

А.Е. Анисимов, В.В. Ефимов

Численные оценки изменения осадков в Черноморском регионе в XXI столетии

Описываются результаты численных экспериментов по динамической регионализации глобальных проекций изменения климата. Рассмотрены изменения средних и экстремальных осадков для заданных периодов повторяемости в конце XXI столетия в Украине и Черноморском регионе. Согласно рассчитанным региональным проекциям, в летний сезон на территории Украины ожидается снижение повторяемости осадков, суммы осадков при этом уменьшатся на 30 – 50%, в зимний сезон за счет усиления средней интенсивности осадки увеличатся на 20 – 30%. Это будет сопровождаться ростом величин экстремальных осадков, в частности, осадки с периодом повторяемости один раз в 5 лет усилятся на 40 – 50%.

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

Введение

Изучение изменения климата в XXI столетии в результате увеличивающегося антропогенного загрязнения атмосферы парниковыми газами и аэрозолями для отдельных регионов Земли является важнейшей задачей. Несмотря на то что достигнут значительный прогресс в многосценарном и многомодельном подходе к численному моделированию климатической изменчивости [1], оценки изменения климата на глобальных масштабах с использованием современных моделей климатической системы атмосфера – океан – суша существенно различаются. На региональных масштабах такие оценки в отдельных регионах (протяженностью порядка тысячи километров) еще более разнородны. Хотя в последнее время появляется все большее число работ, посвященных региональным проекциям изменения климата в Европе, территории Украины и Черноморского региона, как правило, оказываются за пределами внимания авторов. В то же время необходимость таких, хотя бы и предварительных, региональных оценок, безусловно, очевидна.

В работе рассмотрены результаты расчетов изменений климата Черноморского региона к концу XXI столетия, выполненных методом динамической регионализации (*downscaling*). Он заключается в расчетах климатических изменений с использованием региональной численной модели атмосферной циркуляции *HadRM3P* [2] и входных данных глобальной атмосферной модели *HadAM3P* [3]. По-существу, был выполнен перерасчет результатов крупномасштабного моделирования изменения климата ($2,5 \times 2,5^\circ$) на сетку с повышенным разрешением (25×25 км) с целью более полного учета таких региональных особенностей, как орография, очертания береговой линии, свойства подстилающей поверхности. Для такого сложного горизонтально неоднородного региона, как Черноморский, это является особенно важным. Таким образом, крупномасштабные, осредненные для всего региона оценки климатических изменений, полученные в глобальной модели, в ре-

зультате нашего перерасчета с повышенным пространственным разрешением должны оставаться неизменными, но добавляются дополнительные детали, связанные с уточнением особенностей атмосферной циркуляции в районах с резкими неоднородностями подстилающей поверхности. Эти поправки в первую очередь относятся к нижней части атмосферы в пределах планетарного пограничного слоя (1 – 1,5 км).

К настоящему времени опубликованы результаты нескольких численных экспериментов по моделированию изменения климата Европейского региона в XXI столетии с повышенным пространственным разрешением. Наиболее неопределенным оценочным параметром являются осадки. По сравнению с температурой пространственные изменения среднегодовых и сезонных осадков носят более сложный характер, и полной согласованности результатов различных моделей, к сожалению, не наблюдается. Связано это, в первую очередь, с тем, что атмосферные осадки – это диагностический модельный параметр. Подходы к параметризации этого процесса в моделях значительно различаются. В результате при регионализации изменчивость конечных климатических средних и экстремальных полей осадков в значительной мере определяется выбором региональной модели, особенно в летний сезон [4, 5]. Это ведет к сильной межмодельной дисперсии оценок. Изменчивость прогностических переменных, например температуры, в большей степени определяется выбором глобальной модели [6]. Кроме того, сам процесс осадкообразования по сравнению с температурой отличается большей пространственной неоднородностью. Необходимо отметить также, что в большинстве опубликованных работ территория Украины находится на краю расчетной области, а иногда она и вовсе не попадает в пространственный домен.

Согласно результатам предыдущих исследований, выполненных с использованием глобальных моделей, можно с определенностью говорить об устойчивой тенденции к уменьшению летних осадков в XXI столетии в Средиземноморье, Центральной и Юго-Восточной Европе, где повышается риск летних засух [1, 6]. В региональных моделях эта тенденция сохраняется, хотя ее величина остается неопределенной; с большой долей уверенности можно говорить лишь о знаке тенденции, общем для большинства моделей [7, 8] и устойчивом относительно естественной изменчивости [9]. При этом в Северной Европе осадки, наоборот, увеличиваются. Таким образом, на территории Украины наблюдаются значительные градиенты в проекциях изменений летних осадков в направлении север – юг. В зимний сезон изменение осадков в Украине в среднем невелико, оно различается в моделях как по величине, так и по знаку.

Причины и физические механизмы уменьшения летних осадков в Европе остаются до конца не выясненными. В [10] предложена интересная методика выделения вклада отдельных физических механизмов в суммарное уменьшение летних осадков и оценки их относительной роли. Авторы провели серию численных экспериментов с той же связкой глобальная – региональная модель, что и в настоящей работе (но с более грубым пространственным разрешением). В [11] использован ансамблевый подход к анализу как зимнего, так и летнего сезона: ансамбль из трех реализаций сопоставлялся с естественной изменчивостью, что позволило оценить устойчивость изменений, связанных с

каждым механизмом. Подобные оценки получены также в [9]. В результате предполагается значимое уменьшение летних осадков практически для всей Европы, в том числе и для Украины, которое составит более 40%. При этом важными оказались несколько физических механизмов, приводящих к такой тенденции.

Во-первых, более ранний сход снега приводит 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 величина влагозапаса в летний сезон опустится 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. Отметим, что в зимний сезон почва насыщена влагой и этот эффект не проявляется.

Второй механизм непосредственно связан с тем, что в процессе глобального повышения температуры увеличиваются температурные контрасты между сушей и океаном (*land – sea warming contrast*). Этот эффект возникает во всех численных экспериментах с увеличением концентрации парниковых газов [12]. В связи с тем что океан прогревается слабее, чем суша, при адвекции морского воздуха на сушу и его нагревании происходит более резкое падение относительной влажности *RH*. Над областями суши этот механизм особенно важен для относительно небольших по протяженности прибрежных участков. В Европе он характерен для зоны максимального повышения температуры (Балканский п-ов и Средиземноморье), что, в свою очередь, объясняется особенностями климатической циркуляции. Для этих регионов слабая адвекция более прохладного морского воздуха приводит к тому, что локальный радиационный прогрев играет здесь большую роль.

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 *RH* приводит к увеличению потока коротковолновой радиации и дальнейшему повышению температуры.

Основным индикатором-предиктором возникновения осадков является относительная влажность, которая в значительной степени определяет их повторяемость и в меньшей степени – интенсивность [11]. Вышеописанные механизмы приводят к ее значительному уменьшению. Удельная влажность q , влияющая на интенсивность отдельных событий осадков тогда, когда они возникают, но оказывающая меньшее влияние на вероятность их появления, в то же время в более теплом климате возрастает, но в меньшей степени по сравнению с уменьшением *RH*. Эти две конкурирующие тенденции в процессе глобального потепления, приводящие к изменениям параметров осадкообразования, особенно важны для Юго-Восточной Европы и Украины. От их относительного вклада зависит изменение частоты повторяемости и интенсивности осадков.

Наконец, изменение в крупномасштабной циркуляции также может оказывать влияние на распределение осадков. В [10] показано, что в Южной и

Центральной Европе летом роль этого механизма сравнительно мала, в то время как в Северной и Восточной Европе изменения крупномасштабной циркуляции более значительны, что приводит к увеличению осадков. Второстепенность вклада крупномасштабных механизмов в изменение осадков подтверждена в [11, 13] с привлечением ансамбля глобальных моделей. Было показано, что изменение в крупномасштабной циркуляции в различных моделях в целом невелико и оно не влияет на общую тенденцию уменьшения летних осадков в Южной Европе. Безусловно, вопрос о вкладе крупномасштабной циркуляции в изменчивость региональных осадков представляет собой отдельную задачу, поэтому в рамках указанных работ можно говорить лишь о его относительно меньшей роли для Юго-Восточной Европы. Тем более сложно сделать какие-либо определенные выводы о роли этого механизма для территории Украины.

Региональные изменения в циркуляции, напротив, могут быть фактором, важным с точки зрения летнего уменьшения осадков. Хотя, по мнению авторов [10], не выделяется значение таких изменений в силу их малости, в работе [14] показано, что с зоной усиленного потепления в Южной Европе связана аномалия приземного давления, вследствие чего происходит усиление восточных ветров, что обуславливает более континентальный климат. Важной причиной развития аномалий давления и температуры считается также весенняя отрицательная аномалия запаса почвенной влаги, которая запускает указанную выше цепочку обратных связей.

Обратимся к опубликованным результатам по экстремальным осадкам. Для них, в отличие от средних, как указывалось, более важным предиктором является удельная влажность. Увеличение q должно приводить к усилению отдельных событий осадков и таким образом оказывать определяющее влияние на среднюю интенсивность и экстремальные величины. В то же время общая частота осадков в большей степени определяется RH . Это объясняет приводимый во многих исследованиях противоречивый на первый взгляд эффект усиления экстремальных осадков на фоне ослабления средних [15]. Согласно [11], пространственное распределение изменения экстремальных осадков в оба сезона имеет выраженный зональный градиент. Зимой практически для всей Европы выделена значимая область усиления экстремальных осадков с ослаблением к югу. Летом зона повышения ограничивается Северной Европой, в Средиземноморье экстремальные осадки становятся более редким событием. Территория Украины находится в переходной зоне, где значимых летних изменений не наблюдается. Зимой главным механизмом является потепление, сопровождающееся увеличением q . Летом же увеличение потенциального влагосодержания в Южной Европе будет компенсироваться сильным падением RH , которое, помимо влияния на частоту осадков, также оказывает действие и на их интенсивность.

В [4] сравниваются результаты пересчета данных глобальной модели из [11] с использованием ансамбля региональных моделей. Хотя региональные особенности несколько различаются, в целом приводятся сходные изменения. По результатам двух моделей, территория Украины находится в зоне летнего уменьшения экстремальных осадков, а согласно остальным пяти моделям, – значимых изменений не произойдет. Зимой модели согласуются между собой

в практически повсеместном увеличении экстремальных осадков, за исключением южных областей. Авторы показывают, что увеличение средней интенсивности осадков даже в случае более значительного уменьшения их повторяемости (т. е. при уменьшении средних осадков) может привести к увеличению экстремальных осадков (что и происходит летом в Южной Европе).

Другие работы [15 – 17] согласуются с результатами [4]. В них также отмечается максимальное увеличение экстремальных осадков в Северной Европе с ослаблением к югу в зимний сезон, небольшое увеличение на севере и низкая согласованность результатов на юге и востоке – летом.

Методика

Для построения проекций изменения климата нами использовался подход временных интервалов. Изменение климатической переменной рассчитывается как разность между ее значениями за два модельных периода по 30 лет. В контрольном периоде модель интегрируется с заданной концентрацией в атмосфере парниковых газов и аэрозолей, наблюдавшихся в 1961 – 1990 гг. Для будущего периода параметризационные схемы модели переформулируются с учетом концентрации парниковых газов, соответствующей предполагаемым сценариям эмиссий, разработанным Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) для 2071 – 2100 гг. Расчеты были выполнены для одного из самых неблагоприятных сценариев *A2*, а также для сценария *B2*, описывающего средненизкий уровень эмиссий [18].

Для контрольного периода и сценария *A2* проведена регионализация трех членов ансамбля глобальной модели. Различие между ними состоит в начальных условиях. Таким образом, в каждом из членов ансамбля глобальной модели реализуется собственная крупномасштабная климатическая изменчивость, которая через граничные условия усваивается в региональной модели. Такой подход позволяет получить более устойчивые средние и экстремальные оценки характеристик климата [4], поскольку единственной 30-летней реализации климатической изменчивости все же недостаточно для выделения всего спектра крупномасштабной модельной изменчивости. Отметим также, что поля температуры поверхности океана (*SST*) в трех членах ансамбля для контрольного периода одинаковы и соответствуют наблюдениям. Для каждого члена ансамбля будущего периода *SST* имеют общую межгодовую изменчивость, тогда как годовой ход и тренды индивидуальны. В целом описание ведущего эксперимента аналогично [3].

Анализ экстремальных осадков выполнен с привлечением метода подбора обобщенных функций распределения экстремальных величин (*GEV* – *Generalized Extreme Value*). Согласно теореме об экстремальных типах (см., например, [19]), распределение $M_n = \max\{X_1, \dots, X_n\}$ (где $\{X_1, \dots, X_n\}$ – последовательность независимых одинаково распределенных случайных величин) при $n \rightarrow \infty$ стремится к одному из трех классов распределений. Обобщенный вид функции распределения следующий:

$$F(x) = \begin{cases} \exp\{-[1 - k(x - \xi)/\alpha]^{1/k}\}, & k < 0, \quad x > \xi + \alpha/k, \\ \exp\{-\exp[-(x - \xi)/\alpha]\}, & k = 0, \\ \exp\{-[1 - k(x - \xi)/\alpha]^{1/k}\}, & k > 0, \quad x < \xi + \alpha/k. \end{cases}$$

В нашем случае $F(x)$ является кумулятивной функцией распределения сезонного либо годового максимума суточной нормы осадков. Вид функции распределения зависит от набора параметров $\{\xi, \alpha, k\}$, которые определяют ее расположение, масштаб и форму соответственно. Эти параметры оцениваются для каждой точки пространственного домена на основании выборки из 90 максимумов – таким образом, максимумы из различных членов ансамбля объединяются в один ряд. В результате для каждой точки получаются две функции распределения (для контрольного и будущего периодов) с оценками параметров $\{\hat{\xi}, \hat{\alpha}, \hat{k}\}$. Изменение экстремальных осадков с заданным периодом повторяемости T имеет вид

$$\frac{X_T^f - X_T^c}{X_T^f}, \text{ где } X_T = F^{-1}(T) = \begin{cases} \hat{\xi} + \hat{\alpha}\{1 - [-\ln(1-1/T)]^{\hat{k}}\} / \hat{k}, & \hat{k} \neq 0, \\ \hat{\xi} - \hat{\alpha} \ln[-\ln(1-1/T)], & \hat{k} = 0. \end{cases}$$

Данная методика впервые применена для анализа модельных экстремумов в [20]. Сейчас она является одной из общепринятых, в частности при анализе модельных осадков. В то же время для оценки параметров GEV -распределения используется несколько методов. В настоящей работе за основу взят обладающий рядом преимуществ метод L -моментов [20].

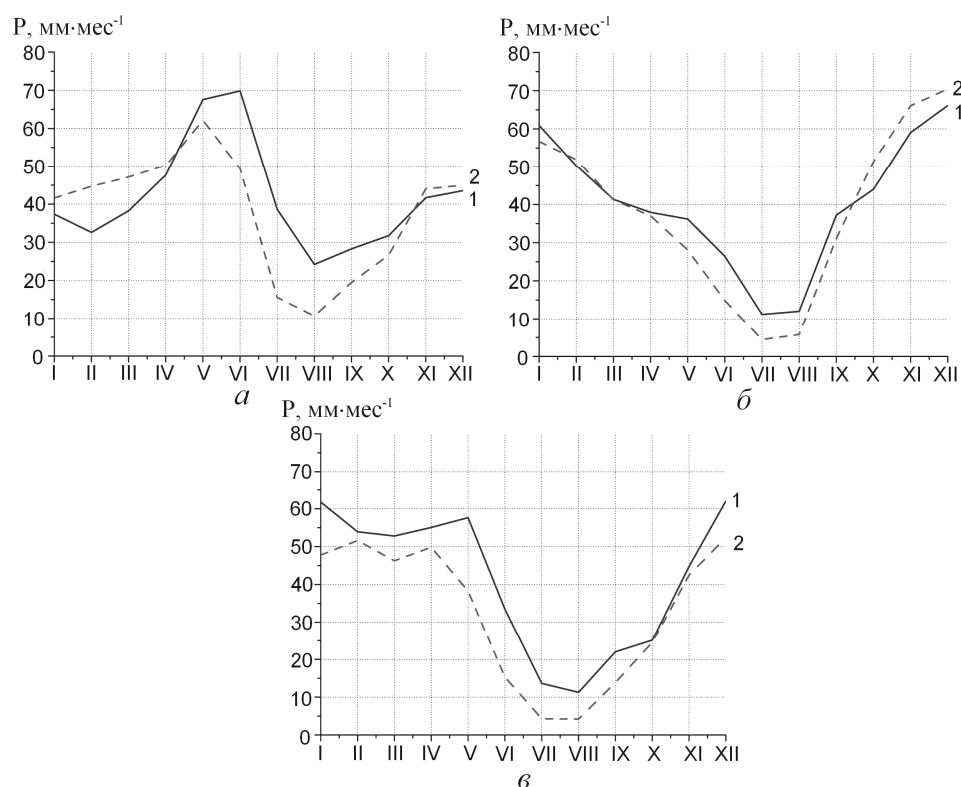
Наконец, важным этапом является оценка статистической значимости полученных изменений. Для построения доверительных интервалов оценок экстремальных величин нами была использована так называемая *parametric bootstrap*-процедура. Для всех точек пространственного домена генерировались случайные выборки (1000 выборок), соответствующие оцененным функциям распределения. Далее для каждой из этих выборок снова проводилась оценка параметров GEV -распределения и вычислялись значения, соответствующие заданному периоду повторяемости. Полученные таким образом 10- и 90%-ные квантили выборки из 1000 элементов соответствуют границам 80%-ного доверительного интервала. Следуя [21], будем считать изменение экстремальной величины значимым на уровне 10%, если 80%-ные доверительные интервалы контрольного и будущего периодов не перекрываются.

Результаты и обсуждение

Общие особенности сезонных изменений температуры и осадков в Черноморском регионе были рассмотрены в работах [22, 23]. Не останавливаясь на деталях, отметим, что для сценариев $A2$ и $B2$ повышение температуры во всех расчетах составляло в зимний период $\approx 3 - 4^\circ\text{C}$, в летний $6 - 7^\circ\text{C}$. Наибольшее потепление происходит в северо-восточной части региона, разница в значениях, полученных с использованием этих сценариев, составляет $\approx 1^\circ\text{C}$. Эти результаты согласуются с осредненными оценками изменения температуры для Европы, приведенными в докладе МГЭИК [1]. Основной особенностью проекций изменения температуры для Юго-Восточной Европы и Средиземноморья является более значительное летнее потепление по сравнению с зимним.

Не повторяя иллюстраций из [23], отметим, что изменение средних осадков носит более пространственно неоднородный характер. В связи со сложной орографией выбранного модельного домена и его достаточно большой

меридиональной протяженностью на севере и юге наблюдаются разные по величине и даже по знаку изменения осадков. Рассмотрим годовой ход среднемесячных осадков для контрольного и будущего периодов, осредненный по трем подобластям – территории Украины (рис. 1, *а*), акватории Черного моря (рис. 1, *б*) и Анатолийскому п-ову (рис. 1, *в*). Так же, как и по данным глобальной модели [3], в период с мая по сентябрь повсеместно уменьшаются суммы как конвективных, так и крупномасштабных осадков. Пик ослабления осадков приходится на июль – август. В среднем за летний период снижение суммы осадков составляет 50 – 60% на севере домена и до 70% – на юге. Такие большие изменения в относительных величинах связаны с тем, что суммы летних осадков в контрольном периоде были сами по себе невелики, и даже небольшое изменение по абсолютной величине приводит к существенному относительному уменьшению. В период с ноября по апрель в северной части домена (особенно на правом берегу Днепра) осадки увеличиваются на 20 – 30%. В феврале в обширной области к востоку от Карпат увеличение составляет более 50%. Это можно объяснить общим потеплением и большим запасом влаги в атмосфере, вследствие чего, как будет показано ниже, увеличивается интенсивность крупномасштабных осадков (конвективные осадки в зимние месяцы невелики). Над Анатолийским п-овом в зимний сезон осадки в среднем уменьшаются на 20%.



Р и с. 1. Годовой ход среднемесячных осадков (мм·мес⁻¹) в 1961 – 1990 гг. (1) и 2071 – 2100 гг. (2), осредненных для территории Украины (*а*), Черного моря (*б*) и Анатолийского п-ова (*в*)

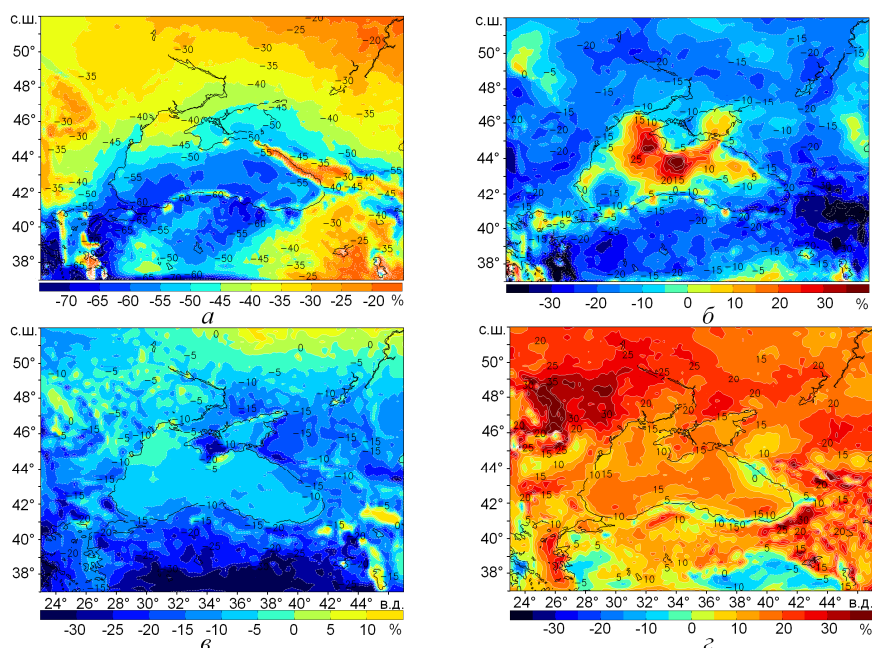
Годовой ход среднемесячных осадков над морем (рис. 1, б) имеет несколько иной вид по сравнению с сушей. Во-первых, отсутствует их летний максимум, соответствующий весенне-летней конвекции [24]. Как следствие, изменения осадков над морем в более теплом климате по абсолютной величине меньше, чем над сушей, хотя в процентном отношении они сравнимы. Во-вторых, в октябре – декабре осадков над морской акваторией больше, чем над сушей. В расчетах для будущего периода эта разница становится более значительной, количество осадков над морем в этот период увеличивается на 15 – 20%. В основном это связано с усиленной конвективной активностью над более теплым морем.

Полученная тенденция к уменьшению летних осадков может иметь существенно негативные, с точки зрения практики, последствия. Поэтому важно более детально изучить изменение не только среднемесячных осадков, но и их статистических характеристик, таких, как суточная частота выпадения осадков и повторяемость редких событий.

Рассмотрим прежде всего изменение частоты и средней интенсивности осадков. Для определения влажных суток был использован порог $0,5 \text{ мм}\cdot\text{сут}^{-1}$. Такой выбор обусловлен необходимостью отсеивать небольшие морозящие осадки, которые могут появиться в оценках вследствие особенностей численной схемы конвекции. Выбор широко используемого порога в $1 \text{ мм}\cdot\text{сут}^{-1}$ приводит к практически идентичным результатам. На рис. 2, а показано изменение частоты осадков в летний сезон. Она уменьшается неравномерно: если на севере домена осадки выпадают на 30% реже, то на Анатолийском п-ове их повторяемость уменьшается на 50 – 60%. В целом пространственное изменение частоты осадков совпадает с изменением их сумм. При этом средняя интенсивность осадков (рис. 2, б) как на севере, так и на юге домена достаточно равномерно снижается на 10 – 20%. Исключение составляет Черноморский бассейн: над морем вблизи Крыма интенсивность возрастает на 10 – 20%, в среднем для всей акватории она практически не меняется. Как видим, основной вклад в летнее уменьшение осадков вносит уменьшение повторяемости, хотя имеет место и некоторое снижение интенсивности. Дальнейший анализ показывает, что такое снижение повторяемости и интенсивности объясняется резким уменьшением относительной влажности в регионе. Удельная влажность над областями суши меняется слабо, тогда как над морем она возрастает более чем на 30%, – этим частично объясняется увеличение интенсивности осадков над морской акваторией. Механизмы возникновения зоны уменьшения относительной влажности обсуждались во введении. В нашем случае такое уменьшение является следствием подобной тенденции для входных данных глобальной модели.

Усиление осадков на территории Украины в зимний сезон носит иной характер. Частота влажных дней здесь практически не меняется (рис. 2, в). В то же время средняя интенсивность осадков увеличивается на 20 – 30% (рис. 2, г). Это происходит на фоне значительного увеличения, более чем на 40%, удельной влажности в северных областях и незначительных изменений относитель-

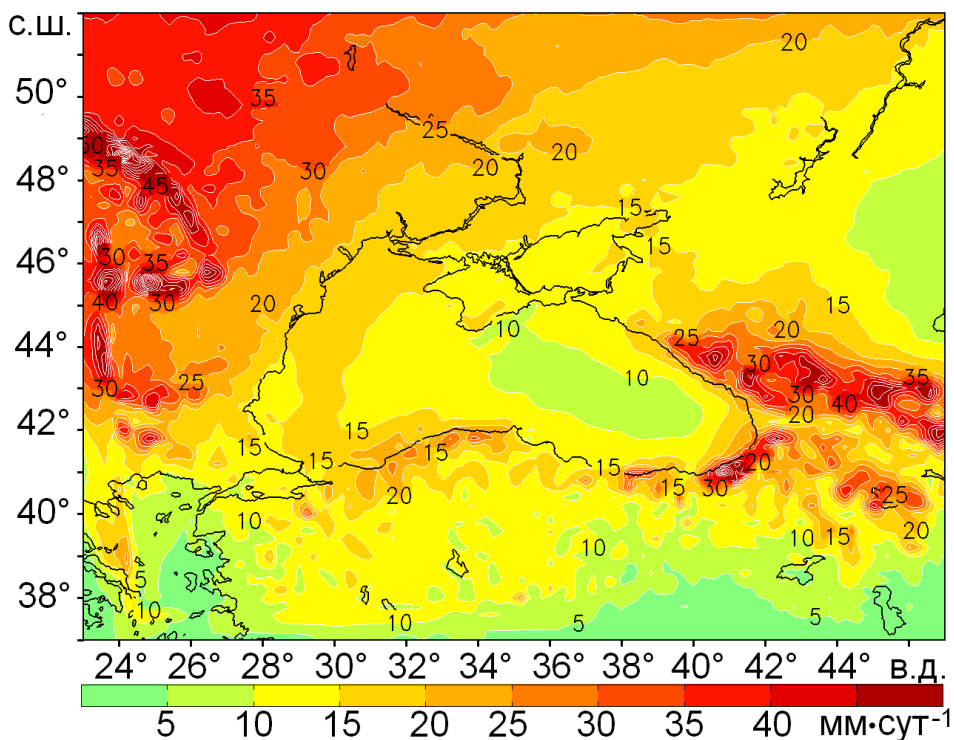
ной влажности, что приводит к большему запасу влаги и усиленной интенсивности крупномасштабных осадков. В южных областях частота осадков уменьшается на 20 – 30%, интенсивность же практически не меняется.



Р и с. 2. Изменение частоты (*a*) и интенсивности (*б*) осадков (%) в 2071 – 2100 гг. по отношению к контрольному периоду 1961 – 1990 гг. для лета. То же (*в*, *з*) – для зимы

Рассмотрим теперь изменение суточных осадков, полученных по функциям обобщенного экстремального распределения. Для этого из данных трех 30-летних членов модельного ансамбля за контрольный и будущий периоды были выделены сезонные максимумы. Анализ выполнен отдельно для каждой точки для зимнего и летнего сезонов, рассчитаны экстремальные осадки для разных периодов повторяемости (один раз в 2, 5 и 20 лет). Заметим, что экстремальные осадки, как правило, соответствуют кратковременным событиям конвективного характера в летние месяцы и более затяжным влажным периодам – зимой.

Пространственные распределения экстремальных осадков для обоих сезонов сходны с распределениями средней интенсивности. На рис. 3 для лета контрольного периода показаны экстремальные осадки с повторяемостью один раз в 5 лет. Для западных областей Украины они составляют более 35 – 40 мм·сут⁻¹, в то время как для юго-восточных областей, Черноморского бассейна и Анатолийского п-ова, где экстремальные осадки случаются реже, – не превышают 15 – 20 мм·сут⁻¹. Выделяются области с большими суммами осадков в гористых районах (Карпаты, Кавказ и подветренная сторона Понтийских гор).

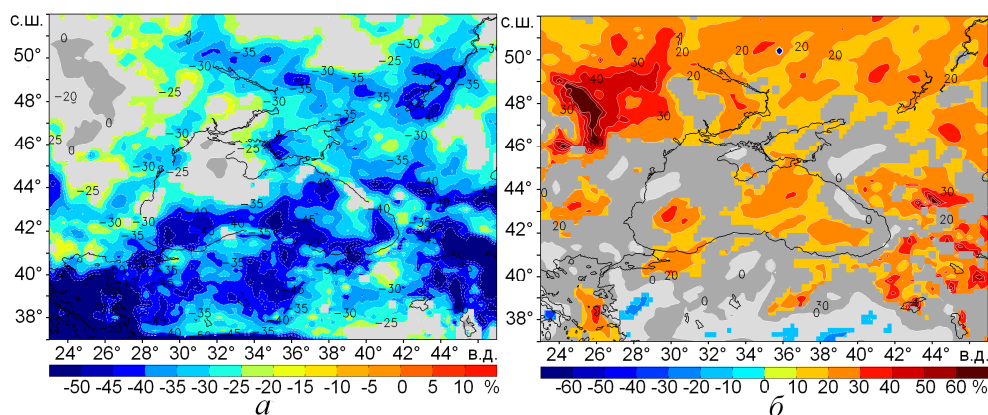


Р и с. 3. Максимальные значения суточной нормы осадков ($\text{мм}\cdot\text{сут}^{-1}$) с периодом повторяемости один раз в 5 лет для летнего сезона контрольного периода 1961 – 1990 гг.

Для осадков с другими периодами повторяемости получены сходные пространственные распределения, но с поправкой на величину. В целом по домену экстремальные осадки, возникающие один раз в 20 лет, больше 5-летних в 1,5 раза, в районе Черноморского бассейна – в 2 раза. Экстремумы с 2-летней повторяемостью, в свою очередь, меньше 5-летних в 1,5 раза, в районе Черного моря вблизи Крыма – в 2 раза. Заметим, что поведение экстремальных осадков зависит от параметра формы k GEV -распределения, в данном случае большие отрицательные значения k для черноморской акватории обусловили более «тяжелый хвост» функции плотности распределения.

Изменение экстремальных осадков по сравнению со средними в более теплом климате носит более сложный характер и не всегда связано с интенсивностью осадков. Задача усложняется сильной зашумленностью пространственного распределения изменений. На рис. 4, *a* показано изменение летних экстремальных осадков с периодом повторяемости один раз в 5 лет. Значимое уменьшение экстремальных осадков на 30 – 40% наблюдается практически повсеместно в южных частях домена. В северных частях также прослеживается значимое уменьшение экстремумов на 20 – 30%, за исключением обширных зон в районе Карпат и северо-западной части Черного моря. Напомним, что такое ослабление экстремумов сопровождается общим снижением интенсивности осадков. В то же время относительное ослабление экстремумов меньше, чем уменьшение средних осадков, а в зонах повышения или не-

значительного изменения интенсивности получаем низкую статистическую значимость сигнала изменения экстремальных осадков.



Р и с. 4. Изменение максимальных значений суточной нормы осадков (%) с периодом повторяемости один раз в 5 лет в будущем климате 2071 – 2100 гг. по отношению к контрольному периоду 1961 – 1990 гг. для лета (*а*) и зимы (*б*). Темно-серым (положительный знак изменений) и светло-серым (отрицательный знак изменений) цветом показаны изменения, не значимые на уровне 10%

Зимой средняя интенсивность осадков возрастает и при этом естественно ожидать роста экстремальных величин. Значимое увеличение экстремумов с периодом повторяемости 5 лет отмечается в северной части домена и в восточной части акватории Черного моря (рис. 4, *б*). На территории Украины увеличение составляет 20 – 30%, в Карпатах – более 40%. В данном случае пространственное распределение изменения экстремумов близко к распределению изменения среднесезонных осадков. Для периода повторяемости 20 лет относительные изменения увеличиваются на 10 – 15%. Для осадков с большим периодом повторяемости в оба сезона характерны более широкие доверительные интервалы, что ведет к низкой значимости изменений. Понижение статистической значимости при переходе к экстремальным осадкам отмечается и в других работах [25].

Большее относительное увеличение экстремальных осадков с большими периодами повторяемости (либо меньшее уменьшение при отрицательном знаке изменений) присуще многим моделям [4]. Сходный результат получен для среднегодовых экстремумов в [25, 26]. В нашем случае это верно для обоих сезонов. В [4] показано, что такой эффект возникает при увеличении интенсивности осадков на фоне снижения повторяемости. Однако эта причина не единственная, в более теплом климате могут быть другие специфические механизмы, влияющие на поведение экстремальных осадков.

Необходимо отметить, что изменчивость практически всех рассмотренных климатических параметров в районе Черного моря отличается от изменчивости в областях, удаленных от морских берегов. Численные оценки характера и масштабов влияния Черного моря на региональный климат являются предметом отдельного рассмотрения. Одним из вариантов получения таких оценок могут быть численные эксперименты. Известно несколько работ, опи-

сывающих чувствительность региональных моделей к изменчивости температуры поверхности Черного моря в условиях текущего климата [27 – 29]. В частности, в [27] показано значительное влияние температуры поверхности Черного моря на осадки в регионе в летний и осенний периоды. Кроме того, поскольку Черное море, как правило, представлено в совместных глобальных моделях климата с достаточно грубым разрешением, температура его поверхности в экспериментах будущего периода задается простой интерполяцией по аналогии со Средиземным морем. Конечно, это может повлиять на полученные региональные проекции климата [30]. Для оценки устойчивости проекций изменения климата по отношению к изменению температуры поверхности моря в условиях антропогенного воздействия на климат необходимо проведение экспериментов по чувствительности региональных моделей в более теплом климате в дополнение к таким же экспериментам для контрольного периода. Подобные эксперименты представляются темой следующих работ.

Заключение

Динамическая регионализация является основным инструментом для изучения региональных климатических процессов. Оценка риска экстремальных явлений погоды в настоящем климате и возможных изменений, связанных с антропогенным воздействием, представляет собой важнейшую задачу. Описанные результаты численных экспериментов позволили получить предварительные оценки таких изменений. При анализе редких экстремальных событий достоверность оценок повышается с использованием ансамбля реализаций, учитывающего широкий спектр естественной модельной изменчивости. Более длинные ряды сезонных максимумов позволяют уточнить экстремальные оценки с большими периодами повторяемости.

В результате проведенных расчетов рассмотрено изменение модельных осадков в экспериментах с измененной концентрацией парниковых газов по сравнению с контрольным периодом, соответствующим текущему состоянию атмосферы. Установлено, что уменьшение осадков на территории Украины и всего Причерноморья в летний период происходит за счет снижения их повторяемости (30% на территории Украины и более 50% – на Анатолийском п-ове). Основной причиной уменьшения осадков является резкое падение относительной влажности. В зимний период интенсивность осадков на всей территории Украины возрастает от 20% на Левобережье до 40% в Карпатах.

Изменение экстремальных осадков носит более пространственно неоднородный характер. В целом оно качественно согласуется с изменением средних осадков, при этом экстремальные осадки уменьшаются меньше либо усиливаются больше, чем средние. Летом экстремальные осадки с периодом повторяемости один раз в 5 лет уменьшаются на 20 – 30% на территории Украины, до 40% – на Анатолийском п-ове. Для зимы получено значимое усиление осадков практически во всех северных областях пространственного домена и над Черным морем. В районе Карпат усиление максимально, 40 – 50%, такие изменения могут иметь серьезные негативные последствия для региона. Для осадков с большими периодами повторяемости изменения еще сильнее, однако их статистическая значимость ниже.

Работа выполнена 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. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007. – 996 p.
2. *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.
3. *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.
4. *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, doi:10.1029/2005JD005965.
5. *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.
6. *Giorgi F., Lionello P. Climate change projections for the Mediterranean region* // *Glob. Planet. Change.* – 2008. – 63. – P. 90 – 104.
7. *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.
8. *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.
9. *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.
10. *Rowell D.P., Jones R.G. Causes and uncertainty of future summer drying over Europe* // *Clim. Dyn.* – 2006. – 27. – P. 281 – 299.
11. *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.
12. *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* // *Geophys. Res. Lett.* – 2007. – 34. – L02701, doi:10.1029/2006GL028164.
13. *Boé J., Terray L., Cassou C. et al. Uncertainties in European summer precipitation changes: role of large scale circulation* // *Clim. Dyn.* – 2009. – 33. – P. 265 – 276.
14. *Haarsma R.J., Selten F., van den Hurk B. et al. Drier Mediterranean soils due to greenhouse warming bring easterly winds over summertime central Europe* // *Geophys. Res. Lett.* – 2009. – 36. – L04705, doi:10.1029/2008GL036617.
15. *Goubanova K., Li L. Extremes in temperature and precipitation around the Mediterranean basin in an ensemble of future climate scenario simulations* // *Glob. Planet. Change.* – 2007. – 57. – P. 27 – 42.
16. *May W. Potential future changes in the characteristics of daily precipitation in Europe simulated by the HIRHAM regional climate model* // *Clim. Dyn.* – 2008. – 30. – P. 581 – 603.
17. *Nikulin G., Kjellström E., Hansson U. et al. Evaluation and future projections of temperature, precipitation and wind extremes over Europe in an ensemble of regional climate simulations* // *Tellus A.* – 2011. – 63. – P. 41 – 55.
18. *Special Report on Emissions Scenarios* / Eds. N. Nakicenovic, R. Swart. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000. – 599 p.
19. *Лидбеттер М., Линдгрен Г., Ротсен Х. Экстремумы случайных последовательностей и процессов.* – М.: Мир, 1989. – 392 с.

20. *Zwiers F.W., Kharin V.V.* Changes in the extremes of the climate simulated by CCC GCM2 under CO₂ doubling // *J. Clim.* – 1998. – 11. – P. 2200 – 2222.
21. *Kharin V.V., Zwiers F.W.* Estimating extremes in transient climate change simulations // *Ibid.* – 2005. – 18. – P. 1156 – 1173.
22. *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.
23. *Анисимов А.Е.* Региональное моделирование климата Причерноморского региона в конце XXI века // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.* – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2009. – Вып. 19. – С. 379 – 385.
24. *Ефимов В.В., Анисимов А.Е.* Влияние Черного моря на региональный климат // *Морской гидрофизический журнал.* – 2012. – № 2. – С. 37 – 49.
25. *Buonomo E., Jones R., Huntingford C.* On the robustness of changes in extreme precipitation over Europe from two high resolution climate change simulations // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* – 2007. – 133. – P. 65 – 81.
26. *Fowler H.J., Ekström M., Blenkinsop S. et al.* Estimating change in extreme European precipitation using a multimodel ensemble // *J. Geophys. Res.* – 2007. – 112. – D18104, doi:10.1029/2007JD008619.
27. *Bozkurt D., Sen O.L.* Precipitation in the Anatolian Peninsula: sensitivity to increased SSTs in the surrounding seas // *Clim. Dyn.* – 2011. – 36. – P. 711 – 726.
28. *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.
29. *Ефимов В.В., Анисимов А.Е.* Численное моделирование влияния температурных контрастов суша – море на атмосферную циркуляцию в Черноморском регионе // *Морской гидрофизический журнал.* – 2011. – № 4. – С. 3 – 12.
30. *Kjellström E., Ruosteenoja K.* Present-day and future precipitation in the Baltic Sea region as simulated in a suite of regional climate models // *Clim. Change.* – 2007. – 81. – P. 281 – 291.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь
E-mail: anisimov1@mail.ru,
efimov@alpha.mhi.iuf.net

Материал поступил
в редакцию 15.09.11
После доработки 04.11.11

АНОТАЦІЯ Описуються результати чисельних експериментів з динамічної регіоналізації глобальних проєкцій змін клімату. Розглянуті зміни середніх та екстремальних опадів для заданих періодів повторюваності наприкінці XXI століття в Україні та Чорноморському регіоні. Згідно з розрахованими регіональними проєкціями, у літній сезон на території України очікується зниження повторюваності опадів, суми опадів при цьому зменшаться на 30 – 50%, у зимовий сезон за рахунок посилення середньої інтенсивності опади збільшаться на 20 – 30%. Це буде супроводжуватись ростом величин екстремальних опадів, зокрема, опади з періодом повторюваності один раз на 5 років посиляться на 40 – 50%.

Ключові слова: Чорноморський регіон, опади, зміна клімату, моделювання клімату.

ABSTRACT Results of numerical experiments on dynamic regionalization of global climate change projections are described. Changes in mean and extreme precipitation for the given return periods in late XXI century are considered for Ukraine and the Black Sea region. According to the calculated regional projections, in Ukraine in summer precipitation frequency is projected to decrease (total precipitation diminishes by 30 – 50%), whereas in winter precipitation is projected to increase by 20 – 30% due to growth of wet day intensity. It will be accompanied by increase in extreme events, i.e. intensity of extreme precipitation with a 5-years return period will grow by 40 – 50%.

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