

Региональные проекции изменений климата в Черноморско-Каспийском регионе в конце XXI столетия

© 2015 В.В. Ефимов*, Е.М. Володин**, А.Е. Анисимов*,
В.С. Барабанов*

* Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

** Институт вычислительной математики РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 12.03.2015 г.

Рассмотрены результаты динамической регионализации данных модели общей циркуляции атмосферы и океана *INMCM4* с использованием двух моделей климата с повышенным пространственным разрешением 25×25 км. Приведены основные параметры климатических изменений в Черноморско-Каспийском регионе в конце XXI столетия в предположении интенсивной антропогенной эмиссии парниковых газов в соответствии со сценарием *RCP8.5*. Согласно моделям, изменение климата в Черноморско-Каспийском регионе характеризуется значительным повышением температуры, выраженным в летний сезон (на $\sim 5^\circ\text{C}$) и относительно более умеренным – зимой (на $2 - 3^\circ\text{C}$). В весенне-летний период в областях, соответствующих максимальному потеплению (Карпаты и Анатолийский п-ов) также значительно (более чем на 40%) снижается количество атмосферных осадков. В обеих моделях уменьшение суммарных осадков происходит в основном за счет снижения повторяемости осадков конвективного типа.

Ключевые слова: региональный климат, моделирование, Черноморско-Каспийский регион.

Введение. Глобальные модели общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) являются основным инструментом для изучения климата XX в. и его возможных изменений в будущем под воздействием естественных и антропогенных факторов. Однако пространственное разрешение глобальных моделей, несмотря на их постоянное усовершенствование, остается недостаточным для воспроизведения региональных особенностей атмосферной циркуляции, связанных с неоднородностями подстилающей поверхности. Одним из способов уточнения данных глобального моделирования с целью воспроизведения климатических изменений на региональных масштабах (десятки километров и меньше) является динамическая регионализация.

Применение региональных климатических моделей с повышенным пространственным разрешением особенно актуально для изучения климата Черноморско-Каспийского региона с его сложной конфигурацией береговой черты, неоднородностями подстилающей поверхности и высокими горами. В существующих глобальных климатических моделях Крымские горы практически не учитывались, высоты Кавказских гор не превышали 2 км, а все Черное море задавалось менее чем 10 точками расчетной области. Поэтому необходим переход от расчетов крупномасштабных глобальных полей к региональным оценкам с целью получения характеристик регионального климата

(температура, осадки, влажность, скорость ветра и др.) непосредственно с учетом влияния региональных факторов.

Региональным проекциям изменения климата посвящается все большее количество работ. Для Европейского континента наиболее известны проекты *Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining EUROPEAN Climate change risks and Effects (PRUDENCE)* [1], *Ensemble-Based Predictions of Climate Changes and Their Impacts (ENSEMBLES)* [2], *Central and Eastern Europe Climate Change Impact and Vulnerability Assessment (CECILIA)* [3], *A Coordinated Regional Downscaling EXperiment (CORDEX)* [4]. Однако, как правило, регион Черного и Каспийского морей выходил за рамки упомянутых численных расчетов.

В работах [5, 6] даны численные оценки региональных изменений климата Черноморского региона для конца XXI столетия с использованием региональной климатической модели *HadRM3P* [7] и крупномасштабной модели атмосферной циркуляции *HadAM3P* [8] с разрешением ~ 200 км. Получены пространственные распределения изменений температуры и осадков для зимнего и летнего периодов. В качестве основных результатов для региона отмечено существенное, превышающее глобальные показатели, повышение климатических значений температуры воздуха летом и несколько меньшее – зимой. Это сопровождается заметным снижением атмосферных осадков в летний сезон. В работах [9 – 11] приводятся оценки изменений климата для Кавказа и Анатолийского п-ова, однако Черноморско-Каспийский регион находился на границе пространственного домена (расчетной области) и сделать определенные выводы об изменении климата в этой области представлялось затруднительным. Результаты упомянутых работ в общем согласуются с известными опубликованными оценками изменений климата для Центральной и Юго-Восточной Европы. Согласно большинству моделей, потепление в Европейском регионе будет происходить более интенсивно, чем в среднем по Земле [12, 13]. Прогнозируется увеличение осадков зимой в Северной Европе и уменьшение летом – в Южной Европе. Об устойчивой тенденции к уменьшению летних осадков в XXI столетии в Средиземноморье, Центральной и Юго-Восточной Европе, где повышается риск летних засух, можно говорить с уверенностью, основываясь на результатах как глобальных [12 – 15], так и региональных [16 – 20] моделей. В то же время для зимнего сезона в моделях для Южной и Юго-Восточной Европы отсутствует согласованное значимое изменение количества осадков [13]. Возможные причины изменения осадков в летнее время связаны с увеличением температурных контрастов между сушей и океаном, сдвигом крупномасштабных циркуляционных систем и с обратными связями в системе атмосфера – суша [21, 22].

Данная работа посвящена построению проекций изменения климата в Черноморско-Каспийском регионе с использованием двух современных моделей региональной атмосферной циркуляции с повышенным пространственным разрешением – *RegCM4*, разработанной в Международном центре теоретической физики (г. Триест, Италия), и *HadRM3P*, разработанной Метеорологическим центром Гадлея (*Met Office Hadley Centre*, Великобритания) в рамках проекта *Providing Regional Climates for Impact Studies (PRECIS)*. В качестве входных данных использовались результаты моделирования

МОЦАО *INMCM4* Института вычислительной математики РАН – единственной разработанной в СНГ модели четвертого поколения, входящей в международный проект по сравнению совместных глобальных моделей *CMIP5* [23].

Методика. Задача состояла в пересчете данных, полученных в численных моделях атмосферной циркуляции с грубым пространственным разрешением, на пространственную сетку с более высоким разрешением при помощи численной модели, в которой учитываются мелкомасштабные особенности подстилающей поверхности, пропущенные в исходной глобальной климатической модели. Результаты глобального моделирования используются в качестве условий на боковых границах расчетного домена для региональных моделей климата.

Модель климата *INMCM4* [24, 25] состоит из двух основных блоков – моделей общей циркуляции атмосферы и общей циркуляции океана. В модели атмосферы конечно-разностным методом решаются трехмерные уравнения гидротермодинамики в приближении гидростатики. В конечно-разностной схеме выполняется закон сохранения массы, влаги и момента импульса. Пространственное разрешение в атмосферном модуле составляет $2 \times 1,5^\circ$. По вертикали задан 21 σ -уровень, шаг по времени составляет 5 мин. Модель включает схемы параметризации радиации, глубокой и мелкой конвекции, турбулентного перемешивания в пограничном слое, орографического и неорографического гравитационно-волнового сопротивления, а также процессов в почве и растительности [26].

Кроме того, модель *INMCM4* включает блок общей циркуляции в океане, важный для воспроизведения морского климата, в частности Черноморского региона. Пространственное разрешение в этой модели составляет $1 \times 0,5^\circ$ по долготе и широте и 40 уровней по вертикали. Шаг по времени 2 ч, при этом внутренний шаг для адвекции температуры и солёности, рассчитанной по явной схеме, составляет 30 мин. В объединенной модели из атмосферного блока в океанический передаются потоки тепла, пресной воды и напряжение трения, из океанического в атмосферный – температура поверхности и площадь морского льда. Коррекция потоков не используется.

Кратко отметим особенности двух региональных моделей, которые используются для регионализации данных *INMCM4*. Региональная модель климата *RegCM* версии 4 [27] является на сегодняшний день одной из современных моделей, широко используемых для воспроизведения климата во многих регионах мира. Она применялась в ряде международных проектов по изучению регионального климата, например в проекте по исследованию климата Северной Америки *North American Regional Climate Change Assessment Program (NARCCAP)* [28]. В основу региональной модели положена конечно-разностная схема решения нелинейных трехмерных уравнений термодинамики атмосферы в гидростатическом приближении. Используются явная схема с расщеплением по времени, формулировка которой не претерпела значительных изменений по сравнению с предыдущими версиями модели [29, 30], «расшатанная» по пространству сетка Аракавы типа *B* и вертикальные σ -координаты. В модели заданы 18 вертикальных σ -уровней, ее пространственное разрешение составляет 25×25 км, шаг по времени – 1 мин.

Динамическая схема региональной модели соответствует широко известной мезомасштабной модели *MM5* [31], которая активно применяется в МГИ для оперативного прогноза погоды в Черноморском регионе (<http://hydrophys.ru>).

В модели *RegCM* используется набор современных схем параметризации подсеточных физических процессов, т. е. тех, которые не разрешаются явно на модельной сетке. Для расчета некоторых процессов есть возможность выбора из нескольких альтернативных схем. Была выбрана конфигурация схем параметризации, рекомендуемая как наиболее подходящая для большинства регионов. Для параметризации турбулентного перемешивания в пограничном слое атмосферы используется модификация схемы с нелокальным замыканием [32]. Процессы кучевой конвекции и конвективных осадков рассчитываются по смешанной схеме: следуя рекомендациям разработчиков [33], была выбрана схема [34] с замыканием [35] над сушей и схема [36] – над морем. Параметризация крупномасштабной облачности и осадков выполняется по методике, предложенной в [37]. В основу схемы для облачности положен традиционный диагностический подход, когда доля ячейки, занятая облаками, рассчитывается в зависимости от относительной влажности. При расчете крупномасштабных осадков учитываются процессы аккреции и испарения дождевых капель. Для параметризации радиационных потоков в модели *RegCM4* используется адаптированная схема из глобальной модели *CCM3* [38, 39]. В качестве входных параметров берутся значения концентраций радиационно-активных газов, водяного пара и облачного покрова. Модель также включает схему параметризации процессов в верхнем слое почвы *Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS)* [40]. По этой схеме рассчитываются количество снега, температура и влагосодержание в почве.

Вторая региональная модель – *HadRM3P* [7] записывается также в гидростатическом приближении. В ней заданы 19 гибридных вертикальных уровней [41]. Для дискретизации уравнений по горизонтали используется общепринятая для атмосферных моделей (такая же, как для модели *RegCM4*) сетка типа *B* по классификации Аракавы.

Модель *HadRM3P* включает в себя 4-уровневую схему параметризации процессов в верхнем слое почвы *Met Office Surface Exchange Scheme 1 (MOSES 1)* [42]. По этой схеме рассчитываются температура и влагосодержание в почве с учетом ее типов и свойств, а также доминирующих типов растительности.

Непосредственная ассимиляция данных глобальной модели в процедуре расчета выполняется в буферной зоне (на границах расчетной области). Для обеих моделей ассимиляция происходит путем добавления в примитивные уравнения релаксационных членов. В результате значения переменных в буферной зоне аппроксимируются как линейная комбинация решения прогностических уравнений региональной модели на очередном шаге по времени и значений, полученных из крупномасштабной модели. Таким образом, данные *INMCM4* использовались в качестве граничных условий на внешней границе домена региональных моделей. Начальными условиями внутри расчетной области служили те же данные *INMCM4*, интерполированные на мелкую модельную сетку на каждом вертикальном уровне. Для задания температуры водных поверхностей использовались данные океанического блока *INMCM4*.

В процессе расчета эти данные также интерполировались с сетки с исходным разрешением $1 \times 0,5^\circ$ на более детальную сетку для моря.

Для построения проекций изменения климата использовался подход временных интервалов. Изменения климатических характеристик рассчитывались как разность значений двух периодов длительностью 30 лет каждый. Для периода будущего 2071 – 2100 гг. параметризационные схемы модели учитывают изменения концентрации парниковых газов (CO_2 , CH_4 , N_2O , O_3) и сульфатного аэрозоля согласно одному из общепринятых сценариев эмиссии парниковых газов – «неблагоприятному» сценарию *RCP8.5* [43]. Для контрольного периода 1971 – 2000 гг. концентрации задавались из наблюдений.

Статистическая значимость полученных разностных величин, представляющих собой изменения климатических переменных, осредненных за 30-летний будущий период по отношению к контрольному периоду, оценивалась с использованием стандартного *t*-теста Стьюдента, определяемого соотношением величины изменений переменных к среднеквадратическим значениям колебаний самих величин, в нашем случае – к среднемесячным значениям метеопараметров за выбранные сезоны года. Выбирался 10%-ный уровень значимости. Кроме этого, полученные величины региональных климатических изменений считались согласованными по двум региональным моделям, если для каждой из них абсолютная разность между модельным значением и средним по двум моделям не превышала 30%.

При использовании региональных моделей важным этапом является их валидация. Как правило, для этих целей проводится регионализация известных данных реанализа и оценка согласованности водного и теплового балансов [44]. Обе модели оказались пригодными для изучения изменений климата на региональных масштабах [45, 46].

Результаты. Основное внимание уделяется полям изменения приземной температуры воздуха и атмосферных осадков как наиболее важным с практической точки зрения метеорологическим переменным.

Температура воздуха. Обратимся прежде всего к особенностям крупномасштабных изменений приземной температуры воздуха в будущем климате. На рис. 1, *a*, *б* показаны пространственные распределения изменений температуры воздуха на высоте 2 м по данным исходной модели *INMCM4*. На рис. 1, *в*, *г* приведен результат расчетов для рассматриваемой области регионального моделирования – осредненные по двум моделям изменения температуры в будущем климате 2071 – 2100 гг. по сравнению с контрольным периодом 1971 – 2000 гг. для зимнего (декабрь – февраль) и летнего (июнь – август) сезонов. Статистическая значимость не показана – во всей расчетной области полученные величины изменений температуры значимы на 10%-ном уровне. На рис. 2 приведен годовой ход изменений температуры воздуха для трех подобластей регионального моделирования, отмеченных прямоугольниками на рис. 1, *в*.

Как видно из рис. 1, *a*, *б*, изменение температурного режима характеризуется значительным потеплением как в летний, так и в зимний сезон. При этом картины распределения изменений температуры на Европейском континенте для зимы и лета существенно отличаются друг от друга. В зимний сезон мак-

симальное повышение температуры происходит в центральной и северной зоне европейской части России (на $\sim 5^{\circ}\text{C}$). Как известно, такой рост температуры в северных областях в холодное время года объясняется прежде всего эффектом положительной обратной связи – снижением альбедо в условиях меньшего количества снега в высоких широтах и последующим повышением температуры [47]. В Южной Европе и на Анатолийском п-ове отмечается меньшее потепление – всего на $1,5 - 2^{\circ}\text{C}$. Летом, напротив, потепление наиболее интенсивно в районах суши Южной Европы и Средиземноморья, что подтверждает большую чувствительность этих регионов к изменениям климата [48]. Для Черноморско-Каспийского региона зимний максимум повышения температуры выражен слабо – лишь в северной части расчетной области (рис. 2, *a*) зимний экстремум сравним по величине с летним. В Карпатах и на Анатолийском п-ове, так же как и в регионах Южной Европы, наиболее интенсивное повышение температуры происходит летом (на $4 - 5^{\circ}\text{C}$).

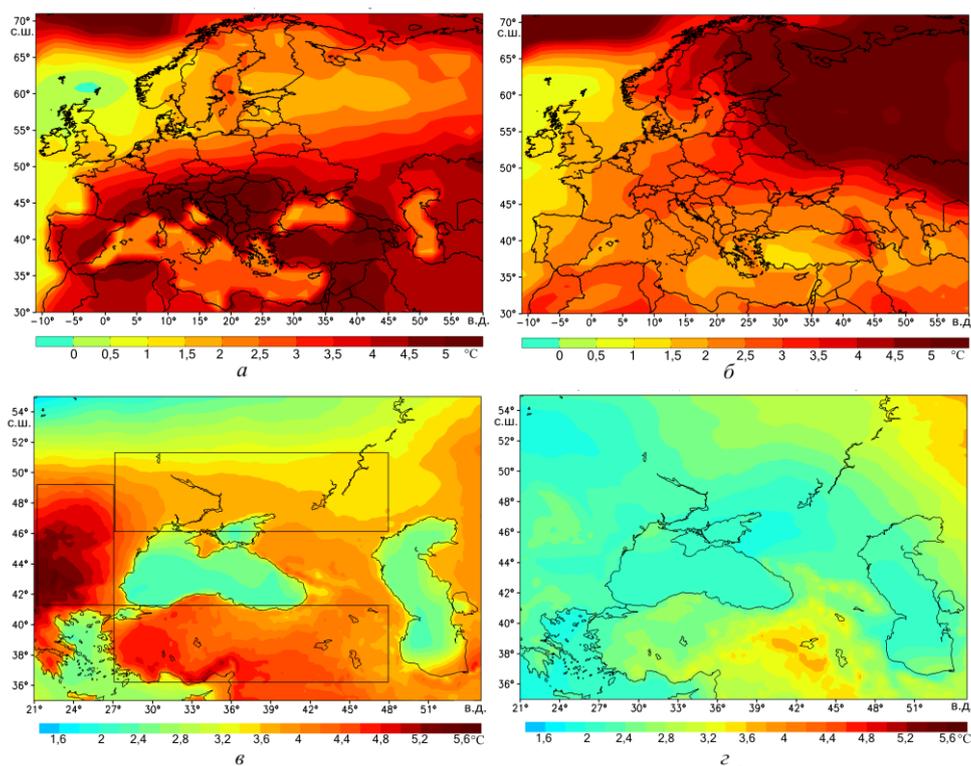


Рис. 1. Изменение приземной температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) в будущем климате 2071 – 2100 гг. по сравнению с контрольным периодом 1971 – 2000 гг. по данным модели *INMCM4* для лета (*a*) и зимы (*б*) и осредненное по двум региональным моделям для лета (*в*) и зимы (*г*)

Повышение температуры над сушей в оба сезона существенно больше, чем над морем. Этот результат демонстрирует также известную особенность климата – неравномерность потепления над сушей и морем, что, в свою очередь, приводит к целому набору сопутствующих эффектов [49, 50]. В целом полученные распределения изменений температуры хорошо согласуются с

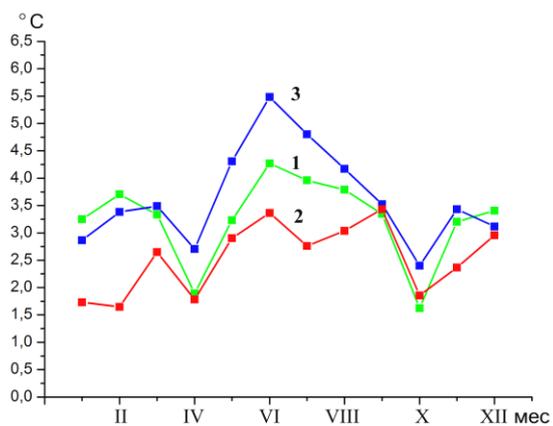
оценками по ансамблю глобальных моделей [12, 13]: модель *INMCM4* относится к числу моделей с близкой к средней по ансамблю чувствительностью к внешним возмущениям.

Представленные распределения климатических изменений для последней трети XXI столетия, полученные с использованием исходной глобальной численной модели, естественно, не описывают влияния более мелкомасштабных климатообразующих факторов. Как указывалось, повышенное пространственное разрешение в региональной модели позволяет более адекватно воспроизвести этот вклад, его определение можно считать основным ожидаемым результатом регионального моделирования. Однако нельзя ожидать от региональных моделей существенного изменения интегральных характеристик, поскольку на границах пространственного домена модель жестко привязана к входным данным. В то же время во внутренней области домена региональные модели, в которых используется подход с ассимиляцией в буферной зоне, воспроизводят собственную атмосферную циркуляцию, учитывающую влияние региональных факторов. То же самое относится и к проекциям изменений климатических характеристик: рассчитанные по региональным моделям поля изменений, в целом не противоречащие полученным по глобальным моделям, в силу повышенного разрешения дают дополнительную информацию, отсутствующую в глобальных моделях.

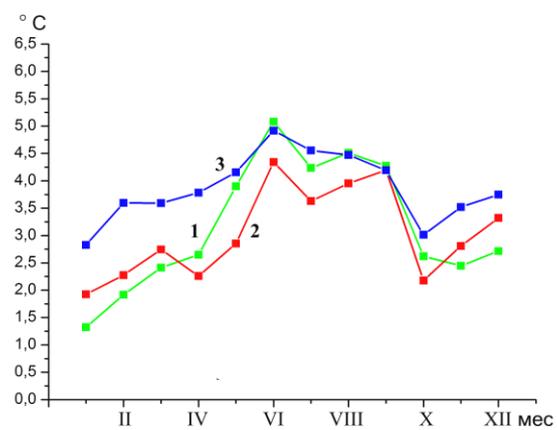
Расчетные атмосферные поля региональных моделей могут отличаться от входных крупномасштабных полей даже вдали от морских берегов и гор. Причиной этого могут быть как различия в параметризации физических процессов в глобальной и региональной моделях, так и возможность воспроизведения более мелкомасштабных движений в региональной модели по сравнению с глобальной. Например, в работе [51] указывается, что регионализация в среднем приводит к ослабленному потеплению и большему увеличению осадков (в тех регионах, в которых осадки увеличиваются) по сравнению с результатами расчетов по глобальным моделям. Сходный эффект в полях температуры воздуха наблюдается при расчете по модели *RegCM4* (рис. 2), согласно которой в Черноморско-Каспийском регионе потепление будет более умеренным. В зимний сезон температура воздуха увеличится на 2 – 3°C. Модель сохраняет максимум летнего потепления на Анатолийском п-ове и в Карпатах, в целом повторяя годовой ход изменения температуры по данным *INMCM4*. Наибольшее отклонение от входных данных при использовании *RegCM4* проявляется для территории Украины и юга европейской части России (рис. 2, *a*). Максимум летнего потепления здесь практически отсутствует – потеплеет всего на 3°C, что существенно меньше, чем по данным *INMCM4* и *HadRM3P*.

В результате регионализации по модели *HadRM3P* получено значительное потепление. Из рис. 2 видно, что при использовании этой модели для северной части домена и Карпат наблюдается выраженный летний максимум потепления (по аналогии с результатами для Южной Европы) – больший, чем по входным данным (до 5 – 6°C). Как будет видно, это сопровождается также и более выраженным снижением осадков. В горных районах Анатолийского п-ова и Кавказа, по данным *HadRM3P*, летнее потепление не столь значительно, как в других регионах, оно не превышает по величине 4 – 4,5°C, как и по данным *INMCM4*. С другой стороны, согласно *HadRM3P*, повышение тем-

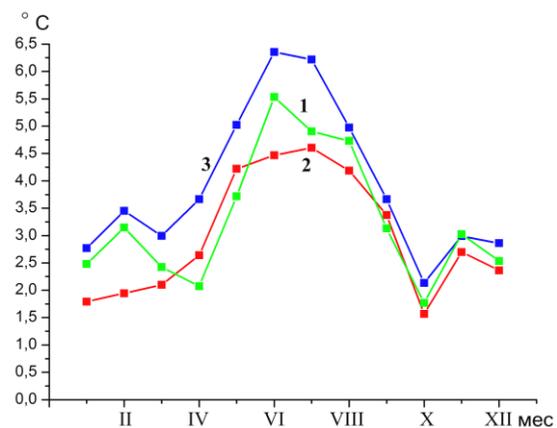
ператеры в этом регионе зимой и весной будет более интенсивным, чем по данным других моделей (на 3,5 – 4°C).



a



б



в

Рис. 2. Годовой ход изменений приземной температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) в будущем климате 2071 – 2100 гг. по сравнению с контрольным периодом 1971 – 2000 гг., осредненной для северной (а) и южной (б) подобластей и региона Карпат (в) по моделям *INMCM4* (1), *RegCM4* (2), *HadRM3P* (3)

Таким образом, согласно двум региональным моделям, Черноморско-Каспийский регион (рис. 1, б, в) характеризуется значимым потеплением в оба сезона с максимумом в летний период. Наибольшее повышение температуры летом (на $5 - 5,5^{\circ}\text{C}$) наблюдается в Карпатах и на западе Анатолийского п-ова. К северу и северо-востоку это повышение значительно ослабевает и на юге европейской части России составляет $3 - 4^{\circ}\text{C}$. Зимой повышение температуры по региону достаточно равномерное ($2 - 3^{\circ}\text{C}$). Как уже отмечалось, на протяжении всего года морские бассейны выступают в роли фактора, уменьшающего потепление на $1 - 1,5^{\circ}\text{C}$. Приведенные оценки достаточно близки к полученным в работе [5].

Регионализация по двум моделям дает несколько различающиеся оценки климатических изменений температуры. При этом, как видно из рис. 2, осредненные по подобластям модельные значения в одном случае характеризуют ослабленное, а в другом – усиленное потепление по сравнению с крупномасштабными оценками. Вероятной причиной таких расхождений являются различия в параметризации физических процессов в двух моделях.

Сходные, но еще большие отличия наблюдаются при расчете осадков. Выполнение дополнительных экспериментов по подстройке схем параметризации облачности и осадков с целью уменьшения рассогласования между моделями – вопрос, требующий отдельного рассмотрения. В нашем случае при осреднении результатов двух моделей интегральные оценки оказываются весьма близкими к входным данным. Этот факт может демонстрировать преимущества в использовании ансамбля из нескольких моделей – для воспроизведения климата и его изменений.

Осадки. Одним из наиболее трудно оцениваемых параметров при анализе модельных проекций изменения климата являются осадки. По сравнению с температурой пространственные поля изменения среднегодовых и сезонных осадков носят более сложный характер, а хорошей согласованности результатов различных моделей, к сожалению, не наблюдается. Это связано в первую очередь с тем, что атмосферные осадки – диагностический модельный параметр. Подходы к параметризации осадкообразования в моделях значительно различаются. В результате при регионализации изменчивость климатических средних и экстремальных полей осадков в значительной мере определяется выбором региональной модели, особенно в летний сезон [52, 53]. Это ведет к сильной межмодельной дисперсии оценок. Если изменения температуры в основном определяются выбором глобальной модели [14] и региональные оценки по двум моделям различаются незначительно, то поля осадков больше отличаются по величине и имеют большую пространственную неоднородность.

На рис. 3 показано пространственное распределение изменения количества осадков в будущем климате по глобальной и региональным моделям для двух сезонов. На рис. 4 показан годовой ход атмосферных осадков, осредненных для указанных выше трех подобластей, за контрольный и будущий периоды по трем моделям. В отличие от представленных выше результатов по

температуре мы приводим здесь не только значения изменений. Помимо этого, с целью более детального рассмотрения особенностей годового хода выпадения осадков были рассчитаны также их частота и интенсивность. Частота дней с осадками рассчитывалась как относительная повторяемость влажных суток. При определении влажных суток был выбран общепринятый порог в 1 мм/сут. Аналогично интенсивность рассчитывалась как среднее количество осадков во влажные сутки. Результаты расчетов изменений частоты и интенсивности осадков показаны в таблице. Данные приведены только для весны и лета, так как изменения в другие сезоны малы.

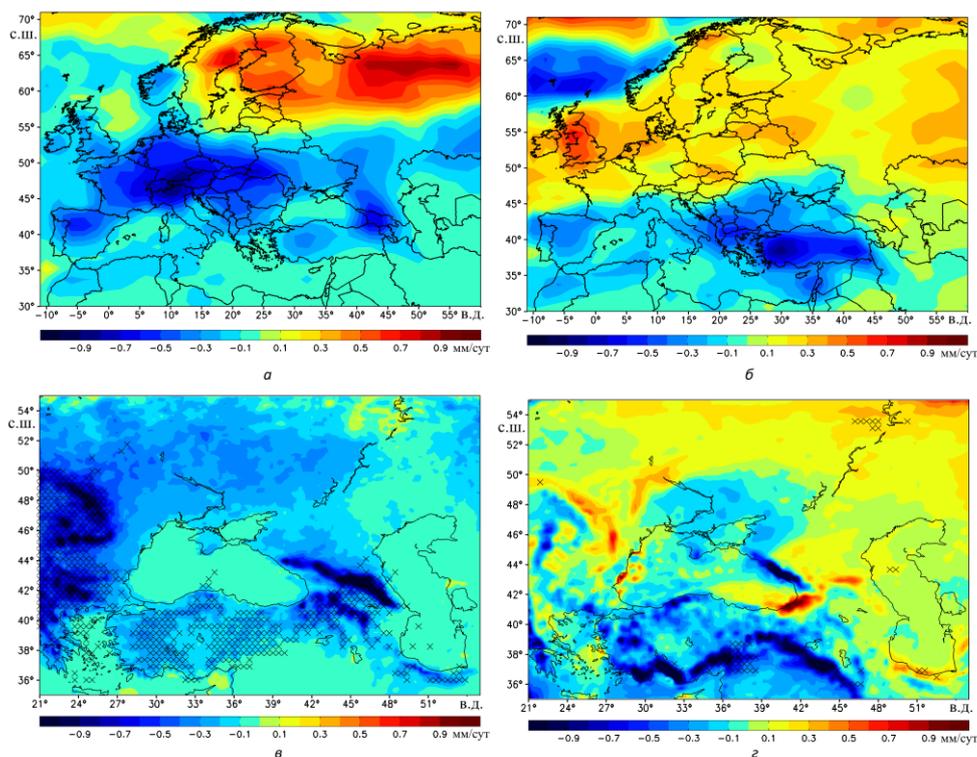


Рис. 3. Изменение количества атмосферных осадков (мм/сут) в будущем климате 2071 – 2100 гг. по сравнению с контрольным периодом 1971 – 2000 гг. по данным модели *INMCM4* для лета (*a*) и зимы (*б*) и среднее по двум региональным моделям для лета (*в*) и зимы (*г*). Точки, в которых выполняются критерии значимости, отмечены крестиками (для региональных моделей)

Сравнивая распределения изменений значений осадков по *INMCM4* (рис. 3, *a*, *б*) с мультимодельными данными [12], можно сделать вывод об их качественном соответствии. Количественно они различаются, поскольку распределения осадков в [12] приведены для другого сценария эмиссии – «умеренного» *RCP4.5*, а вместо трехмесячных сезонов использованы полугодовые. На рис. 3, *a* для летнего сезона показана хорошо выраженная зона уменьшения количества осадков в Южной и Центральной Европе. На рис. 3 изменение количества осадков приведено в мм/сут. В относительных единицах [54] область снижения количества осадков более чем на 50% займет

практически весь Средиземноморский регион. В абсолютных величинах максимальное снижение количества осадков локализовано в высокогорных районах Альп, Карпат и Кавказа. Небольшое повышение (до 30%) наблюдается в отдельных областях северной части Европы. Сравнение изменений количества осадков по глобальной модели с результатами после регионализации (рис. 3, *в, г*) наглядно демонстрирует, что разрешение *INMCM4* не позволяет составить детальную картину пространственного распределения аномалий атмосферных осадков. Использование региональных моделей дает возможность более отчетливо выявить эффекты, связанные с локальными особенностями подстилающей поверхности.

Изменение частоты (F , сут⁻¹) и интенсивности (I , мм/сут) осадков, осредненных по подобластям расчетной области, в будущем климате 2071 – 2100 гг. по сравнению с контрольным периодом 1971 – 2000 гг.

Регион	Параметр	Весна			Лето		
		<i>INMCM4</i>	<i>HadRM3P</i>	<i>RegCM4</i>	<i>INMCM4</i>	<i>HadRM3P</i>	<i>RegCM4</i>
Север	F	0,0	-0,036	-0,01	-0,054	-0,081	-0,022
	I	0,004	-0,028	0,072	-0,182	-0,426	-0,029
Юг	F	-0,074	-0,094	-0,078	-0,028	-0,041	-0,032
	I	-0,2	-0,27	0,02	-0,202	-0,492	-0,639
Карпаты	F	-0,07	-0,116	-0,115	-0,121	-0,125	-0,108
	I	-0,276	-0,282	-0,091	-0,585	-0,631	-0,807

В северной части региона (рис. 4, *а*) изменения в будущем климате наименее выражены. В этих областях, в отсутствие высоких гор и других элементов рельефа, значения осадков, по данным глобальной и региональных моделей, наиболее близки друг к другу, хотя, согласно региональным моделям, суммарное количество осадков несколько ниже. Занижение осадков по модели *HadRM3P* отмечалось и ранее [44]. В целом региональные модели реалистично воспроизводят годовой ход осадков, который соответствует континентальному климату в этой области. Количество выпадающих осадков имеет четкий годовой ход с максимумом весной и в начале лета, соответствующий активной фазе весенне-летней конвекции. К августу количество осадков снижается, его рост происходит лишь с наступлением холодов и увеличением количества крупномасштабных осадков обложного типа. В будущем климате тип годового хода сохранится, но количество осадков в весенне-летний период уменьшится. Установлено, что это снижение происходит за

счет снижения повторяемости осадков (на 0,05 – 0,10), изменения интенсивности невелики и незначимы. Зимой количество осадков остается на прежнем уровне.

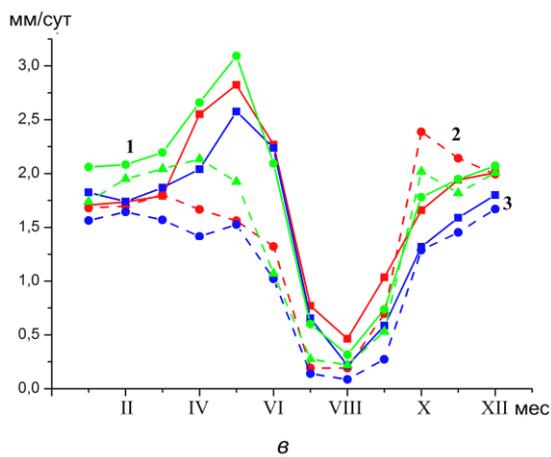
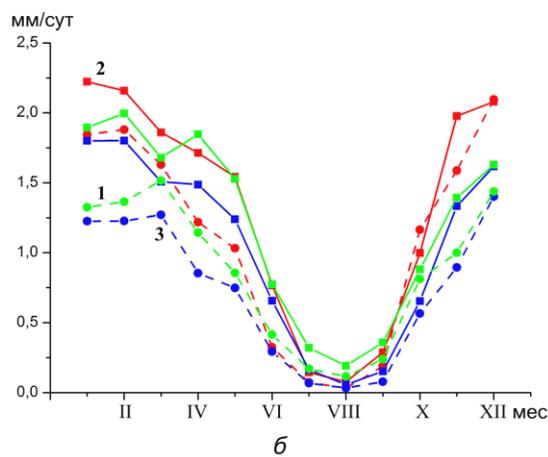
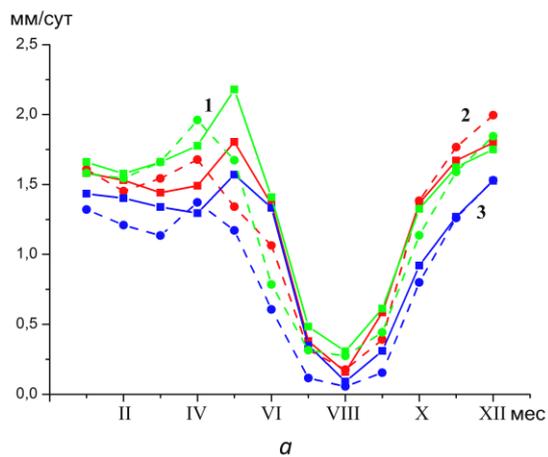


Рис. 4. Годовой ход количества атмосферных осадков (мм/сут) для контрольного периода 1971 – 2000 гг. (сплошные линии) и для будущего климата 2071 – 2100 гг. (штриховые линии), осредненных для северной (а) и южной (б) подобластей и региона Карпат (в) по моделям *INMCM4* (1), *RegCM4* (2), *HadRM3P* (3)

Как видно из рис. 3, летнее снижение количества осадков в северных областях не является статистически значимым (то же верно и для весны). Однако целесообразно отметить интересный эффект в годовом ходе осадков в будущем климате (рис. 4, а) – по сравнению с контрольным периодом максимум количества осадков смещается с мая на апрель. Это демонстрирует описанный в литературе процесс [21, 22], связанный с более ранним сходом снега в более теплом климате. В результате усиливается испарение и снижается альbedo суши, что способствует ее раннему прогреву и развитию конвективной облачности и осадков. Видно, что этот эффект реализуется во всех трех моделях (рис. 4, а).

С другой стороны, летнее снижение количества осадков в Карпатах и на Анатолийском п-ове (рис. 4, б, в) статистически значимо, согласовано по обоим региональным моделям и также воспроизводится в глобальной модели. В высокогорных районах Карпат в летнее время года количество осадков снижается более чем на 1 мм/сут, а в предгорьях и Западном Причерноморье – на 0,6 – 0,7 мм/сут в среднем по двум региональным моделям. Анализ годового хода показывает (рис. 4, в) весьма существенное снижение количества осадков в этой области в период с марта по август, и этот эффект присутствует во всех трех моделях. Годовой ход в контрольный период 1971 – 2000 гг. близок к годовому ходу в северной части расчетной области, но с более сильными осадками. А для будущего периода 2071 – 2100 гг. весенне-летний максимум в этом регионе фактически нивелируется, причем по модели *RegCM4* он становится меньше осеннего максимума. Отметим, что рост количества осенних осадков отсутствует в крупномасштабной модели. В среднем его уменьшение в этих областях летом и весной составляет более 40%. Подобный результат наблюдается и для южной части расчетной области (рис. 4, б). Годовой ход здесь отличается от вышеописанного, но изменение количества осадков сравнимо с Карпатским регионом: хотя на рис. 3, в летнее снижение осадков не столь выражено, в весенний сезон оно составляет 0,7 – 0,9 мм/сут (~ 40%).

Согласно таблице, в Карпатском регионе и на Анатолийском п-ове весеннее снижение количества осадков происходит в основном за счет уменьшения их повторяемости. Интенсивность практически не меняется – ее среднее значение в этих областях составляет 4 – 5 мм/сут. В летние месяцы роль снижения интенсивности в общем уменьшении количества осадков несколько больше, чем весной. Редкие летние осадки в будущем климате будут и менее интенсивными (на 15 – 20%), но тем не менее снижение их повторяемости более выраженное – до 50% в Карпатах и 30 – 40% — на территории Турции.

С учетом того, что в области максимального снижения количества летних осадков также происходит и наиболее интенсивное летнее потепление, этот регион можно расценивать как область наиболее заметных климатических изменений. Подобные изменения количества осадков в Юго-Восточной Европе воспроизводят и другие модели. Среди вероятных причин, как уже

отмечалось, – более ранний сход снега, приводящий к повышенному испарению в начале весны и отрицательным аномалиям запаса влаги в почве к концу весны и летом, а следовательно, – к уменьшению испарения и конвективной активности в летний период (сдвиг максимума годового хода испарения). Этот механизм работает только в том случае, если влагозапас в летний сезон уменьшится до критического значения, которое и будет ограничивать поток скрытого тепла. Побочным эффектом является изменение баланса тепла на поверхности – увеличение потока явного тепла, что приводит к увеличению температуры и усилению механизмов, описанных ниже.

Второй механизм связан с неравномерностью прогрева суши и океана. При адвекции морского воздуха на сушу и более существенном нагревании в будущем климате происходит более резкое падение относительной влажности. Оба эффекта еще более усиливаются вследствие положительной обратной связи между ними, когда ослабление весенних осадков приводит, в свою очередь, к еще большему иссушению почвы летом. Кроме того, уменьшение облачности при понижении относительной влажности приводит к увеличению потока коротковолновой радиации и дальнейшему повышению температуры.

Основным предиктором формирования осадков является относительная влажность воздуха, которая в значительной степени определяет их повторяемость и в меньшей степени – интенсивность [22]. Вышеописанные механизмы приводят к ее значительному уменьшению. Напомним, что изменения в режимах осадков в указанных нами областях в основном происходят за счет снижения их повторяемости. Относительная влажность, по данным региональных моделей, снижается в этих областях в весенние и летние месяцы более чем на 10%, что является одной из основных причин уменьшения повторяемости осадков.

Для иллюстрации еще одного, не менее важного механизма в реализации изменений климата – циркуляционного – рассмотрим изменение осадков в Черноморско-Каспийском регионе в зимний сезон. Практически во всей области изменения здесь статистически незначимы, однако выделяются несколько зон значимых изменений осадков в высокогорных областях – в районе Кавказа, Таврских гор и Армянского нагорья. Для анализа возможной причины приведем пространственные изменения ветровой циркуляции, осредненные по двум региональным моделям. Согласно рис. 5, *а*, в зимний сезон в более теплом климате ветровая циркуляция в этих областях меняется в сторону преобладания северных и северо-восточных, более холодных и сухих, ветров. Очевидно, ослабление притока более влажного и теплого воздуха с юга и юго-запада приводит к уменьшению орографических осадков в этих горных массивах. Сходный результат был получен в [9]. Этот эффект отсутствует в глобальной модели, он является результатом регионального моделирования. Летние изменения циркуляции также весьма характерны (рис. 5, *б*) – фактически во всем Черноморско-Каспийском регионе возникает дополнительная антициклоническая завихренность. Виден даже локальный антициклон

с центром над Крымским п-овом. Этот факт также является важным с точки зрения обсуждаемых выше механизмов регионального летнего потепления и уменьшения количества осадков.

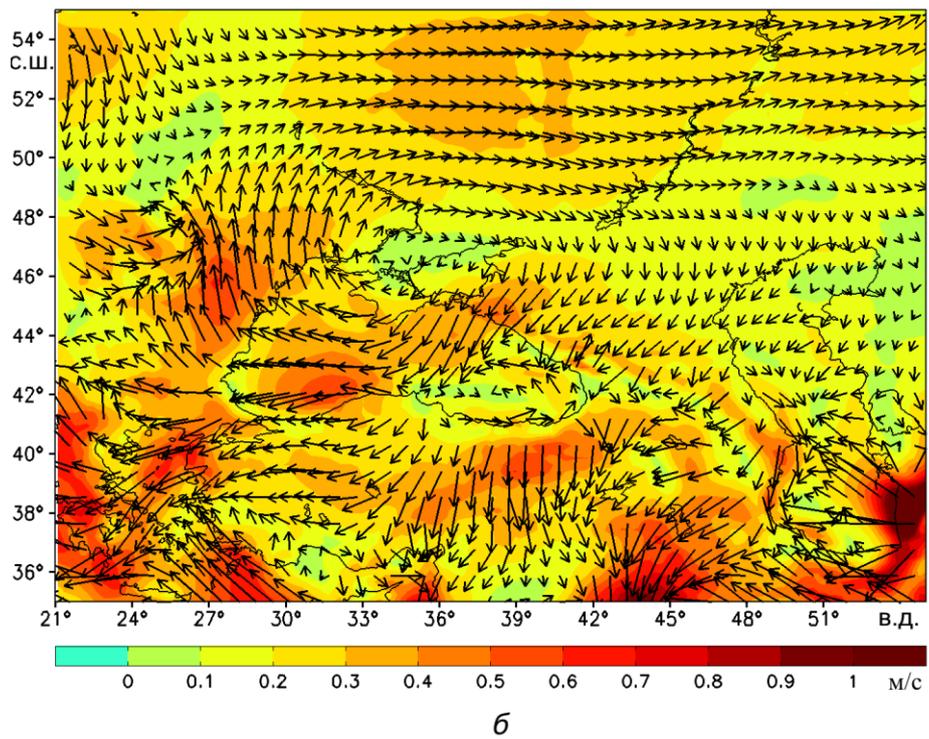
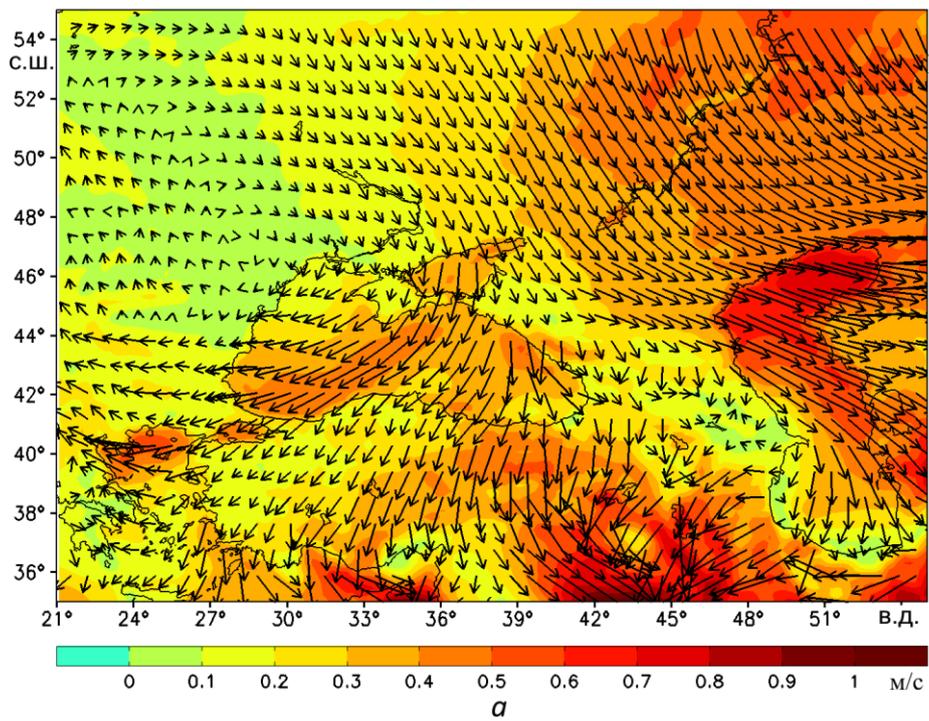


Рис. 5. Изменения скорости ветра (м/с) в будущем климате 2071 – 2100 гг. по сравнению с контрольным периодом 1971 – 2000 гг., осредненные по двум региональным моделям для зимы (а) и лета (б). Цветом показаны модули изменений скорости ветра

Заключение. В работе рассмотрены результаты динамической регионализации данных модели общей циркуляции атмосферы и океана *INMCM4* с использованием двух моделей климата – *RegCM4* и *HadRM3P*. Применение двух моделей позволило построить региональные проекции изменения климата в Черноморско-Каспийском регионе с учетом локальных особенностей рельефа и подстилающей поверхности и получить более детальные физически обоснованные оценки изменения климата на региональных масштабах.

Приведены основные параметры климатических изменений в Черноморско-Каспийском регионе в конце XXI столетия в предположении интенсивной антропогенной эмиссии парниковых газов в соответствии со сценарием *RCP8.5*. Изменение климата в регионе характеризуется значительным потеплением, более выраженным в летний сезон и относительно более умеренным зимой. Наиболее значительное летнее потепление наблюдается в области Карпатских гор и Анатолийского п-ова, увеличение температуры составляет ~ 5°C. К северу и северо-востоку это потепление значительно ослабевает и на юге европейской части России увеличение температуры составляет 3 – 4°C. Зимой потепление достаточно равномерное по региону, повышение составляет 2 – 3°C. Морские бассейны выступают в роли фактора, уменьшающего потепление в прибрежных областях (на 1 – 1,5°C). Основной особенностью изменения атмосферных осадков является значимое снижение их количества (более чем на 40%) в весенне-летний период в областях с максимальным потеплением (Карпаты и территория Турции). Естественно, эта тенденция может иметь весьма негативные экономические и гуманитарные последствия. В обеих моделях уменьшение количества осадков происходит за счет снижения повторяемости осадков конвективного типа. Среди основных причин таких изменений в будущем климате следует отметить как термодинамические явления, связанные с уменьшением относительной влажности, так и циркуляционные особенности, обусловленные усиленной антициклонической циркуляцией в регионе.

Важным результатом является хорошая согласованность полученных численных оценок с данными предыдущих исследований. Это демонстрирует перспективы дальнейшего применения региональных моделей для изучения различных аспектов климата Черноморско-Каспийского региона.

Исследование выполнено при финансовой поддержке в рамках совместного проекта РФФИ и ГФФИ Украины № Ф53/95-2013 с использованием программного обеспечения, предоставленного *Met Office Hadley Centre* (Великобритания) и Международным центром теоретической физики (Италия).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Christensen J.H., Christensen D.B.* A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century // *Clim. Change.* – 2006. – 81. – P. 7 – 30.
2. *ENSEMBLES: climate change and its impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project / Eds: P. van der Linden, J.F.B. Mitchell.* – Exeter: Met Office Hadley Centre, 2009. – 160 p.
3. *Halenka T. Cecilia* – EC FP6 Project on the Assessment of Climate Change Impacts in Central and Eastern Europe // *Global Environmental Change: Challenges to Science and Society in Southeastern Europe.* – Dordrecht: Springer, 2010. – P. 125 – 137.
4. *Jacob D., Petersen J., Eggert B.* EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research // *Reg. Env. Change.* – 2014. – 14. – P. 563 – 578.
5. *Ефимов В.В., Иванов В.А., Анисимов А.Е.* Численное моделирование изменения климата Украины в XXI веке // *Докл. НАН Украины.* – 2011. – № 3. – С. 100 – 107.
6. *Анисимов А.Е., Ефимов В.В.* Численные оценки изменения осадков в Черноморском регионе Украины в XXI столетии // *Морской гидрофизический журнал.* – 2012. – № 6. – С. 45 – 58.
7. *Jones R.G., Noguer M., Hassel D.C. et al.* Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS. – Exeter: Met Office Hadley Centre, 2004. – 40 p.
8. *Rowell D.P.* A scenario of European climate change for the late twenty-first century: seasonal means and interannual variability // *Clim. Dyn.* – 2005. – 25. – P. 837 – 849.
9. *Önol B., Semazzi H.M.F.* Regionalization of climate change simulations over the Eastern Mediterranean // *J. Climate.* – 2009. – 22. – P. 1944 – 1961.
10. *Bozkurt D., Turuncoglu U., Sen O.L. et al.* Downscaled simulations of the ECHAM5, CCSM3 and HadCM3 global models for the eastern Mediterranean–Black Sea region: evaluation of the reference period // *Clim. Dyn.* – 2012. – 39. – P. 207 – 225.
11. *Önol B., Bozkurt D., Turuncoglu U.U. et al.* Evaluation of the twenty-first century RCM simulations driven by multiple GCMs over the Eastern Mediterranean–Black Sea region // *Ibid.* – 2014. – 42. – P. 1949 – 1965.
12. *IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR5) / Eds: T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al.* – Cambridge: Cambridge University Press, 2013. – 1535 p.
13. *IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR4) / Eds: S. Solomon, D. Qin, M. Manning et al.* – Cambridge: Cambridge University Press, 2007. – 996 p.
14. *Giorgi F., Lionello P.* Climate change projections for the Mediterranean region // *Glob. Planet. Change.* – 2008. – 63. – P. 90 – 104.
15. *Sheffield J., Wood E.F.* Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations // *Clim. Dyn.* – 2008. – 31. – P. 79 – 105.
16. *Tapiador F.J.* A joint estimate of the precipitation climate signal in Europe using eight regional models and five observational datasets // *J. Clim.* – 2010. – 23. – P. 1719 – 1738.

17. *Déqué M., Somot S., Sanchez-Gomez E. et al.* The spread amongst ENSEMBLES regional scenarios: regional climate models, driving general circulation models and interannual variability // *Clim. Dyn.* – 2012. – 38. – P. 951 – 964.
18. *Kendon E.J., Rowell D.P., Jones R.G. et al.* Robustness of future changes in local precipitation extremes // *J. Clim.* – 2008. – 21. – P. 4280 – 4297.
19. *Heinrich G., Gobiet A.* The future of dry and wet spells in Europe: A comprehensive study based on the ENSEMBLES regional climate models // *Int. J. Climatol.* – 2012. – 32. – P. 1951 – 1970.
20. *Gao X., Giorgi F.* Increased aridity in the Mediterranean region under greenhouse gas forcing estimated from high resolution simulations with a regional climate model // *Glob. Planet. Change.* – 2008. – 62. – P. 195 – 209.
21. *Rowell D.P., Jones R.G.* Causes and uncertainty of future summer drying over Europe // *Clim. Dyn.* – 2006. – 27. – P. 281 – 299.
22. *Kendon E.J., Rowell D.P., Jones R.G.* Mechanisms and reliability of future projected changes in daily precipitation // *Ibid.* – 2010. – 35. – P. 489 – 509.
23. *Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A.* An overview of CMIP5 and the experiment design // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* – 2012. – 93. – P. 485 – 498.
24. *Володин Е.М., Дианский Н.А., Гусев А.В.* Воспроизведение современного климата с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана INMCM4 // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* – 2010. – 46, № 4. – С. 379 – 400.
25. *Володин Е.М., Дианский Н.А., Гусев А.В.* Воспроизведение и прогноз климатических изменений в XIX – XXI веках с помощью модели земной климатической системы ИВМ РАН // *Там же.* – 2013. – 49, № 4. – С. 347 – 366.
26. *Володин Е.М., Лыкосов В.Н.* Параметризация процессов тепло- и влагообмена в системе растительность – почва для моделирования общей циркуляции атмосферы. 1. Описание и расчеты с использованием локальных данных наблюдений // *Там же.* – 1998. – 34, № 4. – С. 453 – 465.
27. *Giorgi F., Anyah R.O.* The road towards RegCM4 // *Clim. Res.* – 2012. – 52. – P. 3 – 6.
28. *Mearns L.O., Arritt R., Biner S. et al.* The North American regional climate change assessment program: Overview of phase I results // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* – 2012. – 93. – P. 1337 – 1362.
29. *Giorgi F., Marinucci M.R., Bates G.T.* Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part I: Boundary-layer and radiative transfer processes // *Mon. Wea. Rev.* – 1993. – 121. – P. 2794 – 2813.
30. *Giorgi F., Marinucci M.R., Bates G.T. et al.* Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part II: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions // *Ibid.* – P. 2814 – 2832.
31. *Grell G.A., Dudhia J., Stauffer D.R.* A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5) // *NCAR Technical Note. NCAR/TN-398+STR.* – 1994. – 121 p.
32. *Holtstlag A., de Bruijn E., Pan H.L.* A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting // *Mon. Wea. Rev.* – 1990. – 118. – P. 1561 – 1575.
33. *Giorgi F., Coppola E., Solmon F. et al.* RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains // *Clim. Res.* – 2012. – 52. – P. 7 – 29.

34. *Grell G.A.* Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations // *J. Atmos. Sci.* – 1993. – 121. – P. 764 – 787.
35. *Arakawa A., Schubert W.H.* Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment. Part I // *Ibid.* – 1974. – 31. – P. 674 – 701.
36. *Emanuel K.A.* A scheme for representing cumulus convection in large-scale models // *Ibid.* – 1991. – 48. – P. 2313 – 2329.
37. *Pal J.S., Small E.E., Eltahir E.A.B.* Simulation of regional-scale water and energy budgets: Representation of subgrid cloud and precipitation processes within RegCM // *J. Geophys. Res. Atmos.* – 2000. – 105. – P. 29579 – 29594.
38. *Kiehl J.T., Hack J.J., Bonan G.B. et al.* Description of the NCAR Community Climate Model (CCM3) // NCAR Technical Note. NCAR/TN-420+STR. – 1996. – 152 p.
39. *Giorgi F., Mearns L.O.* Introduction to special section: Regional climate modeling revisited // *J. Geophys. Res. Atmos.* – 1999. – 104. – P. 6335 – 6352.
40. *Dickinson R.E., Kennedy P.J., Henderson-Sellers A.* Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as Coupled to the NCAR Community Climate Model // NCAR Technical Note. NCAR/TN-387+STR. – 1993. – 72 p.
41. *Simmons A.J., Burridge D.M.* An energy and angular-momentum conserving vertical finite-difference scheme and hybrid vertical coordinates // *Mon. Wea. Rev.* – 1981. – 109. – P. 758 – 766.
42. *Cox P.M., Betts R.A., Bunton C.B. et al.* The impact of new land surface physics on the GCM simulation of climate and climate sensitivity // *Clim. Dyn.* – 1999. – 15. – P. 183 – 203.
43. *Moss R.H., Edmonds J.A., Hibbard K.A. et al.* The next generation of scenarios for climate change research and assessment // *Nature*. – 2010. – 463. – P. 747 – 756.
44. *Ефимов В.В., Белокопытов В.Н., Анисимов А.Е.* Оценка составляющих водного баланса Черного моря // *Метеорология и гидрология*. – 2012. – № 12. – С. 69 – 76.
45. *Ефимов В.В., Анисимов А.Е.* Климатические характеристики изменчивости поля ветра в Черноморском регионе – численный реанализ региональной атмосферной циркуляции // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. – 2011. – 47, № 3. – С. 380 – 392.
46. *Анисимов А.Е., Яровая Д.А., Барабанов В.С.* Реанализ атмосферной циркуляции для Черноморско-Каспийского региона // *Морской гидрофизический журнал*. – 2015. – № 4. – С. 14 – 28.
47. *Qu X., Hall A.* What controls the strength of snow-albedo feedback? // *J. Clim.* – 2007. – 20. – P. 3971 – 3981.
48. *Giorgi F.* Climate change hot-spots // *Geophys. Res. Lett.* – 2006. – 33. – L08707.
49. *Sutton R.T., Dong B., Gregory J.M.* Land/sea warming ratio in response to climate change: IPCC AR4 model results and comparison with observations // *Ibid.* – 2007. – 34. – L02701.
50. *Boer G.J.* The ratio of land to ocean temperature change under global warming // *Clim. Dyn.* – 2011. – 37. – P. 2253 – 2270.
51. *Heinrich G., Gobiet A., Mendlik T.* Extended regional climate model projections for Europe until the mid-twenty first century: combining ENSEMBLES and CMIP3 // *Ibid.* – 2014. – 42. – P. 521 – 535.
52. *Frei C., Schöll R., Fukutome S. et al.* Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models // *J. Geophys. Res.* – 2006. – 111. – D06105.

53. Déqué M., Rowell D.P., Lüthi D. et al. An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections // *Clim. Change*. – 2007. – 81. – P. 53 – 70.
54. Ефимов В.В., Володин Е.М., Анисимов А.Е. Моделирование изменений климата в Черноморском регионе в XXI столетии // *Морской гидрофизический журнал*. – 2015. – № 2. – С. 3 – 14.

Regional projections of climate change for the Black Sea – Caspian Sea area in late XXI century

V.V. Efimov*, E.M. Volodin, A.E. Anisimov*, V.S. Barabanov***

**Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*

*** Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Results of dynamic downscaling the data of the atmosphere-ocean general circulation model *INMCM4* are described using two climate models with the heightened spatial resolution 25×25 km. Main parameters of climate changes in the Black Sea – Caspian Sea region in late XXI century are represented under the assumption of intense anthropogenic emission of greenhouse gases according to the *RCP8.5* scenario. In conformity with the models, the climate change in the region is characterized by significant temperature increase in summer (by $\sim 5^{\circ}\text{C}$) and relatively moderate growth in winter (by $2 - 3^{\circ}\text{C}$). In spring and summer seasons, in the regions corresponding to maximum warming (the Carpathian Mountains and the Anatolian peninsula) the amount of precipitation also decreases considerably (by more than 40%). In both models total precipitation decrease results mainly from lowering of convective precipitation frequency.

Keywords: regional climate, modeling, Black Sea and Caspian Sea region.