



УДК 551.58.001.572(477)

© 2011

В. В. Ефимов, академик НАН Украины **В. А. Иванов**, **А. Е. Анисимов**

Численное моделирование изменения климата Украины в XXI веке

Розглянуто математичні експерименти з оцінки регіональних проєкцій клімату України та Чорноморського басейну наприкінці XXI ст. з урахуванням антропогенного забруднення атмосфери й з використанням кліматичної моделі HadRM3P. Зміни кліматичних характеристик розраховували як різницю між контрольним періодом 1961–1990 рр. й періодом 2071–2100 рр. за сценарієм емісії парникових газів B2. Отримано оцінки зміни кліматичних параметрів України, що перевищують глобально усереднені величини. Відзначено тенденцію значного підвищення кліматичних значень температури повітря в літній період року, що супроводжується зменшенням опадів.

За последние 100 лет глобальная температура воздуха на Земле увеличилась на 0,7–0,8°. Установлено, что причиной глобального потепления является влияние антропогенных факторов, в первую очередь, увеличение концентрации парниковых газов [1].

В то же время и произошедшие изменения, и прогнозные оценки предполагаемых изменений климата в XXI веке в отдельных районах земного шара существенно различаются. Эти различия связаны с региональными особенностями, такими как горы, моря, свойства подстилающей поверхности и др. В настоящее время известны численные оценки (сценарии) глобальных изменений климата Земли, полученные с помощью современных моделей глобального климата, описывающих взаимосвязанную систему атмосферы, океана и верхнего слоя суши, которые учитывают влияние как внешних природных факторов (вулканическую активность, изменения солнечной постоянной и др.), так и антропогенное воздействие. При этом последнее задается через вероятные сценарии эмиссии парниковых газов и других химических компонентов, определяющих суммарный парниковый эффект.

Однако существующие глобальные численные модели климата все еще имеют недостаточное пространственное разрешение (в основном более 200–300 км) и поэтому не учитывают влияние локальных особенностей, определяющих региональный климат. 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, по существу, не учитывались) высоты Кавказских гор не пре-

вышали 2 км, а все Черное море задавалось менее чем 10 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 (температуры, осадков, влажности, скорости ветра и др.), учитывая при этом влияние региональных факторов.

Описание модели. Настоящая работа выполнена в рамках кооперации с Метеорологическим центром Гадлея (Англия) по проекту PRECIS (Providing Regional Climate for Impact Studies). Цель проекта — расчет климата в заданных регионах земного шара с использованием региональной численной климатической модели HadRM3P и глобальной климатической модели HadAM3P. Численная модель регионального климата является адаптацией современных моделей прогноза погоды для решения климатических задач, т. е. обеспечивающей возможность проведения численных расчетов развития атмосферных процессов на большие интервалы времени (порядка 100 лет). Это достигается за счет некоторого упрощения параметризации физических механизмов, учитываемых в моделях прогноза погоды. В то же время и модель HadRM3P, и крупномасштабная климатическая модель HadAM3P являются одной из наиболее развитых известных современных климатических моделей, позволяющих рассчитывать процессы в атмосфере и в поверхностном слое почвы в заданном ограниченном регионе земного шара. Численно вычисляются динамика атмосферы, некоторые химические процессы, облачность, осадки, процессы радиационного обмена в атмосфере, характеристики поверхности и приповерхностные процессы в почве. Модель предполагает задание поверхностных и краевых граничных условий.

Поверхностные условия — это условия в верхнем слое почвы и на границе раздела вода — атмосфера, где задается пространственно-временное распределение температуры моря и площади ледового покрова. Краевые условия — это заданные динамические параметры атмосферы на краях расчетной области (численного домена). К ним относятся такие параметры, как давление, компоненты горизонтальной скорости ветра, температура и влажность на стандартных уровнях. Эти боковые краевые условия обновляются каждые шесть часов, поверхностные условия — каждые сутки.

Рассмотрим основные структурные особенности региональной численной модели [2].

По существу, в модели рассчитывается адвекция во внутреннем домене метеорологических характеристик, заданных на краях области. Причем адвекция постоянно уточняется параметризацией физических процессов: облачности, осадков, радиации, обмена теплом, влагой и количеством движения через поверхность и других. Сама атмосферная численная модель — это гидростатическое приближение полных уравнений термогидродинамики, в которой атмосфера предполагается находящейся в состоянии гидростатического равновесия, а вертикальные движения рассчитываются отдельно из уравнения неразрывности. В модели используется регулярная широтно-долготная сетка с горизонтальным разрешением $\sim 0,22 \times 0,22^\circ$ и гибридные вертикальные координаты с 19 уровнями, нижний из которых расположен на высоте 50 м, а верхний — на уровне давления 0,5 ГПа.

Параметризация облаков и осадков в модели позволяет описать крупномасштабные облака, осадки и конвекцию.

Параметризация радиационных потоков энергии в атмосфере включает суточный и сезонный циклы и позволяет вычислить коротковолновую (в шести диапазонах) и длинноволновую (в восьми диапазонах) радиацию в зависимости от температуры, влажности, концентрации парниковых газов, углекислого газа, метана, озона и распределения облачности в толще атмосферы.

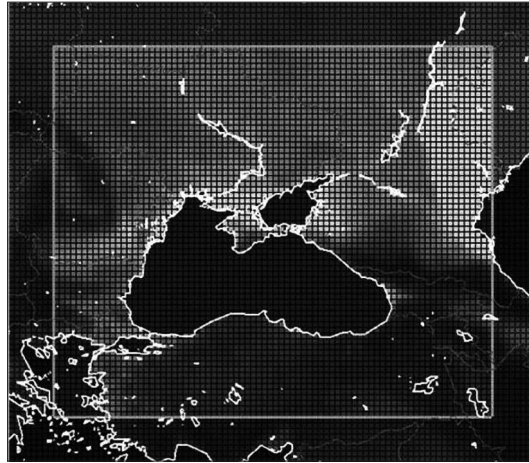


Рис. 1. Расчетная область моделирования

Погранслоем в модели — это слой от поверхности до нижнего 5-го уровня. Принимается полуэмпирическая модель турбулентного перемешивания, используемая для расчета вертикальных потоков тепла, влаги и количества движения.

Для Черного моря задается поверхностная температура и параметр шероховатости, зависящий от скорости ветра. Для расчета потоков тепла и влаги в почве (в слое 0,1–2,0 м) используется четырехслойная схема, позволяющая воспроизводить и суточный, и сезонный циклы. Учитывается поверхностный сток и дренаж осадков.

Параметризация гравитационного волнового сопротивления служит для учета потока количества движения в атмосферу за счет волнового сопротивления, создаваемого орографией поверхности.

Область моделирования проиллюстрирована на рис. 1. Как указывалось, на боковых границах задавались данные глобального моделирования HadAM3P, во внутренней области, за исключением узкой зоны, примыкающей к границам области, определялись основные термогидродинамические характеристики атмосферы.

Подход к расчету сценариев изменения регионального климата заключается в следующем. На первом этапе рассчитывается развитие атмосферных процессов для так называемого контрольного периода 1961–1990 гг., по отношению к которому вычисляются изменения всех характеристик будущего климата. Климатические характеристики — это усредненные за 30 лет и рассчитанные в модели погодные параметры (температура, осадки и др.). При этом характеристики компонентов атмосферы, создающих парниковый эффект, для контрольного периода задавались из известных данных наблюдений.

Второй этап заключается в расчете развития атмосферных процессов для выбранного интервала XXI века. При этом задавались изменения температуры Черного моря, рассчитанные в глобальной модели совместной климатической системы HadAM3P атмосфера — океан — суша, а также изменения концентрации парниковых компонентов для XXI века. Изменения концентрации парниковых газов (углекислого, метана и др.), а также эмиссии SO_2 определялись для периода 2071–2100 гг., согласно общепринятым оценкам SRES [3]. Был выбран сценарий эмиссии газов B2, означающий удвоение концентрации парниковых газов в конце указанного столетия. Оценка соответствует промежуточному варианту будущего развития мировой экономики. Считается, что эмиссия парниковых га-

зов в атмосферу с середины XXI века в результате комплекса политико-экономических мер начнет сокращаться. Таким образом, осредненные за 2071–2100 гг. заданные характеристики парниковых компонентов атмосферы определяют климат конца указанного столетия. Сценарий В2 рассматривается как наиболее вероятный вариант эмиссии парниковых газов и аэрозольного загрязнения атмосферы в XXI веке и является общепринятым при численных оценках изменений климата. Отметим также, что для оценки вероятных изменений климата, как правило, выбирается 30-летний период 2071–2100 гг., поскольку для этого периода соотношение между откликом климатической системы Земли на антропогенную нагрузку и погрешностями моделирования становится достаточным для надежного выделения полезного сигнала (отклика). Для более ранних периодов (первая половина XXI века) величины изменений климата, связанные с антропогенным загрязнением, незначительно выходят за рамки погрешностей, а также и природных естественных колебаний климата.

Третий этап оценки изменений климата заключается в вычислении отклонений климатических характеристик за 2071–2100 гг. от рассчитанных в модели для контрольного периода. Эти отклонения и определяют численный сценарий изменений регионального климата, соответствующий сценарию эмиссии парниковых газов.

Результаты численного моделирования. Рассмотрим более детально два основных климатических параметра — усредненную за 30-летний период температуру приземного воздуха и осадки в Черноморском регионе и в целом в Украине. Изменения температуры воздуха за период между 2071–2100 гг. и контрольным периодом 1961–1990 гг. показаны на рис. 2, а осадков — на рис. 3.

Изменение температурного режима характеризуется значительным потеплением как в летний (июнь, июль, август), так и в зимний (декабрь, январь, февраль) периоды времени. Летом (см. рис. 2, а) максимальное повышение температуры отмечается в северной части домена и в большей части Украины (кроме Крыма и южной прибрежной области), что составляет 4,5–5,5 °С. В Причерноморском регионе потепление несколько меньше — в пределах от 4,5 до 5 °С, что объясняется влиянием моря, которое выступает в роли стабилизирующего фактора. Над акваторией моря повышение температуры воздуха составляет 3,5–4,5 °С на юге и 4–4,5 °С на севере. В Малой Азии и Закавказье модель показывает относительно однородный режим повышения температуры на 4,5–5 °С.

Для зимнего периода времени (см. рис. 2, б) оценки потепления более умеренные. Распределение аномальной температуры в северной половине домена близкое к широтному, максимальная величина составляет около 3,5–4,5 °С; в южной сухопутной части домена и над морем отмечается повышение температуры около 3 °С.

Таким образом, зимой для Украины величина потепления составляет 3,5–4,5 °С, что меньше величины для летнего периода времени. Такая асимметрия потепления объясняется 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.

В отличие от температуры, изменение режима осадков в годовом цикле носит более сложный характер. Изменения среднесуточных осадков (Δp) для летних месяцев: $\Delta p = (P_{1961-1990} - P_{2071-2100})/P_{1961-1990}$ (где p — среднесуточные осадки за указанные годы, %) проиллюстрированы на рис. 3, а, откуда видно, что количество осадков существенно умень-

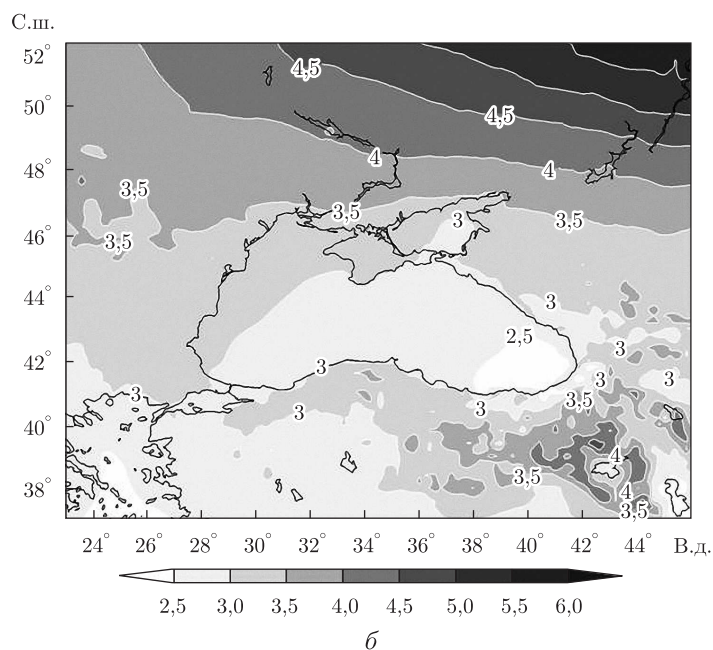
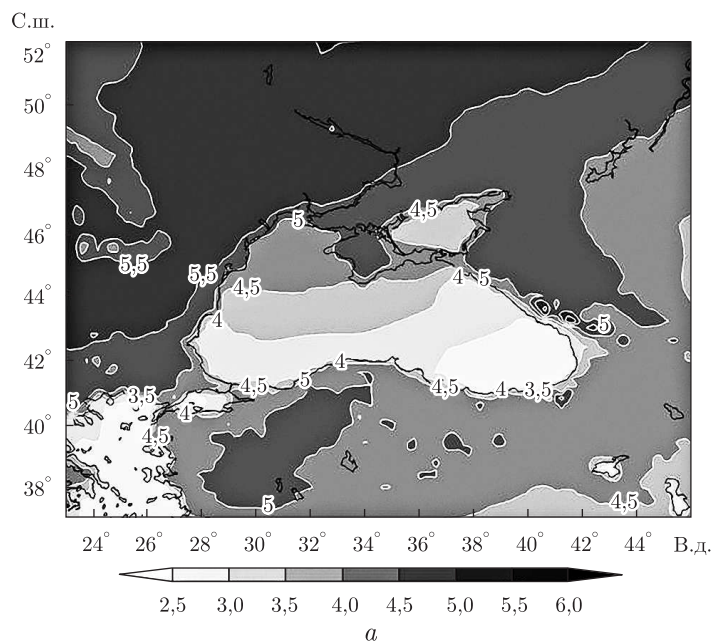


Рис. 2. Изменение приземной температуры воздуха, рассчитанной как разность между периодами 2071–2100 и 1961–1990 годов для летнего (*a*) и зимнего (*б*) сезонов

шается, т. е. лето станет гораздо более засушливым. На основной части Украины интенсивность осадков уменьшается на 20–30%, а в Крыму — почти на 5–10%.

На Кавказе и в Турции уменьшение осадков летом также значительно (35–40%). Несколько меньше (на 10–20%) отмечается снижение осадков в прибрежных областях северного и восточного побережий Черного и Азовского морей. В общем, во всем домене, за небольшими исключениями, ожидается значительное уменьшение летних осадков (на

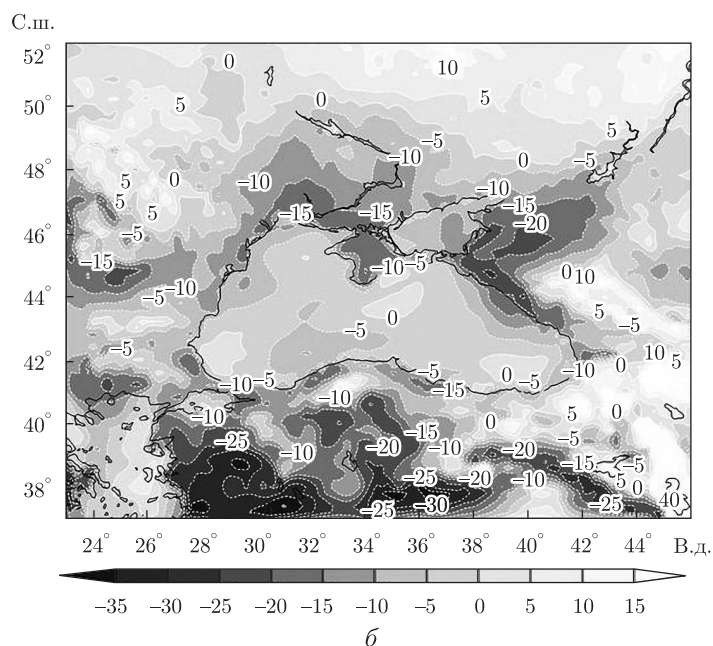
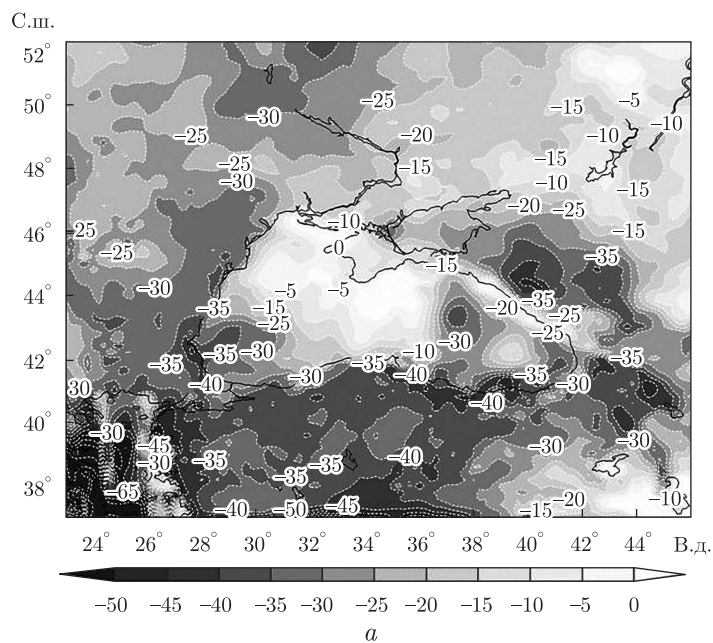


Рис. 3. Изменение интенсивности осадков, рассчитанной в процентном отношении периода к 1961–1990 гг. для летнего (*a*) и зимнего (*б*) сезонов

20–30%). Наши данные указаны за весь летний сезон. Отметим, что для июля уменьшение осадков значительно превышает среднесезонные величины. Например, в июле осадки в центральной части Украины снизятся на 50–60%, а в Крыму — на 60%, т. е. середина лета станет аномально засушливым месяцем года.

Для зимы распределение изменения осадков в области домена более неоднородно (см. рис. 3, *б*). В Северной части Украины осадки не изменяются, в Южной и в Крыму уменьшение составляет 10–15%. Таким образом, в зимний период времени общего значительного

изменения осадков, как для летнего периода, в Украине не обнаруживается. В Турции и Румынии уменьшение осадков зимой более значительно — на 10–20%.

Были рассмотрены лишь два основных климатических параметра — температура воздуха и осадки, которые представляют наибольший интерес. В ходе численных экспериментов получены оценки изменения к концу XXI века и других климатических характеристик: давление, ветер, влажность, облачность, тепловые и радиационные потоки и пр. Изменения некоторых из них в Украине для прошлого столетия приведены в обзоре [4]. Сравнение изменений, рассчитанных для конца XXI века и оцененных для XX века, показывает, что будущие климатические изменения в целом по характеру соответствуют климатическим сдвигам второй половины прошлого столетия, но по величине в несколько раз превосходят их. Так, например, за вторую половину XX века средняя зимняя температура в Украине повысилась на 1–1,5°, что в 2–3 раза меньше полученных нами численных оценок будущих изменений. Особенно неблагоприятной является оценка значительного уменьшения среднесезонных летних осадков в Украине в основном в середине лета, что для последней трети XXI века составляет около 50% одновременно с повышением температуры воздуха на 5–6 °С. Хотя с учетом незначительных изменений зимних осадков среднегодовое уменьшение осадков в Украине около 15–20%.

Результаты наших численных региональных экспериментов, в общем, согласуются с известными опубликованными данными регионального моделирования климата для Центральной и Западной Европы. Согласно приведенным моделям, тенденция потепления климата конца прошлого столетия продолжится и в XXI веке, в частности, в Европейском регионе более интенсивно, чем в среднем по Земле [5, 6]. В зимний период времени осадки увеличатся в северной части Европы, а летом уменьшатся в южной. Возможные причины такого различия связаны с увеличением температурных контрастов суша — океан, сдвигом крупномасштабных циркуляционных систем, обратными связями в системе атмосфера — суша [7].

Однако обычно регион Украины и в целом 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 всей территории Украины и Черноморского бассейна.

Таким образом, нами выполнены численные оценки изменений климата Украины и Черноморского региона для конца XXI века. Использовалась региональная климатическая модель HadRM3P и данные крупномасштабного моделирования HadAM3P. В качестве основных результатов для территории Украины отмечено значительное повышение климатических значений температуры воздуха во все периоды года и значительные уменьшения летних осадков. Получены пространственные распределения величин изменения температуры и осадков для зимнего и летнего сезонов. Такой сценарий изменения климата Украины, и особенно ее южных областей, можно рассматривать как сугубо неблагоприятную тенденцию для ее сельскохозяйственного комплекса.

Прикладным аспектом численных экспериментов является ретроспективный анализ (*re*-анализ) атмосферной циркуляции за длительный промежуток времени (1958–2002 гг.). *Re*-анализ позволяет получить распределение всех основных характеристик атмосферной циркуляции — температуры, ветра, влажности и др. с разрешением около 25 × 25 км и временной дискретностью 6 ч. Этот массив данных может служить исходным для решения ряда задач, таких как расчет ветрового энергopotенциала, режимных характеристик температуры, осадков.

Работа выполнена с использованием программного обеспечения PRECIS, предоставленного Met Office Hadley Centre (Великобритания).

1. 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 / Ed. by S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller. – Cambridge (UK); New York: Cambr. univ. press, 2007. – 996 p.
2. Jones R. G., Noguera M., Hassell D. C. et al. Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS. – Exeter (UK): Met Office Hadley Centre, 2004. – 40 p.
3. Nakicenovic N., Swart R. Special Report on Emissions Scenarios. – Cambridge: Cambr. univ. press, 2000. – 570 p.
4. Ефимов В. В., Губанова Е. В. Изменение климата Украины в XX веке. – Севастополь: Мор. гидрофиз. ин-т НАН Украины, 2003. – 42 с.
5. 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.
6. Rowell D. P., Jones R. G. Causes and uncertainty of future summer drying over Europe // Ibid. – 2006. – **27**. – P. 281–299.
7. Christensen J. H., Christensen O. B. A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century // Climate Change. – 2007. – **81**. – P. 7–30.

*Морской гидрофизический институт
НАН Украины, Севастополь*

Поступило в редакцию 09.07.2010

V. V. Efimov, Academician of the NAS of Ukraine **V. A. Ivanov**, **A. E. Anisimov**

Numerical modeling of climate change in Ukraine in the XXI century

Numerical experiments on assessing the regional climate projections for the territory of Ukraine and the Black Sea area at the end of the XXI century under anthropogenic contamination of the atmosphere are examined, by using HadRM3P climate model. Climate changes are estimated as the difference between 1961–1990 control period and the future 2071–2100 climate under B2 scenario of the emission of greenhouse gases. Climate change estimates for Ukraine that exceed globally averaged ones are obtained. The warming of air is most pronounced in summer seasons, which is accompanied by a decrease in precipitations.