

Моделирование изменений климата в Черноморском регионе в XXI столетии

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

**Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*
E-mail: vefim38@mail.ru

***Институт вычислительной математики РАН, Москва, Россия*
E-mail: volodin@inm.ras.ru

Поступила в редакцию 18.09.2014 г.

Выполнены численные расчеты по составлению региональных проекций изменений климата в Черноморском регионе в конце XXI столетия. Использовались региональная численная модель климата *HadRM3P* и входные данные глобальной модели *INMCM4* общей циркуляции атмосферы и океана Института вычислительной математики РАН. Региональная модель позволила воспроизвести мезомасштабные климатические процессы и получить новые численные оценки изменений регионального климата с повышенным пространственным разрешением, которые дополняют крупномасштабные оценки новыми деталями. Рассмотрены изменения сезонных значений температуры и атмосферных осадков в 2071 – 2100 гг. по сравнению с контрольным периодом 1971 – 2000 гг. Согласно модели *INMCM4*, температура в Черноморском регионе возрастает на 2,5 – 3°C в зимний и на 4 – 4,5°C в летний сезон. Летом это потепление сопровождается снижением количества осадков до 40%. В результате регионализации для территории Украины и центра европейской части России получено еще более выраженное увеличение температуры в летний сезон – до 25 – 30%. Вклад региональной модели в летнее изменение осадков также значителен – на территории Украины и в области Балканского п-ова количество осадков уменьшается на 30% сильнее, чем по данным глобальной модели. Полученные проекции изменений климата в Черноморском регионе можно рассматривать как достаточно неблагоприятные для сельскохозяйственного комплекса.

Ключевые слова: Черноморский регион, температура, осадки, изменение климата, моделирование климата.

Введение. За последние 100 лет глобальная температура воздуха на Земле увеличилась на 0,8 – 1,0°C. На сегодняшний день считается установленным, что причиной глобального потепления является влияние антропогенных факторов, в первую очередь увеличение концентрации парниковых газов [1, 2]. В настоящее время известны численные оценки (сценарии) изменений климата Земли, полученные с помощью современных моделей глобального климата, описывающих взаимосвязанную систему атмосфера – океан – ледники – верхний слой суши и учитывающих влияние как внешних природных факторов (вулканическая активность, изменения солнечной постоянной и др.), так и антропогенного воздействия. При этом антропогенное воздействие учитывается путем задания вероятных сценариев эмиссии парниковых газов и других химических компонентов, определяющих суммарный парниковый эффект. Однако оценки предполагаемых изменений климата в XXI столетии, рассчитанные по моделям общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), в отдельных районах земного шара значительно различаются.

Существующие глобальные численные модели климата все еще имеют недостаточное пространственное разрешение (в основном более 100 км) и поэтому не учитывают влияние локальных особенностей, определяющих региональный климат, – таких, как горы, моря, свойства подстилающей поверхности и др. Это в полной мере относится к Черноморскому региону с его сложной береговой линией и наличием высоких Кавказских, Крымских и Понтийских гор. В существующих глобальных климатических моделях Крымские горы не учитывались, высоты Кавказских гор не превышали 2 км, а все Черное море задавалось менее чем 10-ю точками расчетной области. Поэтому в рамках общей проблемы изучения изменений климата важной задачей является регионализация, т. е. 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.

Методика. Среди известных методов регионализации наиболее развитым является динамический, основанный на использовании численных моделей атмосферной циркуляции с высоким пространственным разрешением и входных данных крупномасштабного глобального моделирования. Таким образом, задача состоит 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 все мелкомасштабные особенности подстилающей поверхности, отсутствующие в исходной глобальной климатической модели. Конечно, необходимым условием такого подхода является высокое качество входных данных глобального моделирования и самой численной модели региональной атмосферной циркуляции.

В последнее время появляется все большее число работ, посвященных региональным проекциям изменения климата. В частности, для Европейского континента наиболее известными проектами являются *Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining EUROPEAN Climate change risks and Effects (PRUDENCE)* [3], *Ensemble-Based Predictions of Climate Changes and Their Impacts (ENSEMBLES)* [4], *A Coordinated Regional Downscaling Experiment (CORDEX)* [5]. Однако изменение климата на территории Черноморского региона, как правило, оказывается за пределами внимания авторов. Тем не менее отметим некоторые работы, в которых представлены подобные данные. В [6, 7] приведены численные оценки региональных изменений климата Украины и Черноморского региона для конца XXI столетия с использованием региональной климатической модели *HadRM3P* [8] и данных крупномасштабной модели атмосферной циркуляции *HadAM3P* [9] с разрешением ~ 200 км. Получены пространственные распределения изменений температуры и осадков для зимнего и летнего периодов. В качестве основных результатов для территории Украины отмечено существенное повышение климатических значений температуры воздуха во все сезоны года и значительное уменьшение летних осадков. В цикле работ [10 – 12] приводятся оценки для Черноморского региона, Кавказа и Анатолийского п-ова, однако территория Украины находится на границе пространственного домена и сделать четкие выводы об изменении климата в этой области представляется затруднительным.

В данной работе приведены результаты численного моделирования изменений климата в Черноморском регионе с использованием той же модели региональной атмосферной циркуляции и новых данных крупномасштабного моделирования с применением новой модели МОЦАО – *INMCM4* Института вычислительной математики РАН [13]. Численная модель *INMCM4* является единственной разработанной в СНГ моделью четвертого поколения, входящей в международный проект по сравнению совместных глобальных моделей *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5)* [14]. Модель климата 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 атмосферная модель разбита на 21 σ -уровень с верхней границей, соответствующей 10 ГПа, шаг по времени 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 [15].

Модель *INMCM4* также включает современный блок циркуляции в океане, что особенно важно для воспроизведения морского климата, в частности Черноморского региона. Пространственное разрешение в модели океана 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 составляет 30 мин. При взаимодействии моделей из атмосферы в океан передаются потоки тепла, пресной воды и напряжение трения, из океана в атмосферу – температура поверхности и площадь морского льда. Коррекция потоков не используется.

Для построения проекций изменения климата использовался подход временных интервалов (*time-slice*). Изменения климатических характеристик рассчитывались как разность их значений в двух модельных периодах длительностью 30 лет каждый. Для периода будущего 2071 – 2100 гг. параметризационные схемы модели формулировались с учетом 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* [16]. Для контрольного периода 1971 – 2000 гг. концентрации задавались согласно наблюдениям.

Крупномасштабные изменения климата. Рассмотрим вначале крупномасштабные изменения климата Европы за 2071 – 2100 гг. по отношению к контрольному периоду 1971 – 2000 гг. Эти изменения описываются данными моделирования *INMCM4*, являющимися входными для региональной модели *HadRM3P*. При этом остановимся на двух основных климатических параметрах – осредненных за 30-летний период температуре приземного воздуха и осадках.

Температура воздуха. Изменения температуры приповерхностного слоя воздуха в 2071 – 2100 гг. и в контрольный период 1971 – 2000 гг. для двух се-

зонов года показаны на рис. 1. Они характеризуются значительным потеплением как в летний (июнь, июль, август), так и в зимний (декабрь, январь, февраль) сезоны. При этом картины распределения изменений температуры на Европейском континенте для зимы и лета существенно различаются. В зимний сезон максимальное потепление происходит в центральной и северной зонах европейской части России (до 5°C). Летом, напротив, потепление наиболее интенсивно на Балканском п-ове, Анатолийском п-ове и Ближнем Востоке. Повышение температуры над сушей существенно превышает потепление над морем в оба сезона. В целом распределения изменений температуры хорошо согласуются с оценками, полученными по ансамблю глобальных моделей [1, 2]: модель *INMCM4* относится к числу моделей с близкой к средней по ансамблю чувствительностью к внешним возмущениям. Приведенные оценки также достаточно близки к указанным в работе [6].

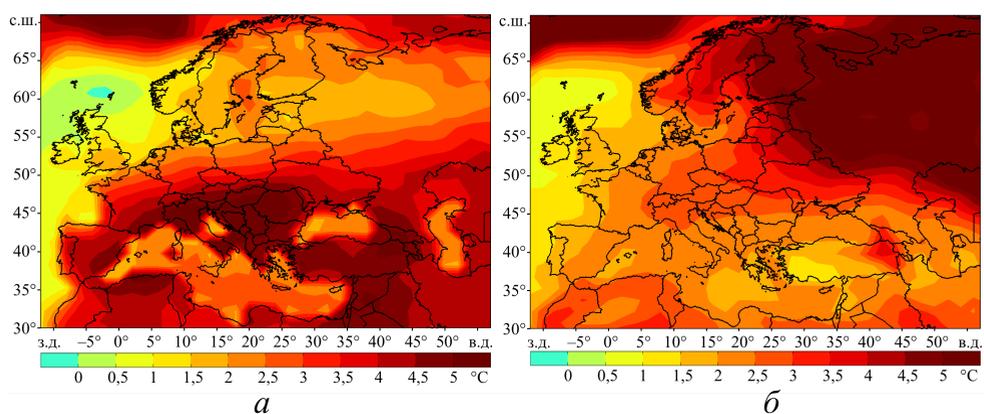


Рис. 1. Изменение приземной температуры воздуха (°C) по данным модели *INMCM4* в будущем климате 2071 – 2100 гг. по сравнению с контрольным периодом 1971 – 2000 гг. для лета (*a*) и зимы (*б*)

Осадки. На рис. 2 приведены крупномасштабные изменения величин осадков за те же периоды для летнего и зимнего сезонов. Снова, сравнивая показанные распределения с мультимодельными данными [1], можно сделать вывод об их качественном соответствии (количественно они различаются, поскольку распределения осадков в [1] приведены для другого сценария эмиссии – «умеренного» RCP4.5, а вместо трехмесячных сезонов использованы полугодовые периоды). На рис. 2, *a* в летний сезон выделяются хорошо выраженная средиземноморская зона понижения осадков (уменьшение более чем на 50%) и зона небольшого повышения – для отдельных областей материковой части Северной Европы (увеличение до ~30%). Отметим, что подобная картина изменений осадков в Европе характерна и для результатов, полученных по многим другим моделям [1, 2]. На более сухой и засушливый климат Средиземноморского региона также указывают многие авторы [17 – 20]. Для зимнего сезона (рис. 2, *б*) менее выражены как зона пониженных осадков в районе Средиземного моря, так и зона повышенных осадков в материковой части Северной Европы (повышение на ~10%).

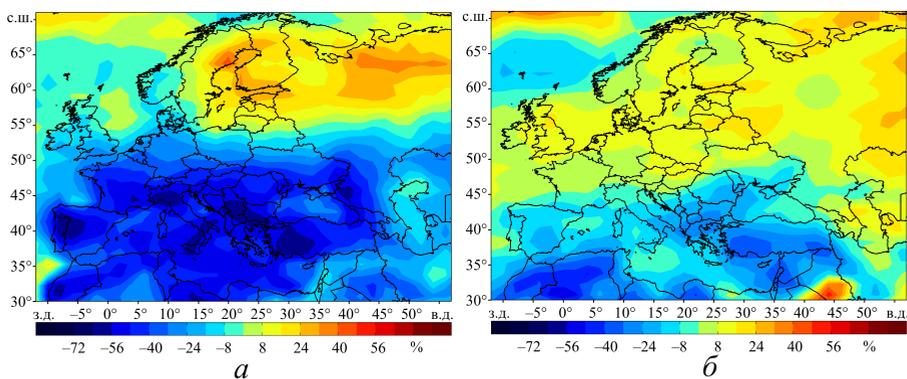


Рис. 2. Изменение количества осадков (%) по данным модели *INMCM4* в будущем климате 2071 – 2100 гг. по сравнению с контрольным периодом 1971 – 2000 гг. для лета (*а*) и зимы (*б*)

Представленные распределения климатических изменений температуры и осадков для последней трети XXI столетия, полученные с использованием глобальной численной модели, естественно, не описывают более мелко-масштабные процессы климатической изменчивости. Их можно рассматривать как фон, на котором в ходе моделирования с использованием региональной численной модели должны выделиться региональные особенности.

Региональные особенности изменения климата. Как указывалось, повышенное пространственное разрешение в региональной модели позволяет более адекватно воспроизвести влияние на атмосферные процессы гор, мелко-масштабных особенностей морских бассейнов, свойств подстилающей поверхности. Выделение их вклада можно считать основным ожидаемым результатом регионального моделирования. Хотя даже вдали от берега и гор расчетные атмосферные поля могут отличаться от входных крупномасштабных полей. Причиной этого могут быть как различия в параметризации физических процессов в глобальной и региональной моделях, так и возможность воспроизведения более мелко-масштабных движений в региональной модели с повышенным разрешением по сравнению с глобальной. Например, в работе [21] указывается, что регионализация в среднем приводит к ослабленному потеплению и большему увеличению осадков (в тех регионах, в которых осадки увеличиваются) по сравнению с результатами по глобальным моделям.

Рассмотрим последовательно результаты расчетов региональных климатических изменений, т. е. разностные поля между будущим и контрольным периодом для двух сезонов и тех же параметров – температуры и осадков. Кроме того, вычислим также климатические эффекты регионального моделирования (КЭРМ), определенные как разность полей изменений за 2071 – 2100 гг. по отношению к контрольному периоду 1971 – 2000 гг., рассчитанных по крупномасштабной модели *INMCM4* (входные данные региональной модели), и тех же полей изменений, рассчитанных по региональной модели. Определенные таким образом поля КЭРМ позволяют наглядно оценить результат использования региональной модели при расчете будущего климата

по сравнению с его оценкой по глобальной модели, т. е. явно выделить эффекты регионального моделирования климатических изменений.

Температура воздуха. На рис. 3 представлены распределения средней температуры приземного воздуха в Черноморском регионе. Летом (рис. 3, а) максимальное повышение температуры отмечается в центральной и западной частях домена. В большей части региона, кроме Крыма и южной прибрежной области, оно составляет 4,5 – 5°C. Над акваториями Черного и Каспийского морей и в прибрежных областях потепление менее выражено (в пределах 3 – 3,5°C), что объясняется влиянием водных бассейнов, которые выступают в роли стабилизирующего фактора. В районе Малой Азии и области суши западнее Черного моря (Балканский п-ов) расчеты по модели показывают наиболее интенсивное потепление, до 5,5 – 6°C.

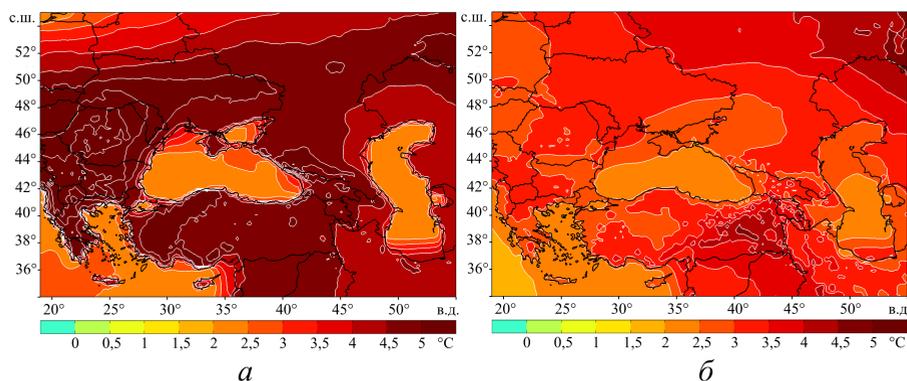


Рис. 3. Изменение приземной температуры воздуха (°C) по данным модели *HadRM3P* в будущем климате 2071 – 2100 гг. по сравнению с контрольным периодом 1971 – 2000 гг. для лета (а) и зимы (б)

Для зимнего сезона (рис. 3, б) оценки потепления более умеренные. Самое интенсивное потепление наблюдается в северо-восточной части домена, максимальное значение достигает 4°C. Над морем и в южной части домена на суше оно составляет ~2,5 – 3°C.

Таким образом, зимой величина потепления меньше, чем летом. Такая асимметрия потепления может быть объяснена эффектом положительной обратной связи между снежным покровом и температурой воздуха в климатической системе: вследствие более раннего таяния снега летом уменьшается влажность почвы, понижается ее отражательная способность (альбедо) и соответственно повышается температура воздуха. Не приводя данных, отметим лишь, что количество зимних дней с положительными температурами воздуха увеличивается.

На рис. 4 показаны особенности распределения полей КЭРМ, т. е. эффектов, выделяемых в результате использования региональной модели. Видно, что появился ряд мелкомасштабных особенностей, отсутствующих на рис. 1, 2. Летом почти всю северную часть пространственного домена и Балканский п-ов занимает область повышенных значений температуры – до 1,4°C. Использование модели для прибрежных областей Черного и Каспийского мо-

рей, напротив, приводит к ослабленному сигналу повышения температуры. Использование региональной модели для зимнего сезона дает существенно иные результаты. Для горных районов Турции и Закавказья наибольшие значения КЭРМ получены в полях температуры – до 2°C, т. е. до 40% от суммарного потепления в этом районе. Положительные аномалии выделились также на Северном Кавказе и Балканах – их значения составляют здесь ~1°C. В обширных зонах северной части расчетной области значения КЭРМ, напротив, отрицательны, в отдельных областях похолодание доходит до –1,4°C.

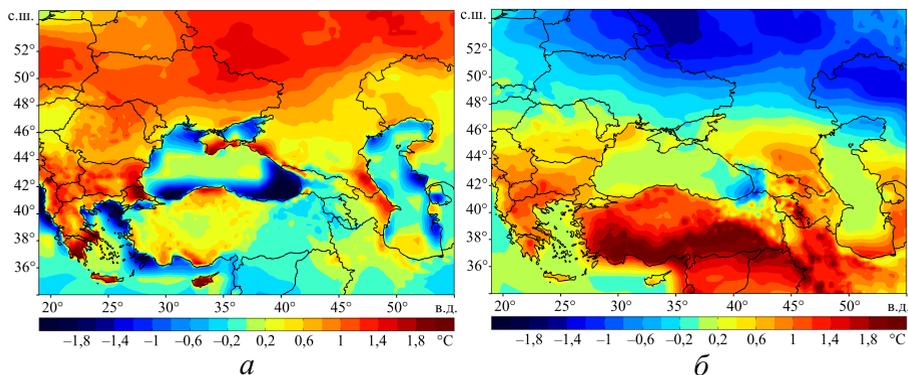


Рис. 4. Разность изменений приземной температуры воздуха (°C) в будущем климате 2071 – 2100 гг. по сравнению с контрольным периодом 1971 – 2000 гг. по данным моделей *HadRM3P* и *INMCM4* для лета (*а*) и зимы (*б*)

Причины такого типа эффектов регионального моделирования связаны с особенностями параметризации физических процессов в модели *HadRM3P*, отличными от *INMCM4*. Не приводя иллюстраций, отметим, что одним из важных индикаторов изменений полей осадков и – в меньшей степени – температуры воздуха являются особенности воспроизведенной по модели облачности. В то же время облачность – не единственная причина возникновения КЭРМ, т. к. различия в воспроизведении климатических эффектов и физических механизмов обратных связей в глобальной и региональной моделях, очевидно, весьма существенны. Их изучение требует отдельного анализа и дополнительных расчетов по чувствительности.

Осадки. На рис. 5 показаны сезонные изменения количества осадков, полученные по данным регионального моделирования. В отличие от температуры изменение режима осадков в годовом цикле носит более сложный характер. Летом (рис. 5, *а*) количество осадков практически во всей области пространственного домена значительно уменьшается, т. е. лето становится гораздо более засушливым: количество осадков снижается на 50 – 60%, что больше, чем по данным *INMCM4*.

Зимой (рис. 5, *б*) значительное уменьшение осадков отмечается лишь для Анатолийского п-ова и прилегающих районов Средиземного моря. В остальных частях рассматриваемого региона изменение осадков относительно менее выражено. Выделяются несколько мелкомасштабных областей, связанных с неоднородностями рельефа или очертаниями берега. Максимальное

усиление осадков (до 25%) наблюдается в районе акватории Каспийского моря. В целом можно отметить близкое относительное изменение осадков в зимний период по данным региональной модели и модели *INMCM4*.

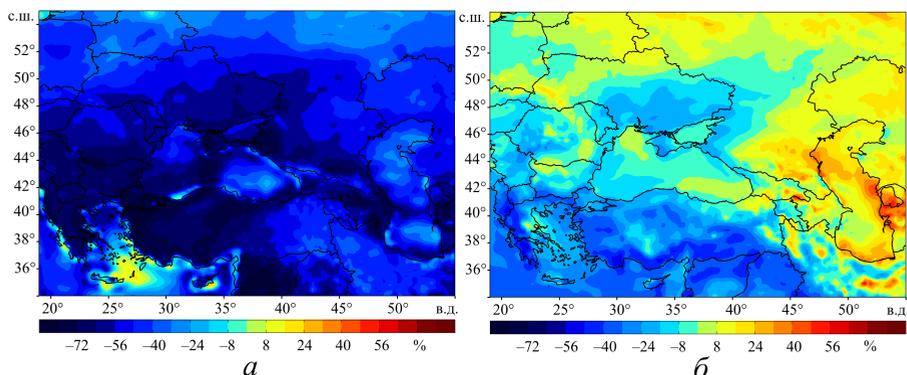


Рис. 5. Изменение количества осадков (%) по данным модели *HadRM3P* в будущем климате 2071 – 2100 гг. по сравнению с контрольным периодом 1971 – 2000 гг. для лета (*a*) и зимы (*б*)

На рис. 6 представлены сезонные значения КЭРМ для проекций изменения количества атмосферных осадков. В данном случае поля КЭРМ рассчитывались как абсолютные значения разности изменений количества осадков по региональной и глобальной моделям. Значения КЭРМ для осадков в летний период (рис. 6, *a*) по абсолютной величине в целом меньше, чем в зимний. Использование региональной модели для территорий Украины, Крыма и Балкан приводит к дополнительному снижению количества осадков, до $10 \text{ мм} \cdot \text{мес}^{-1}$, – это составляет 30 – 40% от уменьшения осадков по данным *INMCM4*. В остальной части пространственного домена выделяются несколько локальных максимумов КЭРМ, но в целом их значения невелики. Интересно отметить, что, несмотря на небольшие абсолютные значения КЭРМ, относительные изменения осадков по данным *HadRM3P* существенно больше, чем по данным глобального моделирования, – даже там, где значения КЭРМ положительные (рис. 5, *a*). Не приводя данных, укажем, что это объясняется некоторым занижением количества осадков региональной моделью как в контрольный, так и в будущий период. Таким образом, даже небольшие по абсолютной величине изменения осадков вносят существенный вклад по сравнению с контрольным периодом.

В зимние месяцы (рис. 6, *б*) значения КЭРМ более неоднородны, но тем не менее существенны по сравнению с сигналом глобальной модели. В северных областях пространственного домена в региональной модели происходит небольшое дополнительное уменьшение осадков. На материковой части Анатолийского п-ова и в Западном Причерноморье, напротив, осадки уменьшаются менее выражено. Это видно также и на рис. 5, *б* – в некоторых из указанных областей уменьшение осадков в региональной модели практически нивелируется. Максимальные значения КЭРМ выделяются в горных районах – там, где высокое разрешение региональной модели позволяет учесть локальные особенности орографии. Таким образом, в изменение осадков и ле-

том, и зимой вносят вклад как крупномасштабные, так и региональные атмосферные процессы. Значения КЭРМ в оба сезона имеют существенную пространственную неоднородность, которая проявляется в заметном влиянии мезомасштабных процессов.

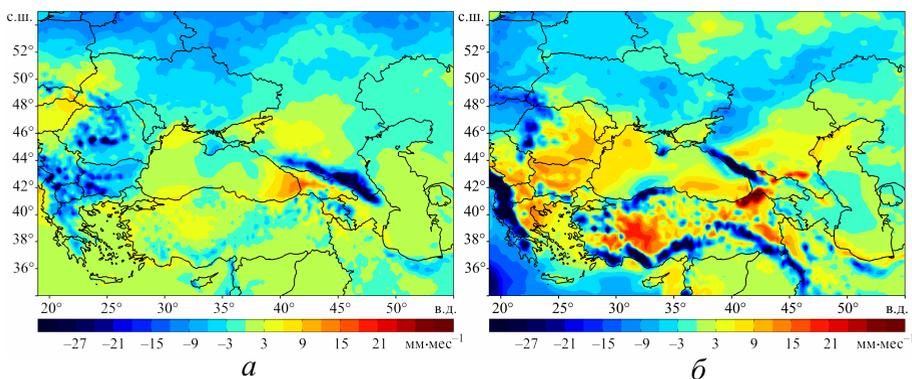


Рис. 6. Разность изменений количества осадков ($\text{мм}\cdot\text{мес}^{-1}$) в будущем климате 2071 – 2100 гг. по сравнению с контрольным периодом 1971 – 2000 гг. по данным моделей *HadRM3P* и *INMCM4* для лета (а) и зимы (б)

Были рассмотрены лишь два основных климатических параметра – температура воздуха и осадки, которые представляют наибольший интерес. В работе приведены лишь общие оценки полученных результатов. Детальный анализ всех региональных особенностей изменения температуры и осадков требует отдельного рассмотрения. В ходе численных экспериментов получены оценки изменения к концу XXI в. и других климатических характеристик, таких, как давление, ветер, влажность, облачность, тепловые и радиационные потоки и др. Изменения некоторых из них для Украины в XX столетии приведены в работе [22]. Сравнение изменений, рассчитанных для XX столетия и конца XXI в., показывает, что будущие климатические изменения в целом по характеру соответствуют климатическим сдвигам, произошедшим во второй половине XX в., но по величине в несколько раз превосходят их. Так, например, за вторую половину XX столетия средняя зимняя температура в Украине повысилась на $1 - 1,5^\circ\text{C}$, что в 2 – 3 раза меньше полученных нами численных оценок будущих изменений. Особенно неблагоприятным является, безусловно, значительное уменьшение среднесезонных летних осадков, составляющее для последней трети XXI столетия $\sim 50\%$, одновременно с повышением температуры воздуха на $5 - 6^\circ\text{C}$.

Результаты наших численных региональных экспериментов в общем согласуются с известными опубликованными данными регионального моделирования климата для Центральной и Западной Европы. Согласно большинству моделей, тенденция потепления климата в конце XX в. продолжится и в XXI столетии, причем в Европейском регионе более интенсивно, чем в среднем по Земле [1, 2]. Как уже отмечалось, модели согласуются в тенденции увеличения осадков в зимний сезон в Северной Европе и их уменьшения в летний сезон в Южной Европе. Возможные причины такого

различия связаны с увеличением температурных контрастов между сушей и океаном, сдвигом крупномасштабных циркуляционных систем, обратными связями в системе атмосфера – суша [23, 24]. Однако обычно регион Черного моря выходил за рамки известных численных расчетов. Особенность наших экспериментов заключается в том, что были выполнены численные расчеты сценариев изменений климата и получены количественные оценки непосредственно для Черноморского бассейна.

Заключение. Получены численные оценки изменений климата в Черноморском регионе для конца XXI столетия с использованием региональной модели климата *HadRM3P* и входных данных глобальной модели общей циркуляции атмосферы и океана *INMCM4* Института вычислительной математики РАН. Региональная модель позволила воспроизвести атмосферную циркуляцию в Черноморском регионе с повышенным пространственным разрешением и получить региональные проекции изменений климата. Новые численные оценки этих изменений учитывают мезомасштабные процессы в Черноморском регионе, внося таким образом свой вклад в крупномасштабные поля, полученные по данным модели *INMCM4*.

Так, согласно модели *INMCM4* и сценарию *RCP8.5*, изменение температурного режима в конце XXI столетия в Черноморском регионе характеризуется значительным потеплением: на 2,5 – 3°C зимой и на 4 – 4,5°C летом. В летний сезон количество осадков существенно уменьшается во всей Южной Европе и Черноморском регионе (до 50%) и увеличивается в Северной Европе (до 30%). В зимний сезон изменение осадков менее выражено. В свою очередь, региональная модель вносит значительные изменения в эти поля. Прежде всего, благодаря учету мезомасштабной циркуляции и взаимодействию с особенностями подстилающей поверхности региональное моделирование позволило получить более детальные проекции изменений климата в областях со сложным рельефом и береговой чертой, с выделением эффектов, которые отсутствуют во входных данных. В результате для лета получено существенно большее потепление в области Балкан, на территории Украины и в центре европейской части России, где аномалии составили до 1,4°C, т. е. ~ 25 – 30% от суммарного потепления в этом районе; для зимы, напротив, согласно региональной модели, характерно меньшее потепление в северных областях расчетной области и более усиленное (до 2°C) – на Анатолийском п-ове. Проекция изменения осадков также меняется: летом осадки в отдельных регионах в результате использования региональной модели уменьшаются в гораздо большей степени (до 30%), чем по данным глобальной модели; в зимний сезон в полях изменения атмосферных осадков наблюдаются в основном неоднородные региональные аномалии. Полученные проекции изменений климата в Черноморском регионе можно рассматривать как достаточно неблагоприятные для сельскохозяйственного комплекса.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. S. Solomon, D. Qin, M. Manning et al. – Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge Univ. Press, 2007. – 996 p.*
2. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5) / Eds. T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al. – Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge Univ. Press, 2013. – 1535 p.*
3. *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, № 1. – P. 7 – 30.*
4. *ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project / Eds. P. van der Linden, J.F.B. Mitchell. – UK, Exeter: Met Office Hadley Centre, 2009. – 160 p.*
5. *Jacob D., Petersen J., Eggert B. EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research // Reg. Env. Change. – 2014. – 14, № 2. – P. 563 – 578.*
6. *Ефимов В.В., Иванов В.А., Анисимов А.Е. Численное моделирование изменения климата Украины в XXI веке // Доп. НАН України. – 2011. – № 3. – С. 100 – 107.*
7. *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.*
8. *Jones R.G., Noguer M., Hassel D.C. et al. Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS. – UK, Exeter: Met Office Hadley Centre, 2004. – 40 p.*
9. *Rowell D.P. A scenario of European climate change for the late twenty-first century: seasonal means and interannual variability // Clim. Dyn. – 2005. – 25, № 7 – 8. – P. 837 – 849.*
10. *Önol B., H.M. Semazzi F. Regionalization of climate change simulations over the Eastern Mediterranean // J. Clim. – 2009. – 22, № 8. – P. 1944 – 1961.*
11. *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, № 1 – 2. – P. 207 – 225.*
12. *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, № 7 – 8. – P. 1949 – 1965.*
13. *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. – 1998. – 46, № 4. – С. 379 – 400.*
14. *Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A. An overview of CMIP5 and the experiment design // Bull. Amer. Met. Soc. – 2012. – 93, № 4. – P. 485 – 498.*
15. *Володин Е.М., Лыков 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 // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 1998. – 34, № 4. – С. 453 – 465.*
16. *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, № 7282. – P. 747 – 756.*
17. *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, № 3. – P. 195 – 209.*
18. *Giorgi F. Climate change hot-spots // Geophys. Res. Lett. – 2006. – 33, № 8. – L08707. – doi:10.1029/2006GL025734.*

19. *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, № 1. – P. 79 – 105.
20. *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, № 13. – P. 1951 – 1970.
21. *Heinrich G., Gobiet A., Mendlik T.* Extended regional climate model projections for Europe until the mid-twenty first century: combining ENSEMBLES and CMIP3 // *Clim. Dyn.* – 2014. – 42, № 1 – 2. – P. 521 – 535.
22. *Ефимов В.В., Губанова Е.В.* Изменение климата Украины в XX веке. – Севастополь, 2003. – 42 с. (Препринт / НАН Украины. МГИ).
23. *Rowell D.P., Jones R.G.* Causes and uncertainty of future summer drying over Europe // *Clim. Dyn.* – 2006. – 27, № 2 – 3. – P. 281 – 299.
24. *Kendon E.J., Rowell D.P., Jones R.G.* Mechanisms and reliability of future projected changes in daily precipitation // *Ibid.* – 2010. – 35, № 2 – 3. – P. 489 – 509.

Modeling of the Black Sea area climate changes in the XXI century

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

**Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
e-mail:vefim38@mail.ru*

***Institute of Computational Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
e-mail:volodin@inm.ras.ru*

Numerical experiments on producing regional projections of climate changes in the Black Sea region in the end of the XXI century are performed. The regional numerical climate model *HadRM3P* and input data of the atmosphere-ocean general circulation global model *INMCM4* (Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences) are used. Application of the regional model permits to reproduce mesoscale climate processes and to obtain new numerical estimates of regional climate changes with high spatial resolution which supplement large-scale assessments with new values. Changes of temperature and precipitation seasonal values in the future 2071 – 2100 period are compared with those of the control period in 1971 – 2000. According to the *INMCM4* model, temperature in the Black Sea region will increase by 2.5 – 3°C in winter and 4 – 4.5°C in summer. In summer it will be accompanied by precipitation decrease up to 40%. For the territory of Ukraine and the central European part of Russia, the regional model produces more pronounced temperature growth in summer: up to 25 – 30%. The regional model forecast of summer precipitation changes in Ukraine and in the Balkan Peninsula is 30% lower than the analogous forecast of the global model. The obtained projections of climate changes in the Black Sea region can be considered as quite unfavorable for the agricultural sector.

Keywords: Black Sea region, temperature, precipitation, climate change, climate modeling.