

Подземные льды и наледи

УДК 551.583

Об оптимальном выборе гидродинамических моделей для оценки влияния изменений климата на криосферу

© 2013 г. О.А. Анисимов, В.А. Кокорев

Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург

oleg@oa7661.spb.edu

Статья принята к печати 12 ноября 2012 г.

Ансамблевые климатические проекции, изменение климата, моделирование.
Climate change, ensemble climatic projections, modeling.

Предлагается методика построения ансамблевой климатической проекции для изучения предстоящих изменений криосферы, основанная на оптимальном выборе гидродинамических моделей. Данные наблюдений 744 метеостанций на территории России и сопредельных стран используются для оценки точности воспроизведения моделями параметров климата, в наибольшей степени определяющих состояние криосферы. Для отбора лучших моделей результаты расчётов сравниваются с наблюдениями, осреднёнными по 17 крупным регионам, характеризуемым однородностью изменений температуры воздуха в период современного потепления, начало которого определяется статистическими методами. Приведены результаты тестирования, по которым в каждом регионе определены гидродинамические модели, наилучшим образом описывающие динамику климатических факторов, влияющих на криосферу. Эти модели объединены в ансамбли, при помощи которых строятся оптимальные региональные климатические проекции. Построена также оптимальная климатическая проекция для всей области распространения многолетнемерзлых грунтов на территории России.

Введение

Наблюдения свидетельствуют об усиливающемся влиянии изменения климата на криосферу, которое уже привело к беспрецедентному сокращению площади морских льдов в Арктическом бассейне, уменьшению продолжительности ледового периода на пресноводных водоёмах, повышению температуры и сокращению площади распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ), увеличению мощности сезонно-талого слоя (СТС) в области распространения многолетнемерзлых грунтов, уменьшению массы большинства ледников, сокращению площади и времени залегания снежного покрова. Исчерпывающий анализ современных изменений криосферы дан в Оценочном отчёте Арктического совета [12]. В нём же приведены оценки на перспективу, которые значительно различаются между собой. Снижение неопределённости таких оценок, обусловленной как различиями климатических проекций, так и погрешностями моделей, описывающих криосферные процессы, — одна из актуальных задач исследований.

Анализ показывает, что главный источник неопределённости прогноза состояния криосферы — климатические проекции. В качестве примера можно привести расчёт баланса массы хорошо изученного ледника Стур-гласиерен в Швеции, проводившийся по двум моделям

разной детализации [14, 20]. Более сложная модель основана на пространственно-распределённом расчёте всех составляющих энергетического баланса. Во второй модели использовалось полуэмпирическое соотношение, связывающее скорость таяния с температурным индексом. Расчёты выполнялись для шести климатических проекций на конец XXI в. Полученные оценки сокращения объёма ледника к концу XXI в. лежат в диапазоне 50–90%, причём различия, обусловленные климатическими проекциями, достигают 40%, в то время как с выбором модели таяния ледника связано лишь 10% неопределённости [20]. Это подтверждает сделанный ранее в работе [19] вывод, что неопределённости прогноза, связанные с упрощённым описанием процессов таяния при моделировании ледников, много меньше неопределённости, обусловленной климатическими проекциями. Заметим, что такой же вывод был сделан и в отношении прогноза состояния многолетнемерзлых грунтов при сравнении расчётов по моделям разной сложности, использующих несколько климатических проекций [3, 23].

Интересны результаты расчётов, в которых для десяти климатических проекций на 2100 г. при помощи температурного индекса прогнозировался баланс массы более 120 тыс. ледников в различных частях Арктики [21]. Для разных климатических проекций уменьшение сум-

марного объёма всех ледников составило 12–32%. Показательно, что диапазон оценок зависел от региона и был наименьшим для ледников Аляски и Шпицбергена и достаточно широким – для ледников Канадского Арктического архипелага и Российской Арктики. Отчасти это можно объяснить разной степенью изученности ледников, что влияет на точность моделирования. Но очевидно и то, что различия между климатическими проекциями связаны и с пространственными закономерностями, поэтому предсказуемость климатических параметров, определяющих состояние криосферы, зависит от региона. Последнее может быть обусловлено как спецификой локальных топографических, ландшафтных и иных условий, в силу которых отдельные регионы лучше описываются гидродинамическими моделями, так и скрытой подстройкой моделей, которая может проводиться для достижения наилучших показателей воспроизведения климата в регионах, наиболее интересных для разработчиков. Из этого следует, что гидродинамические модели целесообразно оценивать на региональном уровне по параметрам, которые в наибольшей степени влияют на изучаемые климатозависимые процессы. В контексте прогноза состояния криосферы к ним следует отнести температурные индексы, характеризующие теплообеспеченность периода таяния, суммы осадков, а также соотношение между теплообеспеченностью и осадками.

В многочисленных публикациях показано, что наблюдаемые климатообусловленные вариации площади и объёма ледников, а также мощности СТС в области распространения многолетнемерзлых грунтов почти целиком описываются изменениями указанных параметров. В исследовании [10] получена оценка вклада различных климатических факторов в формирование термического режима многолетнемерзлых грунтов на территории России. Установлено, что его современные изменения в европейской части обусловлены преимущественно ростом температуры, а в азиатской – увеличением количества зимних осадков [10, 11]. Для ледников современные вариации летней температуры, как правило, играют бóльшую роль, чем осадки [13, 16]. Такой вывод можно сделать по модельным оценкам чувствительности баланса массы 42 ледников в зоне севернее 60° с.ш. к гипотетическому увеличению температуры на 1 °С и росту осадков на 10%, диапазоны которых колеблются соответственно от –0,2 до –2,0 и от 0,1 до 0,4 м/год [24].

В данной статье оцениваются неопределённости прогноза с помощью гидродинамических моделей температуры и сумм осадков в регионах России и сопредельных странах. Для этого анализируются современные региональные изменения климата по данным наблюдений и их воспроизведение гидродинамическими моделями. Наиболее успешные модели в дальнейшем объединяются в ансамбль, а на его основе строятся региональные климатические проекции, оптимизированные для прогноза состояния криосферы.

Критерии и методы оценки гидродинамических моделей на региональном уровне

В ряде работ предприняты попытки оценить качество гидродинамических моделей для территории России путём сравнения рассчитанных трендов температуры воздуха и осадков с данными наблюдений. При этом авторы, используя различные критерии и методы сравнения, пришли к противоречивым выводам. Так, в серии публикаций [5, 9] сравнивались расчёты по индивидуальным моделям и по ансамблю из 16 моделей семейства СМIP3. Проект сравнения климатических моделей СМIP и его третьей фазы описывается в публикациях [17, 18]. Показано, что ансамблевое осреднение уменьшает случайную погрешность модельного воспроизведения температуры воздуха и осадков в целом по всей территории России за период наблюдений в XX в. На этом основании делается вывод, что ансамблевые проекции по существующим моделям можно использовать для изучения будущих изменений климата и их последствий на территории России, однако при этом различия расчётов и наблюдений на региональном уровне в работе не анализировались. Иной вывод получен в работах [6, 7], где оценивались отдельные модели СМIP3 по наблюдениям в шести крупных регионах. Показано, что все тестируемые модели значительно отличаются от регионально осреднённых наблюдений при воспроизведении как температуры воздуха, так и осадков.

Заметим, что полученные в этих работах результаты по конкретным моделям устарели, так как сейчас доступны результаты пятой фазы проекта СМIP. Тем не менее, обобщая результаты этих работ, мы можем сделать два вывода, сохраняющие актуальность и для современной фазы проекта – СМIP5: 1) неопределённость климатических проекций уменьшается при осреднении по нескольким моделям, объединённым в ансамблевую проекцию, за счёт частичной компенсации случайных погрешностей, которые присущи каждой индивидуальной модели [5]; 2) модели должны оцениваться на региональном уровне [6]. Вместе с тем неясны вопросы отбора модели для построения мультимодельной ансамблевой проекции и выбора регионов, по которым можно вести сравнение моделей с наблюдениями. Первоначально считалось, что чем больше используется моделей в ансамблевой проекции, тем она надёжнее. Однако в настоящее время полагают, что модели заведомо низкого качества следует исключать. Интересный обзор идей по данной теме дан в публикации [15], правда, чётких критериев отбора моделей до сих пор нет.

Важность обоснованного выбора регионов определяется тем, что осреднение по произвольно выбранной территории отчасти уничтожает детали, позволяющие судить о причинно-следственных связях в климатической системе. Пространственное осреднение возможно, если оно ведётся по регионам с однородными измене-



Рис. 1. Регионы с однородными изменениями температуры воздуха на территории России (1–14) и сопредельных стран (15–17).

Голубой линией показана граница сплошного распространения многолетнемёрзлых пород. Точками обозначены 744 метеостанции, данные которых использовались в расчётах

Fig. 1. Regions with coherent temperature changes in Russia (1–14) and neighboring countries (15–17).

Blue curve indicate the continuous permafrost boundary. Also shown are 744 meteorological stations that were used in the study

ниями климата (далее в статье они обозначаются как однородные регионы). Методология такого районирования уже описана в наших публикациях [1, 2]. Разделение на однородные регионы проводится на основе анализа пространственно-временных закономерностей поля температуры воздуха таким образом, чтобы внутрирегиональные корреляции рядов температуры были намного больше, чем межрегиональные. Метрика однородности – региональный коэффициент корреляции поля температуры $H = n^{-1} \sum (r_{ij})$, где n – число станций в регионе; r_{ij} – коэффициент корреляции рядов температуры воздуха на станциях i и j ; суммирование ведётся по всем возможным парным комбинациям станций региона.

Задача разделения территории на однородные регионы имеет множественное решение, поскольку в зависимости от выбора начальных станций можно построить несколько различающихся вариантов пространственного деления, удовлетворяющих заданному критерию. Поэтому на практике целесообразно идти от обратного: задавшись каким-то изначальным разделением на регионы, оценивать их однородность, а при необходимости разделять их на более мелкие или же, наоборот, объединять соседние регионы, если имеется высокая корреля-

ция рядов температуры между расположенными в них станциями. На рис. 1 показаны выделенные таким методом 17 регионов на территории России и сопредельных стран. В данном случае в основу районирования положено административное деление РФ на федеральные округа с последующим разделением их на более мелкие однородные регионы. Заметим, что Калининградская область относится к региону 2, поскольку данные метеостанций хорошо коррелируют, а это – единственный критерий принятого в работе районирования. Вся территория вне границ России разделена на самостоятельные регионы 15–17, каждый из которых объединяет несколько независимых государств. В наши задачи не входило построение оптимальной проекции для регионов вне России. Для них ряды наблюдений имеют пропуски, а в Балтийских странах (регион 15) данные ограничены 1990 г. С учётом этого все оценки для регионов вне России приводятся в статье лишь для иллюстрации возможностей предложенного метода, которые могут быть реализованы только при достаточном объёме необходимых региональных данных. Голубой линией на рис. 1 показана граница сплошного распространения многолетнемёрзлых пород, которые

Таблица 1. Средние значения коэффициентов корреляции сезонных и среднегодовой температуры воздуха в 14 однородных регионах на территории России, рассчитанные для периода 1970–2010 гг.

Номер региона	Сезон				
	зима	весна	лето	осень	год
1	0,85	0,79	0,62	0,79	0,83
2	0,94	0,90	0,86	0,92	0,95
3	0,97	0,95	0,95	0,97	0,97
4	0,75	0,78	0,83	0,85	0,82
5	0,89	0,87	0,77	0,91	0,89
6	0,89	0,89	0,90	0,90	0,89
7	0,85	0,80	0,74	0,80	0,82
8	0,81	0,86	0,70	0,85	0,84
9	0,72	0,83	0,71	0,79	0,81
10	0,73	0,73	0,66	0,78	0,75
11	0,58	0,73	0,60	0,70	0,77
12	0,40	0,70	0,39	0,65	0,61
13	0,66	0,73	0,54	0,68	0,73
14	0,85	0,84	0,78	0,88	0,88

выделены нами в отдельную область. Отметим, что здесь современные изменения климата заведомо неоднородны, поскольку линия пересекает разные регионы. Мы рассматриваем её как единое целое лишь для построения климатической проекции, оптимизированной для оценки влияния изменений климата на ММГ. В табл. 1 приведены значения H для 14 регионов России, рассчитанные по рядам сезонных и среднегодовой температуры воздуха. Для сопредельных стран данные не приводятся ввиду небольшого числа метеостанций с длинными непрерывными рядами наблюдений, которые необходимы для расчёта коэффициента корреляции. Можно визуально оценить однородность изменений температуры в этих регионах с помощью графиков рис. 2.

На рис. 2 показаны сглаженные 11-летним скользящим фильтром ряды аномалий среднегодовой температуры воздуха по отношению к норме 1961–1990 гг. Показателен относительно узкий диапазон, в который попадают наблюдения на отдельных станциях внутри большинства регионов (показаны на рисунке голубыми линиями), что свидетельствует об адекватности разработанного районирования поставленной задаче. Для сопоставления региональных и глобальных процессов на первой панели рисунка показаны изменения температуры воздуха всего Северного полушария. Также для сопоставимости на всех графиках, за исключением первой панели, выбран одинаковый масштаб вертикальной оси; при этом данные, выходящие за его границы, на графике не показаны (по одной станции в регионах 2 и 12). Для регионов на территории России красными кривыми показаны среднерегии-

ональные ряды; для регионов в сопредельных странах показаны лишь данные метеостанций, поскольку ряды имеют много пропусков и корректное осреднение невозможно. С целью уменьшения влияния неоднородной плотности наблюдательной сети данные российских метеостанций осреднялись с весами, пропорциональными ареалу каждой из них в рассматриваемом регионе. Под ареалом понимается территория, для всех точек которой данная станция – ближайшая. В геоинформационных системах для их вычисления используется стандартная процедура разделения территории на полигоны, известная как алгоритм Вороного–Тиссена. Разработанный нами метод весового осреднения метеоданных с учётом ареалов станций изложен в работах [1, 2]. Особенность его в том, что при расчёте среднерегionalного 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.

При анализе климата не менее важную роль, чем районирование, играет дискретизация во времени, под которой понимается определение границ климатических периодов, характеризующихся общностью статистических характеристик метеорядов. Она позволяет наилучшим образом обосновать выбор типа модели временного ряда и провести статистический анализ материалов наблюдений. Оценки показывают, что даже для простейшей модели временного ряда в виде линейного тренда выбор точки начала отсчёта и продолжительность периода сильно влияют на тренд региональной температуры, а для осадков в некоторых регионах могут изменить и его знак [2, 8].

В работе [4] сравниваются три типа моделей приземной температуры воздуха для регионов России: в виде стационарного временного ряда, линейного тренда и ступенчатых изменений. Показано, что из трёх этих моделей наилучшая для описания динамики температуры воздуха в современный период, охватывающий несколько последних десятилетий, – модель временного ряда в виде линейного тренда. В работе [2] рассмотрен вопрос о том, где провести нижнюю границу этого периода в разных регионах. Визуально её можно определить с помощью рис. 2, однако такие оценки весьма субъективны. Кроме того, в некоторых регионах трудно выделить какую-то одну точку начала современного тренда. Более объективные оценки, основанные на статистических критериях, показывают, что период современного потепления на севере Центральной и Восточной Сибири начался уже в 1960-х годах. К 1970-м годам он охватил всю Западную Сибирь и Дальний Восток, но в других регионах России потепление стало отчётливо проявляться лишь в конце 1970-х годов [2]. С учётом этого при тестировании моделей за начало современного климатического периода мы приняли 1976 г.

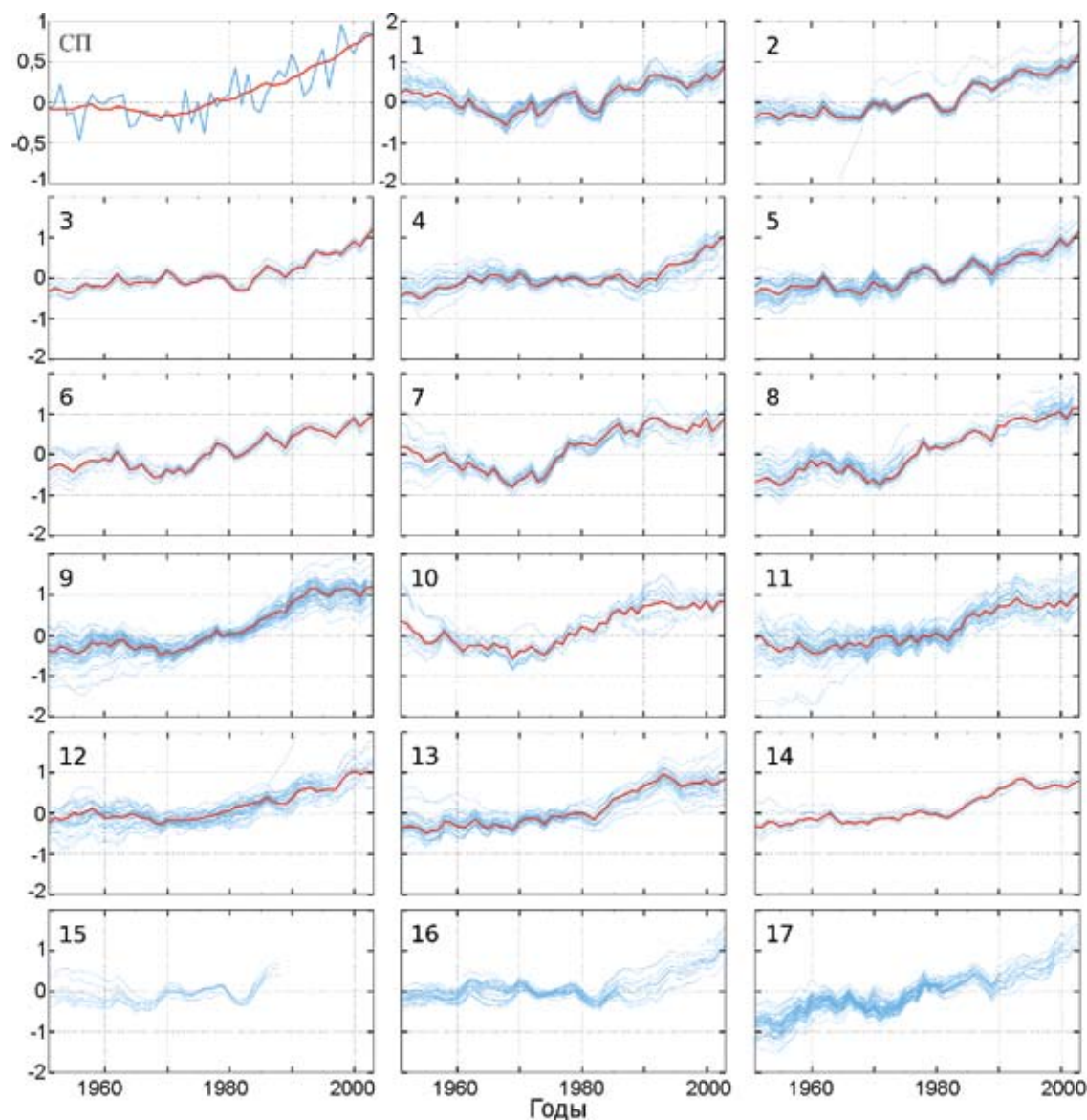


Рис. 2. Сглаженные (11-летнее скользящее осреднение) аномалии среднегодовой температуры воздуха по отношению к норме за 1961–1990 гг. для 17 регионов и всего Северного полушария (СП).

Голубые кривые показывают ряды по отдельным метеостанциям, красным обозначен среднерегionalный ряд

Fig. 2. Smoothed by 11-year running filter mean annual air temperature differences from 1961–1990 norm for 17 regions and for the Northern Hemisphere.

Blue curves correspond to individual stations; red curves indicate regional-mean data

Тестирование гидродинамических моделей в регионах России

Выполнено тестирование 36 современных гидродинамических моделей семейства СМIP5. Их описание приведено в работе [22], а данные участвующих в нём 36 моделей доступны на нескольких Интернет-порталах, например на <http://pcmdi9.llnl.gov/>. Качество моделей оценивалось по их способности воспроизводить регионально осреднённые изменения сезонной и среднегодовой температуры воздуха и суммы атмосферных осадков, а

также трёх индексов: 1) суммы температур выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – характеризует условия теплообеспеченности периода таяния; 2) суммы осадков холодного периода – характеризует снеготпасы и положительную составляющую баланса ледников; 3) сухости – равен отношению суммы температур выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ к годовому количеству осадков.

Модели используют различные пространственные сетки, в которых были определены узлы, попадающие в каждый из рассматриваемых регионов и в область распространения ММГ. Для получения

среднерегиональных характеристик модельные расчёты осреднялись по соответствующим узлам с весами, пропорциональными широте. Чтобы исключить влияние регулярной ошибки (смещения), присущей моделям, рассматривались 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. Модельные ряды региональных аномалий сравнивались с наблюдениями. Визуальным сравнением графиков оценивались общие закономерности воспроизведения рассматриваемых характеристик в разные периоды. Для количественной оценки сравнивались современные тренды, рассчитанные за период 1976–2005 гг. Выбор нижней границы рассматриваемого периода обоснован в предшествующем разделе статьи. За верхнюю границу периода сравнения принят год окончания серии исторических расчётов СМIP5, который для всех моделей был одинаков.

Полученные результаты позволили ранжировать модели в каждом регионе, исключить те из них, которые с большой погрешностью воспроизводят современные изменения рассматриваемых характеристик, а оставшиеся лучшие модели объединить в оптимизированный ансамбль. Выбор моделей для такого ансамбля зависит от того, по какой из рассматриваемых характеристик он ведётся. Несмотря на то, что нами выполнено тестирование по всему указанному ранее списку параметров, в данной статье представлены результаты оптимизации лишь по воспроизведению температуры воздуха, а более конкретно – её среднегодовой величины. Выбор именно этого критерия обусловлен двумя факторами. Как уже отмечалось, температурный индекс наиболее важен для прогноза многих криосферных процессов. Кроме того, из-за дискретности и стохастичности поля осадков их проекции сильнее различаются между собой, чем проекции температуры. Поэтому ранжирование моделей на основе воспроизведения осадков имеет меньшие физические основания.

В табл. 2 приведены разности между региональными трендами среднегодовой температуры воздуха, рассчитанными по 36 моделям и по данным наблюдений. Показаны результаты для 17 однородных районов и отдельно для области распространения ММГ, которая охватывает все регионы на азиатской территории, кроме одного – на юге Западной Сибири (регион 8), и север региона 1 на Европейской территории России. Анализ воспроизведения моделями климата всех этих областей очень важен, так как прогнозируемые изменения состояния ММГ могут вызвать разрушение элементов инфраструктуры. Это особенно актуально для районов, где при строительстве сооружений не был заложен

запас несущей способности свайных фундаментов, достаточный для компенсации её уменьшения, обусловленного повышением температуры ММГ. Информация, представленная в табл. 2, – исчерпывающая. Она позволяет провести оптимальный выбор ансамбля моделей для построения климатической проекции в отдельных регионах, в области распространения ММГ, а также в целом на всей территории России, основываясь на изложенных принципах. Ячейки без фоновой заливки соответствуют моделям, которые в данном регионе хорошо воспроизводят тренды всех температурных характеристик, т.е. среднегодовой и сезонных температур, а также суммы температур выше 0 °С. Модели, выделенные в табл. 2 серым фоном, обладают большой погрешностью воспроизведения, по крайней мере, одной из температурных характеристик, поэтому их следует исключить при формировании оптимального регионального ансамбля.

Важно понимать ограничения разработанного метода: невозможность объективного проведения границ между моделями с малой и большой погрешностью. Решение принимается на основе тех или иных назначаемых критериев. Мы использовали для отбора моделей и построения оптимальной ансамблевой проекции специальный алгоритм. В каждом регионе рассчитывалась относительная погрешность моделей, определяемая как отношение разности рассчитанного и наблюдаемого тренда к их сумме, после чего исключались модели, для которых она превышала величину 0,25. Такую проверку последовательно делали для всех перечисленных в начале раздела температурных характеристик. Оставшиеся модели объединялись в ансамбль, причём при ансамблевом осреднении все они имели равные веса независимо от погрешности. Альтернатива – осреднение с весами, обратно пропорциональными погрешностям моделей. Однако этот путь был отвергнут, исходя из соображения, что расчёт по любой модели представляет собой согласованную проекцию всех климатических параметров, которую можно рассматривать как одну из возможных траекторий развития климатической системы. Если осреднение различных траекторий с равными весами можно с оговорками считать процедурой, при которой целостность и согласованность различных переменных в суммарной проекции в какой-то степени сохраняются, то при весовом осреднении они могут быть нарушены и результат во многом утрачивает физический смысл.

На рис. 3 показаны осреднённые по регионам ряды аномалий среднегодовой температуры воздуха, рассчитанные по 36 гидродинамическим моделям за период 1900–2050 гг. Среди них: расчёты по моделям, которые успешно воспроизводят динами-

Таблица 2. Разности между региональными трендами среднегодовой температуры воздуха за период 1976–2005 гг., рассчитанными по 36 гидродинамическим моделям CMIP5 и по данным наблюдений для области распространения многолетне-мёрзлых грунтов (ММГ) и 17 регионов (1–17), °C/100 лет

Модель	ММГ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
ACCESS1.3	-1,5	-2,1	-4,1	-6,2	-3,2	-4,3	-1,2	0,4	-2,1	-3,4	-1,7	0,1	0,8	-1,8	-2,1	-11,5	1,2	1,7
ACCESS1-0	0,4	2,6	2,1	1,0	3,2	1,6	2,0	2,4	-1,8	-1,7	0,1	0,0	2,5	-1,7	-0,2	-5,7	6,8	5,6
bcc-csm1-1	4,5	7,3	3,7	2,0	2,1	2,5	4,2	8,0	0,6	-2,1	3,9	1,5	-0,6	-0,7	0,1	-5,8	7,1	4,5
bcc-csm1-1-m	-0,5	-2,4	-1,1	-0,1	0,9	-1,0	-0,8	-0,5	-1,7	-2,9	0,2	2,8	5,0	2,7	-1,0	-9,4	5,6	4,7
BNU-ESM	0,4	-4,0	-6,0	-3,8	-0,1	-3,1	-0,9	0,1	1,4	1,0	1,1	2,3	4,4	2,1	2,0	-13,7	2,0	4,0
CanCM4	-0,2	2,8	0,1	-1,8	-0,1	-0,6	0,0	2,3	-3,7	-5,2	-1,2	-0,8	-0,2	-2,1	-3,0	-10,6	3,0	2,8
CanESM2	2,1	0,7	-0,8	-3,1	-0,8	-1,8	-1,2	2,3	-0,6	-1,3	1,1	1,0	3,4	1,0	1,0	-10,2	3,8	3,6
CESM1-CAM5	-4,4	-5,1	-1,1	0,4	0,6	-1,9	-1,6	-3,6	-3,1	-2,8	-3,7	-2,3	-3,9	-3,9	-1,4	-9,7	5,6	4,3
CESM1-FASTCHEM	1,1	0,0	-0,4	-0,8	1,4	0,7	1,5	4,4	-1,1	-2,9	3,8	1,9	-1,2	-1,6	-3,2	-10,9	4,3	5,6
CMCC-CESM	-2,7	-1,0	-2,7	-1,7	0,5	-1,6	-0,9	1,2	-3,1	-4,7	-0,5	-2,8	-3,9	-5,8	-4,6	-12,7	2,8	3,7
CMCC-CM	1,4	2,3	2,3	1,0	1,2	1,7	3,0	4,1	4,3	4,0	3,3	1,0	-3,3	0,5	4,5	-4,3	6,5	8,4
CMCC-CMS	-3,6	-5,6	-1,2	-0,7	0,4	-2,1	-2,0	-2,9	-0,4	-1,2	-3,1	-2,3	-2,0	-1,8	1,0	-8,7	5,2	5,7
CNRM-CM5	4,4	5,0	2,0	1,5	1,1	2,5	3,7	7,7	3,1	1,4	6,7	4,1	6,7	2,0	1,6	-5,9	6,8	5,0
CSIRO-Mk3-6-0	0,2	-0,6	-1,7	-0,8	0,6	-2,3	-1,4	2,6	-0,4	-1,4	1,6	-0,7	-0,8	0,2	-0,5	-8,5	7,2	2,6
EC-EARTH	1,6	-1,7	-3,5	-4,2	-1,2	-3,7	-1,9	3,3	-1,0	-0,9	3,2	0,7	0,6	2,1	0,1	-10,8	4,2	3,3
FIO-ESM	-0,6	-3,6	-5,4	-6,0	-3,6	-4,4	-1,4	2,8	-0,2	-1,8	2,5	-0,1	-0,2	-2,4	-1,5	-12,5	1,1	2,9
GFDL-CM3	-3,2	-6,5	-5,7	-3,4	0,1	-0,3	1,0	-1,2	0,8	-3,2	-2,9	-3,2	4,0	-1,7	-2,8	-15,7	1,6	7,2
GFDL-ESM2G	1,7	1,6	-0,1	-1,4	1,3	1,5	3,2	4,8	0,5	-1,4	3,3	3,6	7,4	1,5	-0,8	-10,0	4,2	6,0
GFDL-ESM2M	-1,0	-5,8	-7,0	-5,0	-0,9	-6,7	-6,4	-0,6	-2,9	-0,7	0,6	-0,3	-1,8	-0,8	0,0	-13,5	3,2	3,2
GISS-E2-H	0,3	3,1	1,9	-0,1	-0,2	0,3	1,3	2,5	-3,0	-4,2	0,1	-0,2	-1,3	0,0	0,6	-6,7	4,9	2,2
GISS-E2-R	0,3	-0,7	-1,4	-2,5	-0,6	-1,3	0,0	2,2	0,5	-1,7	2,5	1,7	0,8	-0,7	-1,3	-9,7	3,9	4,2
HadCM3	1,3	3,0	1,4	0,9	0,7	1,1	1,7	2,3	-0,6	-3,0	-0,2	4,1	2,6	0,9	1,8	-8,0	4,7	4,7
HadGEM2-AO	2,0	1,3	4,9	4,9	3,0	3,5	3,4	5,3	4,5	1,4	5,8	3,4	1,1	0,6	-1,2	-4,0	10,8	7,0
HadGEM2-CC	1,5	-0,3	-4,3	-6,6	-4,7	-5,3	-1,4	3,6	-2,0	-3,0	1,1	1,0	2,3	0,7	-0,7	-13,4	-1,3	0,3
HadGEM2-ES	3,0	1,8	-0,5	-2,7	-1,3	-2,6	-0,9	2,8	0,8	0,4	2,9	3,9	3,9	2,3	0,7	-8,4	5,2	5,4
inmcm4	-3,3	-5,6	-6,1	-5,7	-3,0	-5,2	-3,3	-1,1	-4,3	-5,3	-2,6	-3,9	-4,0	-4,6	-2,7	-16,1	0,3	0,7
IPSL-CM5A-LR	-1,0	-1,6	-1,1	-2,2	0,0	-0,4	1,9	1,0	1,6	-0,1	-0,6	0,0	0,1	0,9	0,5	-11,1	3,7	5,5
MIROC4h	-2,7	-3,5	-3,1	-3,8	-2,5	-2,7	-1,2	-1,0	-0,8	-1,8	-1,1	-0,5	-0,2	-2,8	-1,8	-12,4	1,7	3,3
MIROC-ESM	-2,4	-3,3	-2,6	-2,8	0,6	-3,5	-2,6	-0,4	-2,5	-1,4	-0,6	-0,9	0,2	-0,6	-1,2	-10,2	4,8	3,9
MIROC-ESM-CHEM	0,4	0,5	-2,1	-3,4	0,5	-3,0	-1,1	2,8	-1,0	-4,2	0,2	-1,9	-1,0	-2,6	-2,0	-10,8	4,4	2,8
MPI-ESM-LR	-3,8	-8,0	-6,1	-4,7	-2,5	-4,8	-3,3	-2,7	-2,9	-4,1	-3,4	-0,9	0,0	-0,5	-0,2	-16,1	1,2	1,9
MPI-ESM-MR	-0,3	-0,3	1,3	0,9	0,6	0,2	0,9	1,8	-0,6	-2,1	0,2	0,9	2,5	-2,5	-2,2	-7,9	6,2	3,9
MPI-ESM-P	-1,1	-2,0	-1,0	0,0	0,4	-1,2	0,6	2,7	1,7	0,4	2,6	0,1	-1,3	-2,3	0,4	-9,6	5,4	4,2
MRI-CGCM3	-4,6	-5,7	-7,5	-9,5	-6,1	-8,2	-5,1	-3,6	-6,0	-5,9	-3,6	-3,0	-1,4	-4,2	-4,6	-15,3	-2,0	-1,5
NorESM1-M	0,8	2,4	2,2	-1,1	-1,3	0,7	1,6	3,0	0,9	0,3	0,7	-0,3	3,8	0,0	2,0	-7,2	5,3	4,5
NorESM1-ME	-2,9	0,7	-2,5	-3,6	-1,5	-2,7	-1,3	1,5	-2,9	-5,3	-3,8	-6,8	-3,9	-5,4	-1,4	-12,0	2,7	2,4

ку температуры в современный период; среднее по всем моделям; среднее по оптимальному ансамблю, из которого исключены модели с большой погрешностью в данном регионе. Модели исключались из оптимального ансамбля в случае, если хотя бы по одной из выбранных температурных характеристик её погрешность превышала заданный уровень. Такие модели обозначены серым цветом на рис. 3 и серой фоновой заливкой в табл. 2. Лишь в одном регионе (16) вне территории России удалось сформировать оптимальный ансамбль. В регионе 15 только одна модель удовлетворяла сформулированным критериям отбора, а в регионе 17 все модели признаны неудовлетворительными. Поэтому на соответствующих панелях рис. 3 отсутствуют красные кривые и показаны лишь результаты осреднения по всем 36 моделям.

Обсуждение результатов

Анализ результатов, представленных на рис. 2 и 3, показал, что ансамбль из всех моделей в среднем по всем регионам даёт более близкую наблюдениям оценку, чем любая отдельно взятая модель, причём наилучшее соответствие даёт оптимальный ансамбль. Главный вопрос, который возникает при анализе полученных результатов, – в какой степени оптимизация построения климатической проекции на основе предварительного тестирования и отбора моделей уменьшает неопределённость прогноза будущих последствий изменений климата. Сравнивая проекции, осреднённые по оптимальному ансамблю и по всем моделям (красные и чёрные кривые на рис. 3), можно прийти к выводу, что различия во многих регионах невелики. Это, по нашему мнению, свидетельствует о хорошей предсказуемости регио-

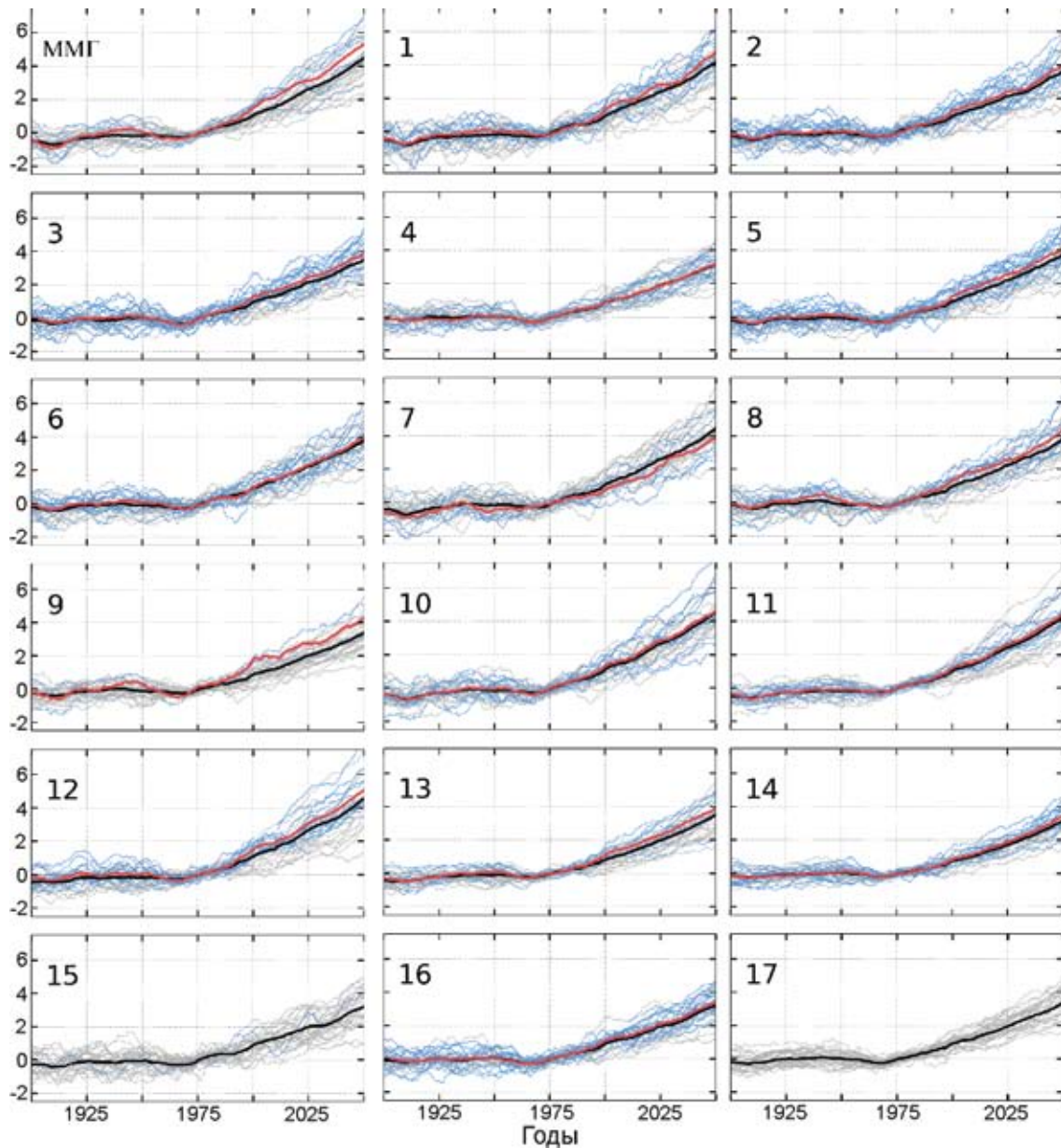


Рис. 3. Сглаженные (11-летнее скользящее осреднение) аномалии среднегодовой температуры воздуха по отношению к норме за 1961–1990 г. для 17 регионов и области сплошного распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ). Голубым показаны результаты по индивидуальным моделям, которые успешно воспроизводят динамику температуры в современный период; серым – модели, воспроизводящие современные изменения с большой погрешностью; чёрная кривая показывает среднее по всем моделям; красная – среднее по оптимальному ансамблю, из которого исключены модели с большой погрешностью в данном регионе

Fig. 3. Smoothed by 11-year running filter mean annual air temperature differences from 1961–1990 norm for 17 regions and for the continuous permafrost zone.

Blue curves indicate results from individual models that successfully replicate modern air temperature changes; grey curves indicate results from models that have large errors; black curve indicate average over all models; red curve – ensemble mean after eliminating models that have large errors

нального климата. Вместе с тем, помимо осреднённой по ансамблю, целесообразно рассматривать и проекции по отдельным составляющим ансамбль моделям, каждая из которых описывает возможную траекторию развития климатической системы.

Парадигма современной науки основана на признании важной роли как детерминистических, так и стохастических факторов в климатической системе. Главный вклад в неопределённость климатических проекций вносит стохастическая со-

ставляющая, для учёта которой и был предложен ансамблевый подход. Различия между индивидуальными моделями ансамбля представляют собой меру неопределённости климатической проекции, количественно характеризовать которую можно, например, среднеквадратичным отклонением оценок тренда температуры, полученных по разным моделям. Различия между моделями на региональном уровне, в свою очередь, могут быть обусловлены как особенностями алгоритмов и используемых граничных условий, так и принципиальными ограничениями конкретных моделей, касающимися описания ключевых региональных климатозависимых процессов. Если в первом случае различия можно считать аналогом естественной изменчивости климата или же мерой его стохастической составляющей, то во втором случае речь идёт лишь об ошибке модели, обусловленной неадекватным учётом важных региональных процессов. Предложенный в статье метод отбора моделей на основе сравнения с наблюдениями позволяет уменьшить эти ошибки путём исключения моделей с большой региональной погрешностью, что позволяет снизить общую неопределённость прогноза. Проведённый нами анализ показал, что в различных регионах это дало возможность уменьшить среднеквадратичное отклонение оценки тренда температуры от 5% (регион 5) до 30% (регион 4). Если среди отсеянных моделей в равной мере были представлены те, которые занижают и завышают наблюдаемые тренды, то средние по оптимальному ансамблю и по всем моделям различались незначительно. В противном случае возникали различия, которые прослеживаются на рис. 3 между красными и чёрными кривыми. Показательно, что, за исключением одного региона в Западной Сибири (регион 7), ансамбль всех моделей отличается от оптимального всегда в сторону занижения температуры. Таким образом, использование климатической проекции на основе оптимального ансамбля моделей может лишь усилить полученные с использованием других проекций выводы о воздействии изменения климата на криосферу.

При несомненных достоинствах разработанного метода построения ансамблевой климатической проекции, оптимизированной для конкретных регионов и задач, многие важные вопросы остаются открытыми. Так, очевидно, что единый и объективный критерий ранжирования моделей предложить невозможно. Открыт вопрос об оценке качества модели, если она достаточно хорошо воспроизводит температуру в какой-либо один сезон и заметно хуже в другой. Проблема возникает и в случае разной степени успешности воспроизведения моделью температурного режима и режима осадков.

Естественно отбирать такие модели, каждую из которых можно использовать для построения сценариев изменения обоих метеоэлементов. Сравнение с наблюдениями показало, что качество воспроизведения каждого из них может быть более низким, чем в случае, когда одна модель (или группа моделей) используется для воспроизведения температурного режима, а другая — для воспроизведения осадков. Вместе с тем прогнозирование температуры и осадков при помощи различных наборов моделей не имеет физических оснований, поскольку при этом нарушается согласованность гидротермического режима в приземном слое. Исходя из этого, а также принимая во внимание, что макромасштабные изменения осадков связаны как статистически, так и по физике процессов с температурным режимом, целесообразно основывать выбор оптимальной проекции на результатах тестирования моделей по воспроизведению современных температурных трендов. Ещё один аргумент в пользу главенствующей роли воспроизведения температурного режима при ранжировании моделей — прямая связь температуры с радиационным воздействием и физикой процессов, обуславливающих современное изменение климата, в то время как осадки изменяются опосредованно, прежде всего через интенсивность зависящего от температуры гидрологического цикла.

Специфика криосферных процессов и объектов такова, что для них важную роль играют кумулятивные изменения — суммарное количество тепла сверх многолетней нормы или же суммы осадков. С учётом стохастической природы поля осадков и их меньшей предсказуемости по сравнению с температурой можно использовать следующий упрощающий приём для построения согласованной проекции обеих характеристик. Взяв за основу оптимальную ансамблевую климатическую проекцию, построенную по рассмотренным ранее температурным критериям, статистически связать относительные сезонные изменения осадков с ростом температуры. Иными словами: в каждом регионе можно эмпирически определить по данным наблюдений или по модельным расчётам коэффициент усиления влагооборота, представляющий собой процентное увеличение осадков по отношению к многолетней норме при росте среднегодовой или сезонной температуры на 1 °С. При всей условности такого прогноза осадков он может быть использован вместе с оптимальной проекцией температуры для прогностического моделирования состояния криосферы.

Работа выполнена при поддержке немецко-русской лаборатории полярных исследований им. Отто Шмидта, проект OSL-12-02 и РФФИ, проект 11-05-12011-офи-м.

Литература

1. Анисимов О.А., Лобанов В.А., Ренева С.А. Анализ изменений температуры воздуха на территории России и эмпирический прогноз на первую четверть 21 века // Метеорология и гидрология. 2007. № 10. С. 20–30.
2. Анисимов О.А., Жильцова Е.Л., Кокорев В.А. Пространственные и временные закономерности динамики температуры воздуха на территории России в 20 – начале 21 века // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2011. Т. XXIV. С. 83–98.
3. Анисимов О.А., Жильцова Е.Л., Ренёва С.А. Оценка критических уровней воздействия изменения климата на природные экосистемы суши на территории России // Метеорология и гидрология. 2011. № 11. С. 31–41.
4. Анисимов О.А., Жильцова Е.Л. Об оценках изменений климата регионов России в XX в. и начале XXI в. по данным наблюдений // Метеорология и гидрология. 2012. № 6. С. 95–107.
5. Говоркова В.А., Катцов В.М., Мелешко В.П., Павлова Т.В., Школьник И.М. Оценка пригодности моделей общей циркуляции атмосферы и океана CMIP3 для расчетов будущих изменений климата России // Метеорология и гидрология. 2008. № 8. С. 5–20.
6. Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Аристова Л.Н., Клещенко Л.К. О неопределенности некоторых сценарных климатических прогнозов температуры воздуха и осадков на территории России // Метеорология и гидрология. 2006. № 10. С. 5–23.
7. Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Рочева Э.В. Изменение климата на территории России: температура воздуха и атмосферные осадки // Изменения климата: влияние внеземных и земных факторов. Изменение окружающей среды и климата. Природные и связанные с ними техногенные катастрофы / Под ред. Г.С. Голицина. М.: изд. ИФА РАН, 2008. С. 11–23.
8. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Оценка предстоящих изменений климата на территории Российской Федерации // Метеорология и гидрология. 2009. № 11. С. 5–29.
9. Мелешко В.П., Катцов В.М., Мирвис В.М., Говоркова В.А., Павлова Т.В. Климат России в XXI веке. Часть 1. Новые свидетельства антропогенного изменения климата и современные возможности его расчета // Метеорология и гидрология. 2008. № 6. С. 5–20.
10. Шерстюков А.Б. Корреляция температуры почвогрунтов с температурой воздуха и высотой снежного покрова на территории России // Криосфера Земли. 2008. Вып. 7. № 1. С. 79–87.
11. Шерстюков А.Б. Изменения климата и их последствия в зоне многолетней мерзлоты России. Обнинск: изд. ВНИИГМИ-МЦД, 2009. С. 127.
12. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic: SWIPA 2011, Executive Summary. Oslo: AMAP, 2011. 397 p.
13. Gardner A.S., Sharp M. Influence of the Arctic circumpolar vortex on the mass balance of Canadian high Arctic glaciers // Journ. of Climate. 2007. V. 20. № 18. P. 4586–4598.
14. Hock R., Radic V., de Woul M. Climate sensitivity of Storglaciaren, Sweden: an intercomparison of mass-balance models using ERA-40 re-analysis and regional climate model data // Annals of Glaciology. 2007. V. 46. № 1. P. 342–348.
15. Knutti R. The end of model democracy? // Climatic Change. 2010. V. 102. № 3–4. P. 395–404.
16. Koerner R.M. Mass balance of glaciers in the Queen Elizabeth Islands, Nunavut, Canada // Annals of Glaciology. 2005. V. 42. № 1. P. 417–423.
17. Meehl G.A., Covey C., McAvaney B., Latif M., Stouffer R.J. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2005. V. 86. P. 89–93.
18. Meehl G.A., Covey C., Delworth T.L., Latif M., McAvaney B., Mitchell J.F.B., Stouffer R.J., Taylor K.E. The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate change research // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2007. V. 88. doi:10.1175/BAMS-88-9-1383.
19. Oerlemans J., Bassford R.P., Chapman W., Dowdeswell J.A., Glazovsky A.F., Hagen J.O., Melvold K., de Ruyter de Wildt M., van de Wal R.S.W. Estimating the contribution of Arctic glaciers to sea-level change in the next 100 years // Annals of Glaciology. 2005. V. 42. № 1. P. 230–236.
20. Radic V., Hock R. Modeling future glacier mass balance and volume changes using ERA-40 reanalysis and climate models: A sensitivity study at Storglaciaren, Sweden // Journ. of Geophys. Research. 2006. V. 111. № F3. P. F03003.
21. Radic V., Hock R. Regionally differentiated contribution of mountain glaciers and ice caps to future sea-level rise // Nature Geosciences. Nature Publishing Group. 2011. V. 4. № 2. P. 91–94.
22. Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2012. V. 93. P. 485–498.
23. 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. Cryosphere and Hydrology, Arctic Climate Impacts Assessment. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. P. 183–242.
24. De Woul M., Hock R. Static mass-balance sensitivity of Arctic glaciers and ice caps using a degree-day approach // Annals of Glaciology. 2005. V. 42. № 1. P. 217–224.

Summary

This study is targeted at narrowing the range of uncertainties in predictive cryospheric modeling associated with climatic projections. We used the output from 36 CMIP5 GCM runs for the period 1976–2005 and calculated trends of several climatic characteristics that largely govern the state of the cryosphere, i.e. seasonal and mean annual air temperature, thawing degree-day sums, annual and winter precipitation sums. Data from 744 weather stations were used to identify and delineate 17 regions, which demonstrate coherent temperature changes in the past decades. Results from GCMs and observations were averaged over the «coherent regions» and compared with each other. Ultimately, we evaluated the skills of individual CMIP5 GCMs, ranked them in the specific context of predictive cryospheric modeling, identified top-end models in each of the 17 regions and eliminated the outliers. Selected top-end GCMs were used to compose optimal regional ensembles that were compared with the ensemble consisting of all available models. An optimal ensemble was also constructed for the area underlain by permafrost in Russia. Results indicate that the all-model ensemble in most regions underestimates the projected temperature changes compared to the optimal ensemble. Elimination of the outliers narrows the range of uncertainty in regional climate projection by 5–20%.