010). В нашей работе мы тестировали, сравнивая между собой и с наблюдениями, модели третьей и пятой фазы CMIP.

Ранжирование гидродинамических моделей по воспроизведению современных изменений климата и построение оптимального ансамбля

Для описания современных изменений климата был использован архив данных месячного разрешения о температуре воздуха и осадках по 744 станциям на территории России и стран бывшего СССР. Характеристики этого архива даны в нашей предшествующей публикации (Анисимов, Жильцова, 2012).

Расчеты по гидродинамическим моделям и наблюдения представляют собой принципиально различные виды площадных (относящихся к ячейкам модельной сетки) и точечных (метеостанции) данных. Для сравнения и те и другие необходимо осреднять по регионам, которые имеют достаточно большую площадь и репрезентативно отражают пространственные закономерности изменений климата. В четвёртом оценочном докладе МГЭИК утверждается, что глобальные модели удовлетворительно воспроизводят температуру воздуха в масштабах континента, однако, импактные модели, очевидно, требуют более детального разрешения. В публикации (Raisanen, Ylhäisi, 2011) авторы пришли к выводу, что для отдельно взятой модели оптимальный масштаб пространственного осреднения имеет порядок ~2000км. Такое осреднение минимизирует случайную составляющую расчетов, с одной стороны, но с другой – уничтожает важные пространственные детали. Оптимальным является осреднение по регионам, характеризуемым однородными климатическими изменениями. Создание такого районирования, показанного на рис. 1, являлось самостоятельной задачей, в процессе решения которой нами был проведен анализ пространственных закономерностей полей температуры воздуха и осадков. Используемые для этого методы и

полученные результаты, в том числе обоснование районирования на рис. 1, даны в наших предшествующих публикациях (Анисимов, Жильцова, 2012; Анисимов и др., 2011; Анисимов, Кокорев, 2013; Anisimov et al., 2013). Не повторяя этих работ, приведем лишь те положения, которые важны для тестирования моделей.

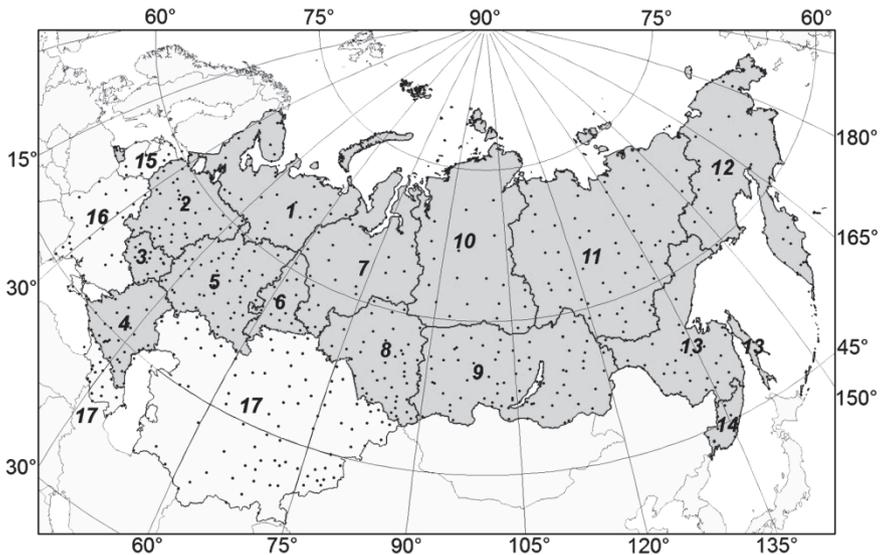


Рис. 1. Разделение территории России на регионы, характеризующиеся однородными изменениями температуры воздуха в современный период.

Современные изменения климата имеют отчетливо прослеживаемые пространственные закономерности, которые необходимо учитывать при региональном осреднении. Созданное нами районирование не является единственно возможным. Альтернативы были рассмотрены в публикации (Анисимов, Жильцова, 2012). Районирование, показанное на рисунке 1, максимально приближено к административному делению России на Федеральные округа, но содержит больше территориальных единиц, поскольку в каждом из крупных округов (Северо-Западный, Центральный, Уральский, Сибирский, Дальневосточный) были

выделены несколько районов, характеризующихся однородностью современных изменений климата. Оно удовлетворяет главному требованию, согласно которому внутрирегиональные коэффициенты корреляции рядов температуры, рассчитанные для различных пар станций в пределах одного региона, должны быть заметно выше, чем межрегиональные. Для показанного на рис.1 районирования это требование выполняется как для сезонных, так и для среднегодовой температуры воздуха. Среднерегionalные коэффициенты корреляции соответствующих рядов наблюдений за период 1970-2012г. изменяются в пределах от 0,72 до 0,83 (Анисимов и др., 2011). Нами предпринимались попытки создать аналогичное районирование в отношении осадков, но этого сделать не удалось. Поскольку поле осадков не обладает свойством непрерывности, для них нельзя надежно оценить пространственную корреляционную функцию, на основе которой определяются границы регионов. С учетом этого мы сочли возможным проводить тестирование моделей по регионам, отражающим пространственно-временную структуру лишь поля температуры. Аргументом в пользу такого выбора является то, что осадки как статистически, так и по физике процессов связаны с температурным режимом. В контексте рассматриваемой в статье проблемы немаловажно, что изменения температуры напрямую определяются радиационным воздействием, в то время как осадки изменяются опосредованно, прежде всего через интенсивность зависящего от температуры гидрологического цикла и облачности.

Не менее важную роль, чем пространственное осреднение, в рассматриваемой задаче играет обоснованный выбор временного периода для сравнения моделей и наблюдений. Этот тезис был обоснован в публикациях (Анисимов и др., 2011; Anisimov et al., 2013). В его основе лежит представление об эпохах, характеризующихся общностью статистических характеристик климата. В каждом регионе время начала современной климатической эпохи можно определить, например, как год, после которого существенно меняется статистика температурного ряда, как правило, в сторону

увеличения тренда. В (Анисимов и др., 2011; Anisimov et al., 2013) с использованием количественных критериев было показано, что в большинстве регионов России начало современной климатической эпохи приходится на середину 1970-х годов. Приняв это во внимание, а также исходя из временных границ исторических расчетов по моделям СМIP, мы выбрали для сравнения период 1976-2005 гг. Недостатком является то, что данные за этот период широко использовались для отладки моделей на этапе разработки. В нескольких публикациях высказывалось мнение, что по этой причине его нежелательно использовать для тестирования (Annan, Hargreaves, 2010; Reichler, Kim, 2008). С учетом этого, мы, помимо указанного основного, использовали также и дополнительный предшествующий ему период сравнения. Это также позволило ответить на вопрос, является ли способность модели хорошо воспроизводить климат одного периода (современный) индикатором того, что она покажет неплохие результаты и в другой период (в прошлом или в будущем). Вторым периодом 1940-1969 гг. был выбран так, чтобы он, во-первых, принадлежал к другой климатической эпохе; во-вторых, был бы обеспечен данными метеонаблюдений, и, в-третьих, был бы однороден, т.е. не содержал точек перехода от одной эпохи к другой.

Было проведено тестирование 21 модели СМIP-3 и 39 моделей СМIP-5, в процессе которого с данными наблюдений сравнивались рассчитанные тренды сезонной и среднегодовой температуры воздуха и суммы атмосферных осадков, а также следующих трех индексов, часто используемых в импактных моделях:

- ✓ сумма температур выше 0°C;
- ✓ сумма осадков холодного периода;
- ✓ индекс сухости, равный отношению суммы температур выше 0°C к годовому количеству осадков.

Сравнение проводилось следующим образом. По данным метеостанций были построены ряды аномалий исследуемых характеристик по отношению к норме 1961-1990 гг. По ним были

рассчитаны среднерегиональные ряды аномалий, при этом использовался разработанный нами метод осреднения с весами, пропорциональными ареалам метеостанции в каждом из регионов. Этот метод подробно изложен в наших предшествующих публикациях, где он применялся для анализа современных изменений климата на территории России (Анисимов, Жильцова, 2012; Анисимов и др., 2010; Анисимов и др., 2011; Анисимов и др., 2007). Под ареалом понимается территория, для всех точек которой данная станция является ближайшей. Весовое осреднение с учетом ареалов позволяет наилучшим образом использовать информацию в случае редкой и неоднородной сети наблюдений. Так, при расчете среднерегионального ряда учитываются не только станции данного региона, но и ближайшие на непосредственно примыкающей к нему территории, если хотя бы часть их ареала попадает в регион.

Аналогичным образом были построены среднерегиональные ряды аномалий по модельным данным. Были определены узлы сетки, попадающие в каждый из однородных регионов. Для них были построены ряды аномалий, полученные вычитанием из исходных модельных рядов температуры и осадков нормы за период 1961-1990 гг., которая рассчитывалась индивидуально для каждой модели по исходному ряду. Внутри каждого региона аномалии осреднялись по соответствующим узлам с весами, пропорциональными широте узла, и результат сравнивался с наблюдениями.

В таблице 1 приведены разности между трендами региональных аномалий среднегодовой температуры воздуха, рассчитанными по 39 моделям СМIP-5, и по данным наблюдений, которые далее будут называться ошибками моделей. Результаты сравнения трендов осадков показаны в таблице 2. В обеих таблицах числа в верхней и нижней частях ячеек обозначают результаты, соответственно, за дополнительный (1940-1969) и основной (1976-2005) периоды. Аналогичное сравнение было проведено и для других исследуемых характеристик, однако за неимением места результаты здесь не приводятся. По этой же причине не приведены результаты сравнения с наблюдениями 21 модели СМIP-3.

Различия наблюдаемого и модельного трендов среднегодовой температуры воздуха за периоды 1940-1969 гг. (верхнее число) и 1976-2005 гг. (нижнее число), °C/100 лет.

Модели	Регионы													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ACCESS1.3	-0,1	1,3	-1,0	-1,9	-3,8	-4,4	-5,0	-0,4	-2,6	-3,2	1,7	2,8	-2,6	-2,9
	-2,1	-4,0	-5,4	-5,4	-2,9	-2,8	-1,0	-0,1	-2,7	-2,8	0,1	0,6	-1,7	-2,7
ACCESS1-0	3,0	-0,1	-0,6	-2,0	-2,3	-1,8	0,8	1,6	-0,8	0,7	3,8	-1,6	-1,3	-1,0
	2,6	2,2	1,7	1,1	2,9	0,4	1,1	0,2	-1,1	-1,1	0,0	2,3	-1,6	-0,7
bcc-csm1-1	-1,3	-0,8	-0,3	-1,4	-3,2	-1,9	-0,9	4,8	1,9	-0,8	4,7	5,3	0,3	-2,0
	7,3	3,7	2,7	-0,1	3,9	2,6	6,6	2,5	-1,4	2,8	1,5	-0,8	-0,6	-0,5
bcc-csm1-1-m	3,4	-0,4	-1,1	-2,5	-2,5	-1,9	-1,0	1,2	-1,8	-1,9	3,1	3,3	0,6	0,3
	-2,4	-1,0	0,6	-1,2	0,3	-2,4	-1,8	0,2	-2,3	-1,0	2,8	4,8	2,8	-1,6
BNU-ESM	2,3	-2,1	-3,4	-3,2	-4,5	-4,0	0,1	-0,8	-3,0	-0,9	0,3	0,3	-4,3	-3,9
	-4,0	-6,0	-3,1	-2,2	-1,7	-2,5	-1,2	3,3	1,7	-0,1	2,3	4,2	2,2	1,4
CanCM4	2,0	1,2	1,1	-0,4	-1,6	-1,7	-0,2	3,1	0,7	0,9	4,6	2,0	0,2	0,4
	2,8	0,2	-1,1	-2,3	0,7	-1,5	0,9	-1,7	-4,6	-2,4	-0,8	-0,4	-2,0	-3,6
CanESM2	-1,1	-0,3	-2,1	-2,8	-5,0	-6,0	-4,5	-2,3	-3,1	-2,0	1,7	-2,3	-3,5	-1,6
	0,7	-0,7	-2,4	-3,0	-0,5	-2,8	1,0	1,3	-0,6	-0,1	1,0	3,2	1,1	0,4
CESM1-CAM5	2,5	2,1	2,3	0,7	-2,4	-2,9	-2,0	1,8	0,2	-2,7	0,6	-3,0	-0,5	1,2
	-5,1	-1,0	1,1	-1,5	-0,5	-3,2	-5,0	-1,2	-2,2	-4,8	-2,3	-4,1	-3,8	-2,0
CESM1-FASTCHEM	2,1	-0,2	-1,3	-0,5	-2,1	-1,7	2,6	4,9	2,8	3,1	2,6	2,2	0,6	-0,1
	0,0	-0,3	-0,1	-0,8	2,1	0,0	3,1	0,8	-2,2	2,6	2,0	-1,4	-1,5	-3,8
CMCC-CESM	4,8	3,8	-1,4	-4,1	-2,2	-1,4	0,6	3,6	2,3	2,8	6,9	5,4	1,2	0,3
	-1,0	-2,6	-1,0	-1,7	-0,3	-2,5	-0,2	-1,2	-4,1	-1,7	-2,7	-4,1	-5,7	-5,2
CMCC-CM	1,5	-0,7	-0,5	0,0	-1,6	0,0	0,9	5,8	0,1	0,2	3,8	2,6	-0,5	-0,6
	2,3	2,3	1,7	-1,0	3,0	1,4	2,8	6,2	4,6	2,1	1,0	-3,5	0,6	3,9
CMCC-CMS	5,6	5,0	4,0	1,0	4,0	4,1	2,5	4,9	0,8	1,7	6,1	2,7	2,3	1,3
	-5,6	-1,1	0,1	-1,8	-0,8	-3,5	-4,2	1,6	-0,6	-4,3	-2,2	-2,2	-1,7	0,4
CNRM-CM5	-2,1	-4,1	-5,2	-6,1	-8,9	-8,8	-3,1	-1,0	-1,0	1,5	7,1	3,8	1,0	-1,4
	5,0	2,1	2,3	-1,0	3,8	2,1	6,4	5,1	2,1	5,6	4,2	6,5	2,0	1,0
CSIRO-Mk3-6-0	0,5	-0,6	-1,7	-4,5	-4,3	-2,8	-1,5	2,3	-0,2	-1,3	2,7	2,4	-1,0	-0,7
	-0,6	-1,6	-0,1	-1,5	-1,0	-2,9	1,3	1,6	-0,8	0,4	-0,6	-1,0	0,3	-1,1
EC-EARTH	3,3	4,3	4,7	2,2	1,0	-1,3	-1,2	2,9	-0,2	-0,1	3,4	0,2	-1,3	-0,3
	-1,7	-3,4	-3,5	-3,4	-2,4	-3,4	2,0	1,0	-0,3	2,1	0,7	0,4	2,2	-0,5
FIO-ESM	5,8	1,6	2,0	-0,2	-0,3	0,3	4,1	4,6	1,2	2,6	2,6	-4,4	-2,3	-0,1
	-3,6	-5,3	-5,3	-5,8	-3,1	-2,9	1,5	1,8	-1,2	1,4	0,0	-0,4	-2,4	-2,1
GFDL-CM3	0,1	1,1	1,0	-2,0	-2,4	-3,2	-5,8	-0,7	-2,6	-6,0	-2,3	-4,0	-2,9	0,1
	-6,5	-5,7	-2,7	-2,0	1,1	-0,6	-2,6	2,7	-2,6	-4,1	-3,2	3,8	-1,6	-3,4

GFDL-ESM2G	-1,6	-2,3	-1,7	-2,0	-2,8	-2,0	-2,0	1,8	-1,0	-0,8	1,9	-2,4	-1,8	-0,7
	1,6	-0,1	-0,7	-0,8	2,8	1,6	3,5	2,4	-0,7	2,1	3,6	7,2	1,6	-1,4
GFDL-ESM2M	2,9	0,0	-0,9	-0,9	-1,1	-0,7	0,8	4,9	1,8	1,5	6,9	3,8	2,2	0,5
	-5,8	-6,9	-4,3	-3,0	-5,4	-7,9	-1,9	-1,0	0,0	-0,5	-0,2	-2,0	-0,7	-0,6
GISS-E2-H	2,3	1,8	2,6	0,9	-0,3	-0,4	1,7	5,1	1,7	2,6	5,8	4,6	-0,6	1,4
	3,1	1,9	0,6	-2,4	1,6	-0,2	1,1	-1,0	-3,6	-1,0	-0,1	-1,5	0,1	0,0
GISS-E2-R	3,8	2,3	3,2	-0,1	1,8	2,2	4,8	5,5	2,1	6,2	7,3	4,1	0,9	-0,3
	-0,7	-1,3	-1,8	-2,8	0,0	-1,6	0,9	2,4	-1,0	1,3	1,7	0,6	-0,6	-1,8
HadCM3	-3,6	-1,6	0,8	-0,6	-1,3	-1,3	-3,4	3,6	0,7	-1,2	4,0	-1,4	-2,8	0,1
	3,0	1,4	1,6	-1,4	2,4	0,1	0,9	1,3	-2,3	-1,3	4,2	2,4	1,0	1,2
HadGEM2-AO	-4,2	-7,3	-7,6	-6,4	-9,9	-8,5	-4,9	-3,9	-4,7	-4,5	1,4	-1,3	-3,3	-6,6
	1,3	4,9	5,6	0,8	4,8	1,9	3,9	6,4	2,1	4,6	3,5	0,9	0,7	-1,8
HadGEM2-CC	-0,6	-1,2	-0,5	-1,0	-2,5	-1,4	-0,3	3,0	0,6	1,9	6,1	0,7	2,6	0,8
	-0,3	-4,3	-5,9	-6,9	-3,9	-2,9	2,3	0,0	-2,4	-0,1	1,1	2,1	0,8	-1,3
HadGEM2-ES	2,5	-0,2	-1,8	-2,6	-2,4	-1,7	-1,1	-0,9	-3,4	-2,1	2,4	-1,3	-2,7	-3,1
	1,8	-0,4	-1,9	-3,5	-1,2	-2,5	1,4	2,7	1,1	1,7	4,0	3,7	2,4	0,1
Inmcm4	3,8	2,1	0,3	-0,9	-0,3	0,5	3,9	5,7	1,7	4,7	5,9	5,8	0,4	0,8
	-5,6	-6,0	-4,9	-5,2	-3,8	-4,9	-2,4	-2,3	-4,7	-3,7	-3,9	-4,2	-4,5	-3,3
IPSL-CM5A-LR	-0,8	-2,9	-4,7	-4,2	-5,3	-4,0	-3,1	1,4	-1,2	-2,9	3,5	1,0	1,2	-0,7
	-1,6	-1,1	-1,4	-2,1	1,0	0,3	-0,3	3,5	0,6	-1,8	0,1	-0,1	1,0	-0,1
IPSL-CM5A-MR	-1,2	-0,2	0,4	-1,5	-5,1	-6,5	-5,7	-0,7	0,4	-1,5	5,1	2,6	0,0	0,1
	1,5	6,0	0,8	-0,3	2,3	0,8	3,3	2,8	-0,4	2,2	0,5	-0,8	-1,9	-1,8
IPSL-CM5B-LR	-1,6	-1,4	-0,1	-1,0	-3,1	-4,2	-5,7	0,9	-1,4	-2,8	4,7	2,0	0,8	0,5
	0,8	-3,9	-8,0	-7,8	-4,3	-5,1	-1,1	-5,2	-6,5	-4,7	-4,4	-3,3	-4,0	-3,6
MIROC4h	1,0	2,8	3,1	-0,4	-1,7	-4,7	-4,6	0,3	0,3	-3,0	4,1	1,5	0,1	-0,2
	-3,5	-3,0	-3,1	-4,7	-1,4	-2,8	-2,3	1,1	-1,1	-2,3	-0,4	-0,4	-2,7	-2,4
MIROC-ESM	-2,3	-5,8	-5,3	-3,4	-7,4	-7,7	-4,4	-2,1	-3,3	-3,7	1,2	1,9	-1,4	-1,4
	-3,3	-2,6	-2,0	-1,5	-2,2	-4,1	-1,7	-0,6	-0,7	-1,8	-0,9	0,0	-0,5	-1,8
MIROC-ESM-CHEM	-0,7	-1,0	0,5	-1,0	-4,1	-5,8	-2,1	-1,8	-2,2	0,8	3,1	-0,9	-3,3	-2,9
	0,5	-2,0	-2,6	-1,6	-1,6	-2,7	1,5	1,0	-3,6	-1,0	-1,8	-1,2	-2,5	-2,5
MPI-ESM-LR	-0,9	-0,5	-0,7	-0,7	-3,3	-3,2	-2,2	3,9	3,1	-0,4	5,1	4,1	0,4	0,2
	-8,0	-6,0	-4,0	-4,6	-3,5	-4,9	-4,0	-1,0	-3,5	-4,6	-0,9	-0,2	-0,4	-0,8
MPI-ESM-MR	9,2	7,1	6,0	2,0	2,0	0,9	5,0	6,5	5,2	7,3	9,7	4,6	4,2	3,6
	-0,3	1,4	1,7	-1,5	1,5	-0,6	0,4	1,4	-1,4	-1,0	0,9	2,3	-2,5	-2,8
MPI-ESM-P	3,0	0,2	-1,6	-5,1	-6,4	-6,6	1,2	2,6	2,0	4,5	5,4	4,9	-0,5	1,3
	-2,0	-0,9	0,8	-1,7	0,2	-1,0	1,3	3,6	1,1	1,4	0,1	-1,5	-2,2	-0,2
MRI-CGCM3	6,7	3,8	2,8	-1,6	-0,6	-1,4	2,1	3,2	1,6	4,2	7,9	6,6	2,9	1,2
	-5,7	-7,5	-8,7	-8,2	-6,9	-6,7	-5,0	-4,1	-5,3	-4,7	-3,0	-1,6	-4,1	-5,2
NorESM1-M	4,0	0,2	-2,6	-4,1	-5,8	-6,9	-3,1	-2,9	-2,9	-1,4	2,9	-0,8	-0,4	0,0
	2,4	2,3	-0,4	-3,4	2,0	0,1	1,7	2,8	1,0	-0,5	-0,3	3,6	0,1	1,4
NorESM1-ME	9,4	6,4	3,7	-0,9	1,8	1,4	7,1	5,7	3,0	7,3	7,8	4,0	2,3	2,9
	0,7	-2,4	-2,9	-3,6	-1,4	-2,9	0,2	-1,0	-4,6	-5,0	-6,8	-4,1	-5,3	-2,0

Различия наблюдаемого и модельного трендов годовой суммы осадков за два периода 1940-1969 гг. (верхнее число) и 1976-2005 гг. (нижнее число), мм/10лет.

Модели	Регионы													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ACCESS1.3	-29	35	23	11	28	46	-27	16	19	-36	-16	-22	-12	-43
	12	-44	10	-9	-3	-12	-2	-15	-7	-5	1	2	13	4
ACCESS1-0	-17	-18	-6	-5	-27	-6	0	-6	16	-5	-13	-32	-34	-3
	-8	-11	11	-21	9	-14	3	12	8	-5	-2	16	12	-23
bcc-csm1-1	-17	-33	-15	-6	-15	6	6	-21	0	-1	-4	-25	-36	-44
	5	58	11	-36	6	-20	-7	-5	-6	-1	-6	10	4	-9
bcc-csm1-1-m	-7	-20	-26	-18	-25	10	-9	-6	23	3	12	-17	-23	-23
	2	42	11	-15	20	2	8	-4	-5	-4	3	26	22	16
BNU-ESM	-38	-29	4	9	-33	2	-14	-8	23	-14	-13	-30	-34	-29
	-8	-4	11	-32	10	-23	-15	-18	-10	-7	10	33	-2	-23
CanCM4	-51	-77	-202	-31	-143	-123	-99	-37	94	-80	-45	66	87	31
	10	59	37	-11	2	-27	-13	3	9	-10	-4	13	29	20
CanESM2	-30	-27	-3	-10	-16	3	-11	-13	10	-13	-8	-53	-3	-17
	-22	26	2	-22	7	-9	-12	1	-7	-6	16	36	21	-30
CESM1-CAM5	-11	15	7	-27	-13	8	7	-19	12	2	6	-32	-10	-73
	4	-20	-20	-20	14	7	1	0	-11	-14	-8	10	22	-20
CESM1-FASTCHEM	-26	7	0	-16	14	31	3	1	21	1	-6	4	-35	-64
	0	37	17	-39	7	0	-7	-27	-12	-5	-2	-10	-6	-13
CMCC-CESM	-20	-12	6	0	7	22	-6	3	12	-1	3	-15	-31	-45
	-14	15	55	-10	20	-28	3	-13	4	-8	-10	0	14	4
CMCC-CM	-16	-12	-21	-28	1	24	15	-35	4	-1	4	-34	-13	-45
	20	40	27	-11	35	24	22	32	10	8	-11	3	2	0
CMCC-CMS	-25	6	-4	-6	-3	22	-10	-27	10	7	9	-33	-2	2
	-4	8	-1	-24	20	28	7	12	6	-7	7	12	21	-7
CNRM-CM5	-54	-25	-14	-1	24	43	-11	-10	9	-7	0	-25	-32	-60
	13	32	15	-30	10	-5	7	-20	-6	-3	2	39	9	-30
CSIRO-Mk3-6-0	-19	-25	-44	-20	-15	4	-12	-17	8	-10	8	-28	-28	-42
	13	36	20	-39	26	1	2	-1	-8	-14	-3	17	10	20
EC-EARTH	-22	-33	-18	-23	-1	36	2	15	11	-4	-6	-26	-24	-41
	8	20	18	-24	35	23	6	7	-4	-12	-3	23	19	0
FIO-ESM	-21	4	-22	-7	-25	9	-4	-18	22	5	-10	-33	-20	11
	-21	4	24	-16	24	7	6	5	1	6	-4	4	7	-32
GFDL-CM3	-27	-24	-21	-34	-31	-13	-14	-16	8	-10	1	-40	-30	-62
	-11	23	25	0	-10	-25	-19	-10	11	-13	3	33	-6	-26
GFDL-ESM2G	-46	24	46	10	5	10	-17	-10	21	-3	-2	-33	-26	-2
	11	70	36	-18	22	-17	-2	16	-7	-2	9	45	16	-31

GFDL-ESM2M	-30 14	-28 108	25 23	0 -49	-5 57	30 46	1 11	-7 -3	29 11	-2 11	9 -2	-17 20	-30 -7	-16 -36
GISS-E2-H	-39 1	-61 61	0 27	28 -17	0 -12	11 -32	3 -16	3 -34	14 -6	5 -3	-7 1	-23 13	-38 8	-54 -23
GISS-E2-H-CC	-17 12	22 -26	-9 -2	-43 -51	1 14	32 -15	8 9	8 -18	26 -8	3 16	-6 5	-42 28	-21 10	-45 -48
GISS-E2-R	-14 10	-6 38	-27 21	10 -25	-3 36	3 7	-6 17	-39 -5	12 -10	13 5	8 -2	-15 8	-33 28	-63 -21
HadCM3	-20 -7	0 -6	-14 -5	-13 -38	-3 -15	16 -39	-7 -13	-4 -23	29 -8	-12 8	-6 2	-30 4	-23 19	6 -1
HadGEM2-AO	-31 22	-43 11	-9 1	-9 -28	-35 11	-16 -3	-29 26	-59 17	-6 -3	-16 2	-4 -11	-35 16	-43 28	-15 28
HadGEM2-CC	-22 15	-22 -13	-3 3	-20 -30	-17 6	4 -9	-9 -7	-23 7	26 13	-14 -5	-1 -6	-24 16	-12 16	-17 -8
HadGEM2-ES	-23 3	-48 7	-37 -7	-40 -3	-35 13	-16 14	-19 -9	-29 2	10 -6	-16 6	-11 15	-32 36	-33 15	-20 -42
inmcm4	-26 12	-6 8	20 12	3 -15	15 15	47 -3	14 -5	6 -17	27 -20	-12 -20	2 -7	7 20	-14 10	16 -41
IPSL-CM5A-LR	-27 -8	-47 61	-25 35	-18 -31	-10 20	-2 4	-9 3	-20 -3	0 11	-2 -7	1 -8	-42 19	-1 7	25 -26
IPSL-CM5A-MR	-36 -1	-17 66	-28 41	-23 -35	-8 23	42 0	1 -13	27 -20	29 -18	-4 -12	0 -8	-48 2	-31 7	-15 37
IPSL-CM5B-LR	-20 -16	-47 16	-11 51	-18 1	-22 6	12 -7	1 -20	-6 -30	12 -12	-10 -17	-4 -3	-40 30	-14 14	-9 -13
MIROC4h	-27 -22	-6 52	-24 50	19 14	6 34	41 0	2 4	2 15	9 -5	14 7	11 -9	-47 8	8 10	-34 -33
MIROC-ESM	-45 18	-12 17	38 3	1 -35	4 -2	8 3	-22 10	-26 14	15 -16	-13 -6	-5 -5	-10 19	-7 15	-10 -14
MIROC-ESM-CHEM	-28 -1	-6 0	-56 7	-61 -32	-32 31	-3 27	-4 -5	-22 -13	14 -8	-16 -19	-14 -1	-28 19	-39 11	-6 -21
MPI-ESM-LR	-23 11	17 28	35 -31	5 -30	15 -4	34 -18	-2 9	3 -18	23 -17	11 -3	10 3	-35 41	-47 12	-15 -38
MPI-ESM-MR	-5 22	-9 48	-57 3	-40 -41	-13 11	12 2	21 12	-4 -2	16 10	21 -4	10 -14	-3 25	-21 6	-56 -15
MPI-ESM-P	-40 6	-48 88	-31 -5	10 -32	-5 24	56 1	-2 4	-14 0	5 -1	-17 -10	10 -17	4 18	-10 30	-16 -7
MRI-CGCM3	-25 -21	-25 -12	-54 16	-37 -27	-15 -2	13 -13	-4 -15	-4 -11	16 -7	-5 -14	5 -5	-6 11	-28 13	17 -44
NorESM1-M	-26 20	-40 26	-38 -3	-28 -25	-18 16	5 -10	-13 -1	-13 -10	5 -6	-14 0	-3 5	-9 19	-19 43	-30 -15
NorESM1-ME	-18 -1	2 38	0 21	-13 -18	-20 -7	2 -33	-4 -26	-13 -23	14 -8	3 -17	3 -4	-20 24	-32 15	-27 -28

На рисунке 2 показаны осредненные по всем регионам ошибки расчета среднегодовой температуры воздуха (рис. 2А) и годовой суммы осадков (рис. 2Б) по моделям СМIP-5 для двух рассматриваемых периодов.

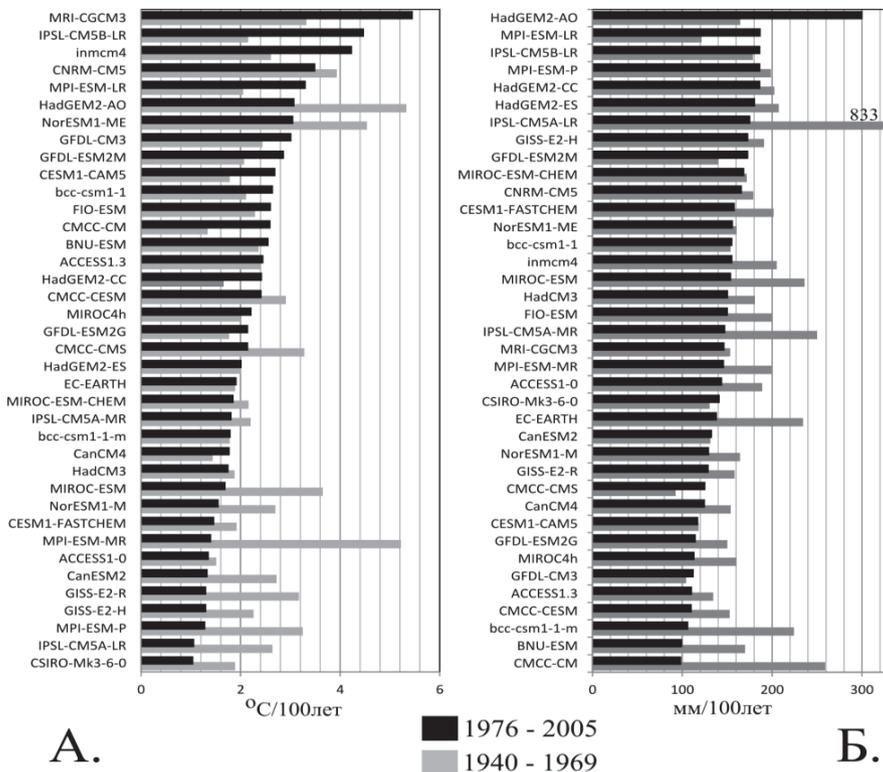


Рис. 2. Средняя ошибка воспроизведения тренда температуры воздуха (А) и годовой суммы осадков (Б) за два периода.

Видно, что модели по-разному воспроизводят тренды температуры на территории России, при этом можно выделить некоторые закономерности. Так, большая часть моделей, показывающих лучшие результаты в ранний период, также демонстрируют результаты лучше среднего и в современный период. Заслуживает внимания то, что в современный период модели, занимающие первые 10-15 позиций рейтинга, определяемого величиной отклонения от наблюдений, имеют близкие значения

средней ошибки. Модели, занимающие последние строчки рейтинга в один из периодов, как правило, не показывают хороших результатов и в другой период. Если же модель удовлетворительно воспроизводит температуру только за один период, то можно предположить, что такой результат достигнут либо случайно, либо обусловлен подстройкой на стадии разработки. Возможно и то, что за время между двумя периодами изменились ключевые факторы, ответственные за формирование климата данного региона, что сказалось на точности его модельного воспроизведения.

Данные об ошибках расчета трендов температуры воздуха, показанные на рисунке 2А, были использованы для того, чтобы сформировать два оптимизированных ансамбля. В первый вошли 8 моделей со средней по всем регионам и за оба периода ошибкой тренда меньше $2^{\circ}\text{C}/100$ лет, во вторую – 26 моделей со средней ошибкой меньше $3^{\circ}\text{C}/100$ лет на сто лет. В таблице 3 приведены прогнозируемые значения среднемноголетних аномалий сезонных и среднегодовой температур воздуха по этим ансамблям, а также по ансамблю из всех моделей, рассчитанные с использованием сценария RCP8.5. Для сопоставимости с данными, рекомендованными ГГО для подготовки Второго оценочного отчета об изменении климата на территории России, результаты осреднялись за два 20-летних периода в первой четверти (2011-2030гг.) и в середине (2041-2060гг.) 21 века. Сравнивая данные различных ансамблей, можно отметить следующие закономерности. Прогнозируемые аномалии среднегодовых температур во всех ансамблях различаются незначительно и много меньше, чем сезонные, в особенности за весенний период. В большинстве регионов наибольшие изменения среднегодовой температуры дает ансамбль из 26 моделей, а наименьшие – ансамбль из 8 моделей, различия в отдельных регионах достигают $0,4^{\circ}\text{C}$, притом, что в других оценки практически совпадают. Следует принимать во внимание, что все результаты осреднялись за 20 лет, в то время как в большинстве предшествующих работ использовался 30-летний период осреднения. Из-за этого в полученных оценках может содержаться заметная компонента, отражающая межгодовую изменчивость. Она может сказываться на результате для первого периода, поскольку ее величина сопоставима с полезным сигналом. По мере увеличения заблаговременности прогноза это влияние уменьшается. Подробнее этот вопрос обсуждается в дискуссии.

**Аномалии температуры воздуха относительно нормы 1961-1990 года
для регионов России по трём различным ансамблям по сценарию
RCP8.5**

Регионы			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Ансамбль 8 моделей	2011-2030	Зима	2,6	2,4	2,6	2,2	2,5	2,4	2,5	2,4	2,2	2,6	2,4	2,9	2,3	1,9
		Весна	1,8	1,8	1,9	1,6	2,0	2,0	1,9	1,9	1,5	1,9	1,7	1,9	1,2	1,2
		Лето	1,5	1,6	1,7	1,8	1,7	1,6	1,5	1,7	1,5	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2
		Осень	2,2	1,6	1,5	1,4	1,8	1,9	2,7	2,2	2,1	3,0	2,5	2,4	1,8	1,5
		Год	2,0	1,9	1,9	1,8	2,0	2,0	2,2	2,1	1,8	2,2	2,0	2,1	1,6	1,4
	2041-2060	Зима	5,3	4,4	4,2	3,4	4,3	4,1	4,9	4,1	3,8	4,8	4,6	5,6	4,2	3,8
		Весна	3,8	3,6	3,7	3,2	3,8	3,5	3,6	3,1	2,5	3,3	3,0	3,4	2,5	2,6
		Лето	2,8	2,9	3,1	3,4	3,1	3,2	3,1	3,4	3,0	2,9	2,6	2,6	2,6	2,8
		Осень	4,2	3,2	3,0	2,9	3,3	3,6	4,8	3,9	3,9	5,3	4,7	4,4	3,5	3,2
		Год	4,0	3,5	3,5	3,2	3,6	3,6	4,1	3,6	3,3	4,1	3,7	4,0	3,2	3,1
Ансамбль 26 моделей	2011-2030	Зима	2,8	2,5	2,4	1,8	2,6	2,6	2,9	2,5	2,2	2,8	2,5	2,8	2,2	1,8
		Весна	2,1	2,0	1,9	1,6	2,1	2,1	2,2	2,1	1,7	2,2	2,1	2,1	1,6	1,4
		Лето	1,7	1,8	1,9	2,0	1,8	1,8	1,7	1,8	1,6	1,6	1,5	1,7	1,4	1,4
		Осень	2,3	1,7	1,6	1,5	1,7	1,9	2,7	2,1	2,1	3,0	2,7	2,6	1,9	1,6
		Год	2,2	2,0	2,0	1,7	2,1	2,1	2,4	2,1	1,9	2,4	2,2	2,3	1,8	1,5
	2041-2060	Зима	5,7	4,7	4,4	3,3	4,7	4,7	5,7	4,6	4,0	5,6	5,2	6,1	4,6	3,8
		Весна	4,1	3,8	3,6	3,1	4,0	3,9	4,1	3,9	3,2	4,0	4,0	4,0	3,2	2,9
		Лето	3,2	3,2	3,6	3,8	3,4	3,5	3,6	3,6	3,3	3,5	3,2	3,4	3,0	3,0
		Осень	4,4	3,6	3,3	3,2	3,7	3,9	5,1	4,0	4,0	5,7	5,3	5,0	3,9	3,4
		Год	4,4	3,8	3,7	3,4	4,0	4,0	4,6	4,0	3,6	4,7	4,4	4,6	3,7	3,3
Все модели	2011-2030	Зима	2,7	2,4	2,4	1,8	2,5	2,5	2,8	2,3	2,0	2,6	2,3	2,7	2,1	1,6
		Весна	2,0	1,9	1,8	1,5	1,9	1,9	2,0	1,9	1,6	2,0	1,9	1,9	1,5	1,3
		Лето	1,6	1,7	1,8	1,9	1,7	1,6	1,6	1,7	1,5	1,5	1,4	1,6	1,3	1,3
		Осень	2,2	1,6	1,5	1,5	1,7	1,8	2,5	1,9	1,9	2,8	2,5	2,4	1,7	1,5

	Год	2,1	1,9	1,9	1,7	2,0	2,0	2,2	1,9	1,7	2,2	2,0	2,2	1,7	1,4
		2011-2060													
	Зима	5,6	4,6	4,3	3,2	4,6	4,6	5,5	4,4	3,8	5,4	5,0	5,8	4,3	3,6
	Весна	3,9	3,6	3,4	2,9	3,7	3,7	3,9	3,6	3,0	3,9	3,8	3,8	3,1	2,7
	Лето	3,1	3,2	3,5	3,7	3,3	3,3	3,4	3,4	3,1	3,3	3,0	3,3	2,9	2,8
	Осень	4,3	3,4	3,2	3,1	3,5	3,7	4,9	3,8	3,8	5,5	5,1	4,8	3,7	3,3
	Год	4,2	3,7	3,6	3,2	3,8	3,8	4,4	3,8	3,4	4,5	4,2	4,4	3,5	3,1

Дискуссия

Полученные результаты позволяют сделать несколько выводов о качестве воспроизведения и прогноза гидродинамическими моделями рассмотренных в работе климатических характеристик в регионах России.

Не все модели сохраняют способность удовлетворительно воспроизводить климат исследуемых регионов в различные интервалы времени, причем точность воспроизведения уменьшается по мере удаления в прошлое. Ансамбль из моделей, хорошо воспроизводящих климат периода 1940-1969 гг., и в современном периоде работает лучше ансамбля всех моделей. Данные CMIP5 показывают заметное улучшение воспроизведения осадков по сравнению с CMIP3. Часть моделей, показывающих лучшие результаты в воспроизведении осадков, также хорошо воспроизводят температуру. Исходя из этого, можно предложить алгоритм составления оптимизированного ансамбля, состоящий в исключении моделей, воспроизводящих температурные параметры в различные периоды прошлого с наибольшими ошибками, ранжировании оставшихся моделей по качеству воспроизведения осадков и объединении лучших в ансамбль.

Главным вопросом является уменьшение неопределенности прогноза будущих последствий изменений климата за счет ее компоненты, связанной с модельными проекциями. Анализ того, насколько это осуществимо при различной заблаговременности прогнозов, дан в работе (Hawkins, Sutton, 2009). Авторы показывают, что межгодовая изменчивость значительно превышает ожидаемую величину изменений в первые десять лет прогноза, что делает его крайне неопределённым, принимая во внимание сложность точного задания начальных условий. Заметим, что, по-видимому, это нашло отражение и в полученных нами результатах прогноза на 2011-

2030гг. В (Frame, Stone, 2012) было показано незначительное влияние выбора сценария эмиссии на временном промежутке до 20 лет, после чего обусловленная этим неопределенность начинает расти, и на временном интервале более 50 лет эта компонента становится доминирующей. При этом компонент неопределённости, связанный с ошибкой самих моделей остаётся примерно одинаковым, а относительная ошибка постепенно уменьшается по мере роста ожидаемого значения изменений. Из этого следует, что наиболее информативной является климатическая проекция на период 20-50 лет, поскольку при этом суммарная неопределённость, обусловленная всеми факторами, минимальна.

Не следует забывать, что, помимо осредненной по ансамблю, целесообразно рассматривать и проекции по отдельным составляющим ансамбль моделям, каждая из которых описывает возможную траекторию развития климатической системы. Некоторые исследователи сосредотачивают усилия на переводе результатов модельных расчётов в термины вероятности, при этом вероятность какого-либо будущего состояния климатической системы определяется количеством моделей или расчётов, в которых оно реализуется. Нам представляется, что современный уровень развития моделей едва ли позволяет рассчитывать с достаточной надёжностью вероятностную функцию распределения состояний будущего климата. Неоправданно приписывать им различные вероятности на основании арифметического подсчета числа моделей, прогнозирующих соответствующие условия. На наш взгляд более оправдано использовать оптимально отобранные модели, рассматривая их ансамблевое осреднение как наиболее вероятную проекцию, а межмодельный разброс внутри ансамбля – как интервал неопределенности в пределах которого равновероятны все возможные траектории развития климата.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 13-05-00072 и 13-05-91171-ГФЕН_a.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов О.А., Жильцова Е.Л. 2012. Об оценках изменений климата регионов России в 20 и начале 21 веков по данным наблюдений. Метеорология и гидрология. № 6. С. 95-107.

2. Анисимов, О.А., Жильцова Е.Л., О.К. Захарова. 2010. Анализ и прогноз пространственных закономерностей полей температуры воздуха и осадков с учетом атмосферной циркуляции: применение в экосистемном моделировании. Проблемы экологического моделирования и мониторинга экосистем. Т. 23. – М.: ИГКЭ. С. 22-37.
3. Анисимов О.А., Жильцова Е.Л., Кокорев В.А. 2011. Пространственные и временные закономерности динамики температуры воздуха на территории России в 20 – начале 21 века. Проблемы экологического моделирования и мониторинга экосистем. Т. 24. –М.: ИГКЭ. С. 83-98.
4. Анисимов О.А., Кокорев В.А. 2013. Об оптимальном выборе гидродинамических моделей для оценки влияния изменений климата на криосферу. Лед и Снег. № 1. С. 83-92.
5. Анисимов О.А., Лобанов В.А., Ренева С.А. 2007. Анализ изменений температуры воздуха на территории России и эмпирический прогноз на первую четверть 21 века. Метеорология и гидрология. № 10. С. 20-30.
6. Бекряев Р.В. 2010. Дискриминация климатических моделей. Вероятностный подход. Труды главной геофизической обсерватории. Катцов В.М., Мелешко В.П. (ред.). –С.-Пб. С. 47-67.
7. Генихович Е.Л., Павлова Т.В., Катцов В.М. 2010. О комплексировании климатических моделей. Труды главной геофизической обсерватории. Катцов В. М., Мелешко В. П. (ред.). –С.-Пб. С. 28-46.
8. Говоркова В.А., Катцов В.М., Мелешко В.П., Павлова Т.В., Школьник И.М. 2008. Оценка пригодности моделей общей циркуляции атмосферы и океана СМIP3 для расчетов будущих изменений климата России. Метеорология и гидрология. № 8. С. 5-20.
9. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. 2009. Оценка предстоящих изменений климата на территории Российской Федерации. Метеорология и гидрология. № 11. С. 5-29.
10. Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Аристова Л.Н., Клещенко Л.К. 2006. О неопределенности некоторых сценарных климатических прогнозов температуры воздуха и осадков на территории России. Метеорология и гидрология. № 10. С. 5-23.
11. Мелешко В.П., Катцов В.М., Говоркова В.А., Спорышев П.В., Школьник И.М., Шнееров Б.Е. 2008. Климат России в XXI веке. Часть 3. Будущие изменения климата, рассчитанные с помощью ансамбля моделей общей циркуляции атмосферы и океана СМIP3. Метеорология и гидрология. № 9. С. 5-22.
12. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. 2008. Т. 2. Последствия изменений климата. М.: Росгидромет. 288 С.
13. Anisimov O.A., Kokorev V.A., Ziltcova E.L. 2013. Temporal and Spatial Patterns of Modern Climatic Warming: Case Study of Northern Eurasia. Climate Change. doi: 10.1007/s10584-013-0697-4
14. Annan J.D., Hargreaves J.C. 2010. Reliability of the CMIP3 ensemble. Geophysical Research Letters. 2010. P. 1-5.
15. CMIP3 Multi-Model Dataset Archive at PCMDI. www.pcmdi.llnl.gov
16. Frame D.J., Stone D.A. 2012. Assessment of the first consensus prediction on climate change. Nature Climate Change. №3. P. 357-359. doi:10.1038/nclimate1763

17. Hawkins E., Sutton R. 2009. The Potential to Narrow Uncertainty in Regional Climate Predictions. *Bulletin of the American Meteorological Society*. № 8. P. 1095-1107.
18. Knutti R. 2010. The end of model democracy? *Climatic Change*. №102. P. 395-404. doi: 10.1007/s10584-010-9800-2
19. Meehl G.A., Covey C., McAvaney B., Latif M., Stouffer R.J. 2005. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*. № 1. P. 89-93.
20. Meehl G.A., Covey C., Taylor K.E., Delworth T., Stouffer R.J., Latif M., McAvaney B., Mitchell J.F. B. 2007. THE WCRP CMIP3 Multimodel Dataset: A New Era in Climate Change Research. *Bulletin of the American Meteorological Society*. № 88. P. 1383-1394. doi: 10.1175/BAMS-88-9-1383
21. Meinshausen M., Smith S.J., Calvin K., Daniel J.S., Kainuma M.L.T., Lamarque J.-F., Matsumoto K., Montzka S.A., Raper S.C.B., Riahi K., Thomson A., Velders G.J.M., Vuuren D.P.P. 2011. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*. №. 1. P. 213-241. doi:10.1007/s10584-011-0156-z
22. Nakicenovic N., Swart R. et al. (Eds.) 2000. Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: Cambridge and New York. 599 P.
23. Raisanen J., Ylhaisi J.S. 2011. How Much Should Climate Model Output Be Smoothed in Space? *Journal of Climate*. № 3. P. 867-880. doi: 10.1175/2010JCLI3872.1
24. Reichler T., Kim J. 2008. How Well Do Coupled Models Simulate Today's Climate? *Bulletin of the American Meteorological Society*. № 3. P. 303-311. doi:10.1175/BAMS-89-3-303
25. Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A. 2011. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society*. №93. P.485-498. doi: 10.1175/BAMS-D-11-00094.1
26. Walsh J.E., Anisimov O., Hagen J.O.M., Jakobsson T., Oerlemans J., Prowse T.D., Romanovsky V., Savelieva N., Serreze M., Shiklomanov I., Solomon S. 2005. Cryosphere and Hydrology, in Arctic Climate Impacts Assessment. Cambridge University Press: Cambridge, UK. P. 183-242.