

## Реанализ атмосферной циркуляции для Черноморско-Каспийского региона

© 2015 А.Е. Анисимов, Д.А. Яровая, В.С. Барабанов

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

Поступила в редакцию 21.10.2014 г. После доработки 13.01.2015 г.

Описываются результаты численных расчетов по динамической регионализации данных реанализа *ERA-Interim* с использованием модели климата *RegCM4* для территории Черноморско-Каспийского региона. В результате регионализации восстановлены поля атмосферной циркуляции в регионе за 1979 – 2013 гг. с повышенным пространственным разрешением  $25 \times 25$  км. Результаты моделирования сравнивались с исходными крупномасштабными полями с целью валидации региональной модели. Анализ показал, что модель корректно воспроизводит климат в регионе, при этом сохраняются исходные интегральные климатические характеристики. В модели реализуются реалистичный годовой ход и сезонные пространственные распределения основных метеорологических характеристик: температуры, осадков, ветровой циркуляции. Однако для северной части региона отмечается завышение количества атмосферных осадков в осенне-зимний период на 25 – 30% и летней температуры воздуха на 1,5 – 2°C. Дальнейший анализ показал, что увеличение количества осадков происходит в основном в результате завышения их интенсивности, в то время как рассчитанная частота осадков приблизительно соответствует исходным данным; следовательно, необходима оптимизация схемы параметризации атмосферных осадков.

**Ключевые слова:** Черноморский регион, Каспийский регион, моделирование климата, региональная модель, реанализ.

**Введение.** Численное моделирование является одним из основных инструментов для изучения климата и его изменений. На основе глобальных моделей общей циркуляции атмосферы и океана в последние два десятилетия был изучен климат XX в. и получены проекции его изменений в XXI в. В то же время пространственное разрешение глобальных моделей, несмотря на их постоянное совершенствование, остается недостаточным для воспроизведения региональных особенностей атмосферной циркуляции, связанных с неоднородностями подстилающей поверхности. Один из способов уточнения данных глобальных моделей – динамическая регионализация. В региональной модели климата в качестве входных данных используются результаты глобального моделирования. Входные данные с низким пространственным разрешением являются граничными условиями на боковых границах расчетного домена. Для внутренней области домена интегрирование проводится уже с повышенным пространственным разрешением, которое позволяет учесть региональные особенности подстилающей поверхности (например, топографию, характеристики почвы и растительности) и очертания береговой линии. В отличие от глобальных моделей, в которых не учитываются эти локальные климатообразующие факторы, в региональной модели воспроизво-

дится мезомасштабная атмосферная циркуляция, включая долговременные процессы в климатической системе.

Применение региональных моделей для изучения климата Черноморско-Каспийского региона особенно актуально, так как недостаточное пространственное разрешение глобальных моделей не позволяет реалистично воспроизвести климат региона с таким сложным рельефом.

В последние годы региональные модели активно применяются для построения проекций изменений климата в связи с антропогенным воздействием. Коллективом авторов опубликовано несколько работ по моделированию климата Черноморского региона с использованием модели *HadRm3P (PRECIS)* [1, 2]. В рамках совместного проекта Морского гидрофизического института (МГИ) и ИВМ РАН данные работы были продолжены с применением более современных моделей климата *INMCM4* и *RegCM4*. Использование нескольких моделей для изучения изменений климата важно по многим причинам, основной из которых является возможность применения статистических ансамблевых методов. На первом этапе при использовании региональной модели проводится ее валидация по известным данным климата прошлых лет с целью отладки и выбора оптимальных схем параметризации подсеточных процессов. В данной работе описываются результаты валидации региональной модели с использованием входных данных глобального ретроспективного анализа атмосферной циркуляции. В нашем случае для региональной модели в качестве входных использовались данные реанализа *ERA-Interim* за 1979 – 2013 гг. Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (*ECMWF*).

Полученный массив данных может быть использован для решения ряда важных научных и прикладных задач. К таковым, например, относятся вопросы изменчивости регионального климата и его связей с глобальными климатическими индексами, климатические характеристики мезомасштабной динамики атмосферы и взаимодействия атмосферы и океана на региональных масштабах, статистические характеристики экстремальных явлений погоды, прикладные вопросы ветровой и солнечной энергетики. Кроме того, полученные данные могут служить входными полями для гидродинамических моделей Черного моря. Их повышенное пространственное разрешение позволяет корректно учесть атмосферное воздействие и более точно воспроизвести физические процессы в море.

#### **Описание модели *RegCM4* и входных данных реанализа *ERA-Interim*.**

В данной работе была использована региональная модель климата *RegCM* версии 4, разработанная в Международном центре теоретической физики им. Абдуса Салама (*ICTP – Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics*) [3]. Четвертая версия этой модели является одной из современных моделей и широко применяется для воспроизведения климата многих регионов мира. Она использовалась также в известных проектах по оценке и сравнению региональных моделей: *PRUDENCE (Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects)* [4], *ENSEMBLES (Ensemble-Based Predictions of Climate Changes and Their Im-*

*pacts*) [5], *CECILIA* (*Central and Eastern Europe Climate Change Impact and Vulnerability Assessment*) [6], *CORDEX* (*Coordinated Regional Downscaling Experiment*) [7], *NARCCAP* (*North American Regional Climate Change Assessment Program*) [8] и др. В серии других работ модель *RegCM4* была применена для моделирования климата Восточного Средиземноморья [9, 10]. В данной работе модель адаптирована для территории, включающей Черное и Каспийское моря, Балканский п-ов, Украину, Кавказ и юг европейской части России.

В основу региональной модели положена конечно-разностная схема решения нелинейных трехмерных уравнений термогидродинамики атмосферы в гидростатическом приближении. Используются явная схема с расщеплением по времени, формулировка которой не претерпела значительных изменений по сравнению с предыдущими версиями модели [11, 12], «расштанная» по пространству сетка Аракавы типа *B* и вертикальные  $\sigma$ -координаты. В модели заданы 18 вертикальных  $\sigma$ -уровней. Ее пространственное разрешение –  $25 \times 25$  км, шаг по времени – 1 мин. Динамическая схема региональной модели соответствует схеме широко известной мезомасштабной модели *MM5* [13], которая активно применяется в МГИ для оперативного прогноза погоды в Черноморском регионе.

В модели *RegCM4* используется набор современных схем параметризации подсеточных физических процессов, т. е. тех, которые не разрешаются явно на модельной сетке. Для расчета некоторых процессов есть возможность выбора из нескольких альтернативных схем. Была выбрана конфигурация схем параметризации, рекомендуемая как наиболее подходящая для большинства регионов. Для параметризации турбулентного перемешивания в пограничном слое атмосферы применяется модификация схемы с нелокальным замыканием *Holtslag* [14]. Процессы кучевой конвекции и конвективные осадки рассчитываются по смешанной схеме: в соответствии с рекомендациями разработчиков [15] для суши была выбрана схема *Grell* [16] с замыканием [17], а для моря – схема *Emanuel* [18]. Параметризация крупномасштабной облачности и атмосферных осадков выполняется по методике, предложенной в работе [19]. В основу схемы расчета для облачности положен традиционный диагностический подход, когда доля ячейки, занятая облаками, рассчитывается в зависимости от относительной влажности. При расчете крупномасштабных осадков учитываются процессы аккреции и испарения дождевых капель. Для параметризации радиационных потоков в модели *RegCM4* применяется адаптированная схема *Kiehl* [20, 21] из глобальной модели *CCM3*. В качестве входных параметров в схеме используются значения облачности и концентраций радиационно-активных газов и водяного пара. В модель также включена схема параметризации процессов в верхнем слое почвы *BATS* (*Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme*) [22]. По этой схеме рассчитываются количество снега, температура и влагосодержание в почве, что позволяет корректно воспроизвести особенности взаимодействия атмосферы и подстилающей поверхности.

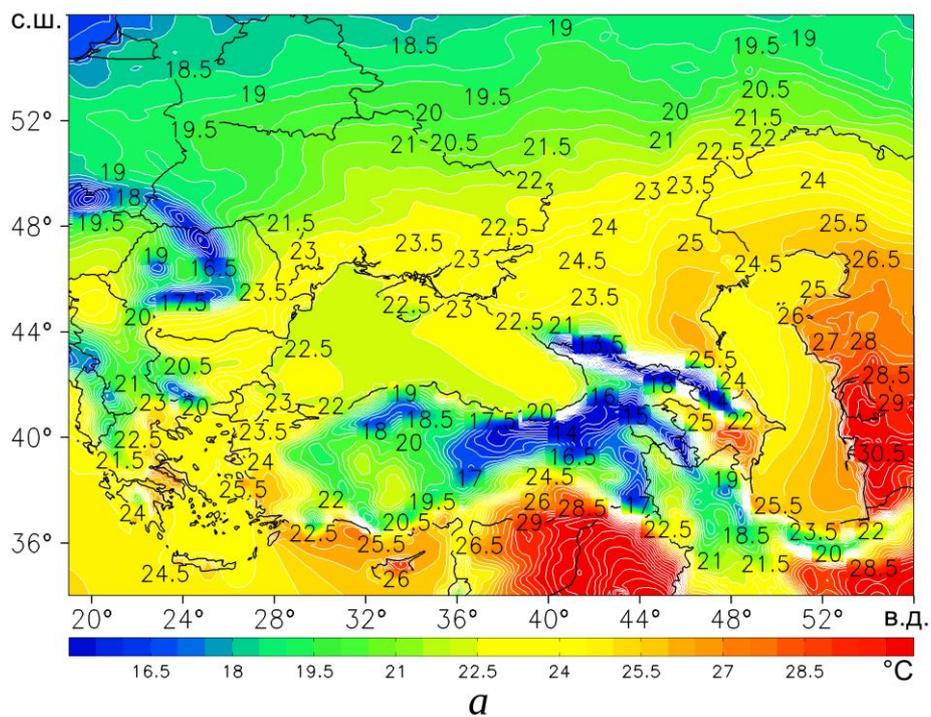
Как уже указывалось, в качестве граничных условий региональной модели использовались данные реанализа *Era-Interim* [23] за 1979 – 2013 гг. с про-

пространственным разрешением  $0,75 \times 0,75^\circ$ . На боковой границе пространственного домена в буферной зоне, которая занимает область в 12 модельных ячеек, происходит ассимиляция подготовленных данных глобального реанализа. Данные по температуре, влажности, скорости ветра и приземному давлению ассимилируются путем введения в прогностические соотношения экспоненциальных релаксационных членов. Поскольку единого массива данных по температуре поверхности моря (ТПМ) за 1979 – 2013 гг. пока нет, то для периода 1979 – 1981 гг. брались средние месячные значения ТПМ из массива *GISST*, а для периода 1982 – 2014 гг. — средние недельные значения из массива *OISST*. В обоих случаях пространственное разрешение полей ТПМ составляло  $1 \times 1^\circ$ . Использование данных реанализа, наиболее точно описывающих реальные погодные условия прошлых лет, позволяет, с одной стороны, выполнить отладку и верификацию региональной модели и, с другой стороны, восстановить поля атмосферной циркуляции с высоким пространственным разрешением. Полученный массив данных, после всестороннего анализа, может быть использован для решения ряда научных и прикладных задач.

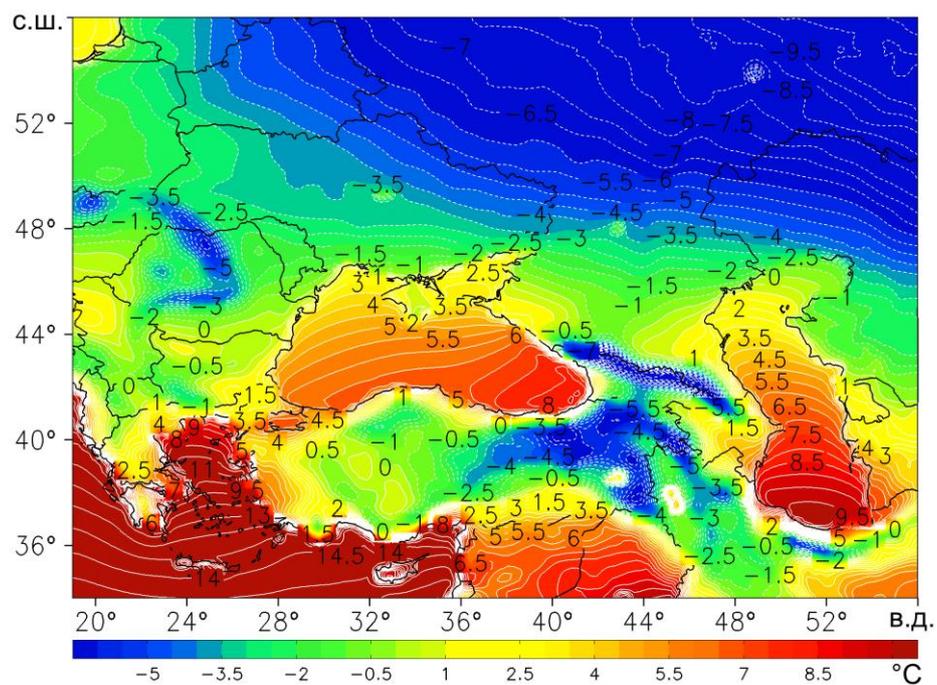
При сравнении результатов расчетов по региональной модели и данных глобального реанализа выполнялась процедура интерполяции данных *Era-Interim* на более мелкую сетку методом Бесселя.

**Результаты численных расчетов.** Качество регионального моделирования определяется способностью моделей вносить полезный мезомасштабный сигнал (*added value*) в поля глобальных моделей, сохраняя при этом интегральные климатические характеристики. Во внутренней области расчетного домена региональные модели, в которых используется подход с ассимиляцией данных в буферной зоне, воспроизводят собственную атмосферную циркуляцию, что и позволяет внести в исходные поля полезный сигнал. Таким образом, первоочередной задачей при региональном моделировании является сравнение входных и выходных полей модели.

**Температура.** Рассмотрим прежде всего особенности воспроизведения региональной моделью температурного режима в Черноморско-Каспийском регионе. Здесь и в дальнейшем будем рассматривать распределения климатических параметров для двух сезонов – летнего (июнь, июль, август) и зимнего (декабрь, январь, февраль). Важно отметить, что значения температуры воздуха напрямую ассимилируются региональной моделью в буферной зоне, но для внутренней области пространственного домена рассчитывается собственная атмосферная циркуляция, что и позволяет уточнить температуру для внутренней области по сравнению с входными данными. Так как данные наблюдений для внутренней области не ассимилируются, возможны некоторые отклонения от интегральных характеристик входного сигнала. На рис. 1, *а*, *б* представлены сезонные распределения значений температуры воздуха на высоте 10 м по данным региональной модели. В летний сезон разброс значений температуры в регионе значительно меньше по сравнению с зимним.



**a**

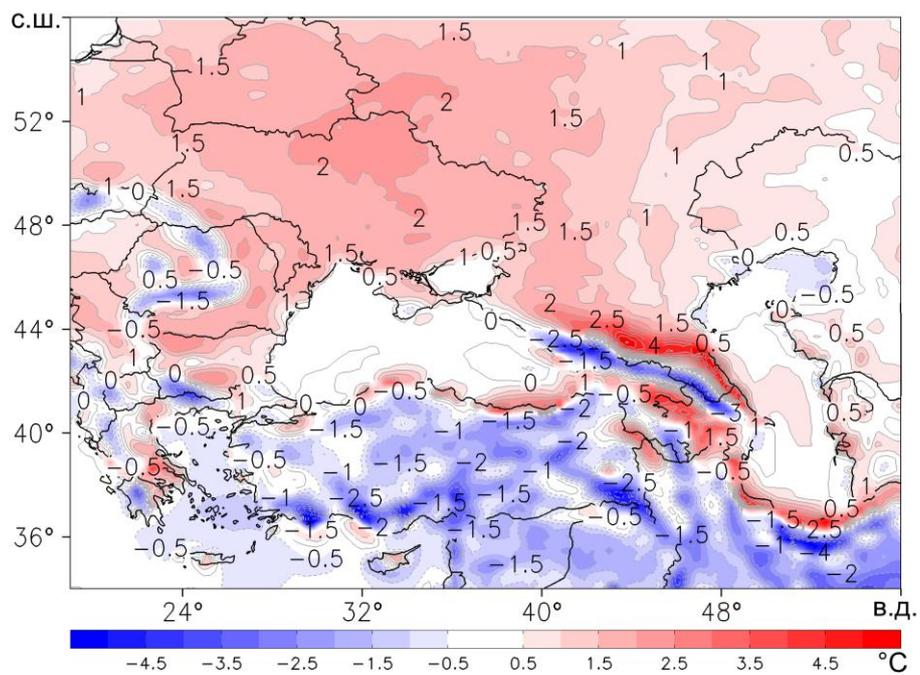


**б**

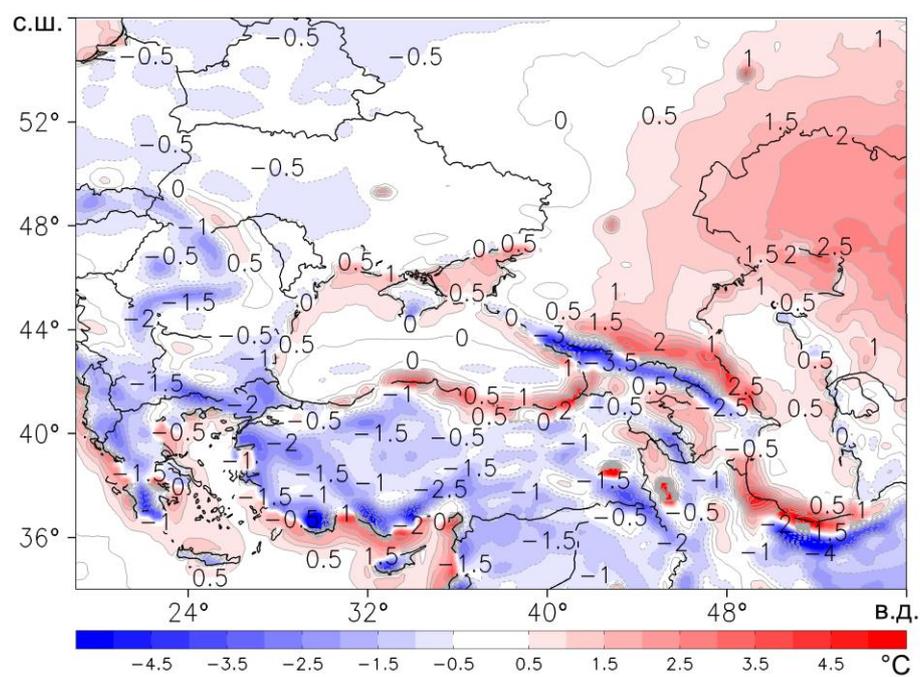
**Рис. 1.** Значения приземной температуры воздуха (°C) по данным модели *RegCM4* за 1979 – 2013 гг. для лета (*a*) и зимы (*б*)

Тем не менее выделяются температурные аномалии, связанные с Карпатскими, Кавказскими и Понтийскими горами. Эти аномалии отсутствуют в исходных полях глобального реанализа. Летние значения температуры воздуха меняются от 19°C в северных областях пространственного домена до более 30°C на материковой части юга домена и на восточном побережье Каспийского моря. В европейской части расчетной области максимальные значения температуры воздуха летом приходятся на Северный Кавказ и западное побережье Каспия. Выделяется засушливая зона в Северном Причерноморье, Приазовье и в Крыму, средние значения температуры воздуха достигают здесь 23 – 24°C. В зимний сезон температурные градиенты в рассматриваемой области более значительны. В северо-восточной зоне домена температура зимой опускается до –10°C, постепенно повышаясь к юго-западу. В прибрежных областях существенно влияние Черного и Каспийского морей – здесь в большинстве районов зимние значения температуры уже выше нулевой отметки. Способность воспроизводить температурный режим в таких небольших прибрежных зонах необходимо отметить как один из важных аргументов для использования региональных моделей. Разрешение глобальных моделей пока не позволяет корректно воспроизвести климатический режим на подобных пространственных масштабах.

На рис. 2, *а, б* показаны среднесезонные распределения разностей между выходными и входными данными в полях приземной температуры воздуха. В зимний сезон разности невелики – различия наблюдаются главным образом в высокогорных и прибрежных областях. Как уже указывалось, это связано с тем, что многие объекты рельефа, в сущности, отсутствуют в глобальной модели. На территории Анатолийского п-ова в основном отмечается занижение температуры по данным региональной модели. Это также, как правило, связано с различиями в орографии в двух моделях. В области к северу от Каспийского моря модель завышает сезонные значения температуры воздуха на 1,5 – 2°C. Летом расхождения данных по температуре воздуха более значительны. Практически во всей северной области пространственного домена температура воздуха завышается на 1,5 – 2°C. Этот эффект наблюдается в равнинных областях и не связан с различиями в модельной орографии. Физические причины завышения температуры требуют отдельного рассмотрения. Но, как правило, ошибки в воспроизведении температурного режима в летний сезон связаны с недостатками схем параметризации облачного покрова и неточностями расчетов радиации. В пользу этого предположения говорит и занижение количества летних осадков в северных областях домена, о чем будет сказано ниже. Отметим, что недостатки в виде завышения значений приземной температуры летом присущи многим моделям, отмечались они и в работах по моделированию климата Черноморского региона с использованием модели *HadRm3P (PRECIS)* [2]. В целом величина расхождений лежит в допустимом диапазоне и не превышает расхождений, полученных в расчетах по другим моделям и для других регионов (см., например, проект *NARCCAP* [8]).



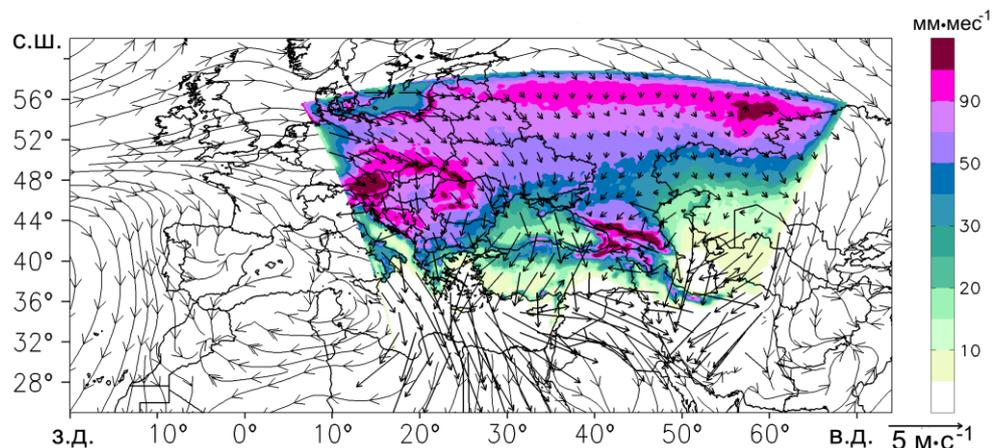
**а**



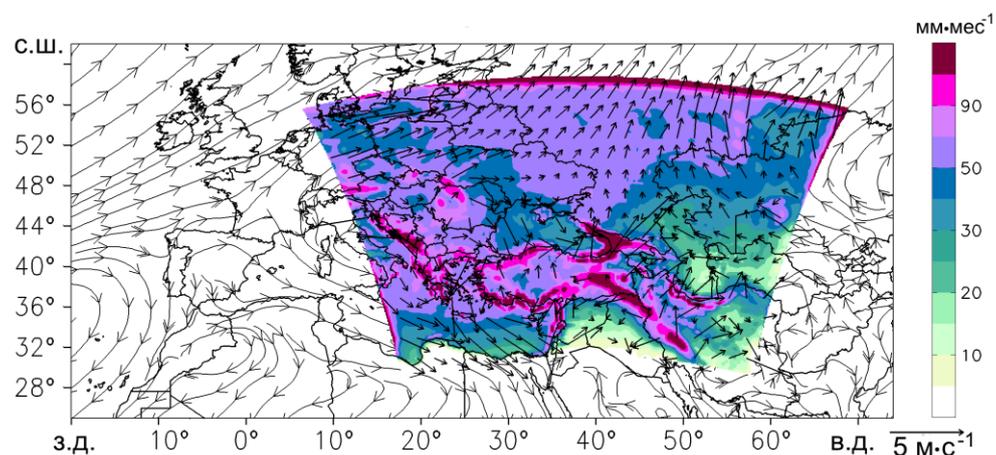
**б**

**Рис. 2.** Среднесезонные разности значений приземной температуры воздуха (°C) по выходным данным модели *RegCM4* и входным данным реанализа *ERA-Interim* за 1979 – 2013 гг. для лета (*а*) и зимы (*б*)

**Атмосферные осадки.** Рассмотрим особенности модельного режима осадков. На рис. 3 показаны воспроизведенные по модели значения количества осадков в Черноморско-Каспийском регионе и линии тока среднесезонной скорости ветра для Европейского региона по данным реанализа *Era-Interim*.



**а**



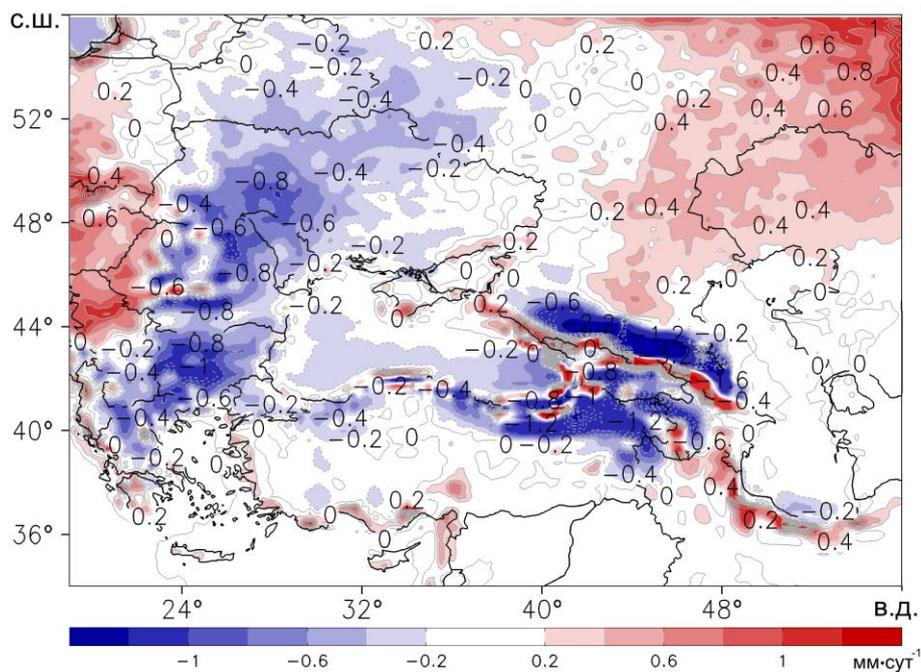
**б**

**Рис. 3.** Линии тока среднесезонной приповерхностной скорости ветра по данным реанализа *ERA-Interim* (внешняя область), векторы скорости ветра на высоте 10 м и количество атмосферных осадков ( $\text{мм}\cdot\text{мес}^{-1}$ ) по данным модели *RegCM4* за 1979 – 2013 гг. для лета (*а*) и зимы (*б*)

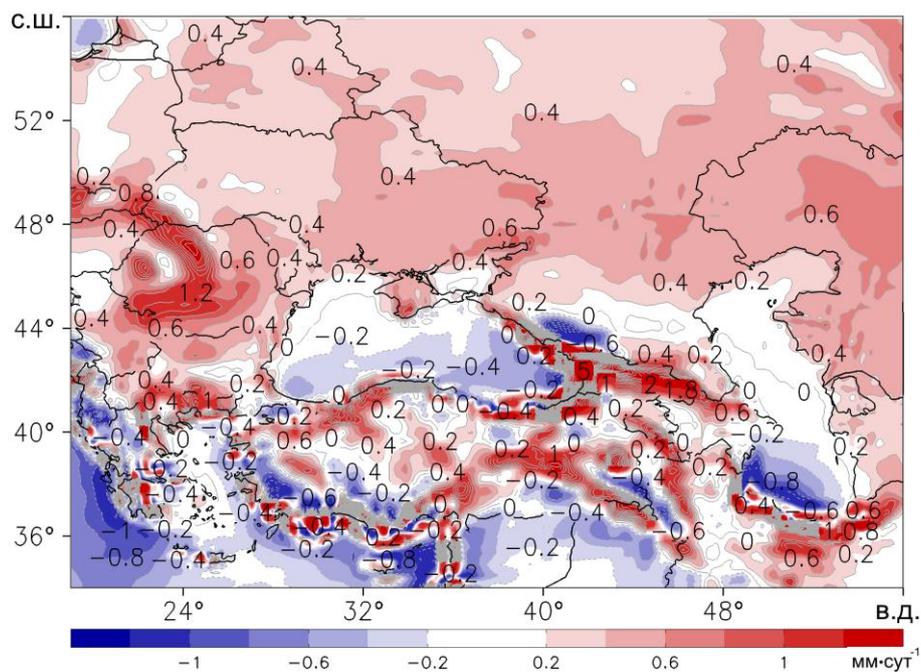
В расчетном домене скорость ветра показана векторами, среднесезонные значения количества осадков – цветом. Так же как и для температуры, данные о скорости ветра ассимилируются в буферной области модели, поэтому поле ветра во внутренней области (рис. 3) является «продолжением» крупномасштабной структуры ветровой циркуляции. Распределения атмосферных осадков для лета и зимы выглядят реалистично. Наибольшие значения количества осадков наблюдаются в высокогорных областях. Над акваториями

Черного, Каспийского и Эгейского морей в летний сезон осадков меньше, чем над окружающими территориями, – это связано с известным эффектом ослабленной конвективной активности над относительно прохладной водной поверхностью [24]. Во всей южной части пространственного домена летом осадки невелики и не превышают  $10 - 15 \text{ мм} \cdot \text{мес}^{-1}$ . Лишь в северных областях Анатолийского п-ова по модельным расчетам отмечаются значительные осадки. Увеличение количества осадков здесь также связано с особенностями орографии, т. е. с подъемом более влажного и холодного воздуха, поступающего с Черного моря. В летний период над Черным морем по модельным данным наблюдаются в основном северные ветры, что согласуется с предыдущими результатами [1]. Конечно, необходимо более подробное изучение воспроизведенных региональных особенностей атмосферной циркуляции над морем и окружающими горами. Для зимнего сезона модель воспроизводит более интенсивное осадкообразование в южных областях. Климатическая атмосферная циркуляция на юге домена преимущественно определяется ветрами с запада, которые приносят теплый и влажный воздух со Средиземноморья. В результате на западных подветренных склонах Динарского нагорья, Кавказских и Таврских гор возникают области повышенного осадкообразования. В северных частях домена, напротив, в зимний период осадков меньше по сравнению с летним сезоном.

Рассмотрим различия в режимах осадков по региональной модели и данным глобального реанализа. Необходимо подчеркнуть, что данные об осадках из реанализа *ERA-Interim* не ассимилируются в региональной модели. Атмосферные осадки – диагностический модельный параметр, а численные схемы параметризации процессов осадкообразования, вообще говоря, существенно различаются в различных моделях и в значительной степени зависят от пространственного разрешения. В то же время в реанализе *ERA-Interim* ассимилируются данные натурных и дистанционных наблюдений, поэтому его можно, с определенными ограничениями, использовать в качестве контрольного массива. На рис. 4 показаны среднесезонные разности количества осадков по данным региональной модели и глобального реанализа, а на рис. 5, *a* – годовой ход суммарного количества осадков, осредненного для северной ( $47 - 54^\circ \text{ с. ш.}, 24 - 48^\circ \text{ в. д.}$ ) и южной ( $35 - 42^\circ \text{ с. ш.}, 24 - 48^\circ \text{ в. д.}$ ) частей расчетной области. Как и для других параметров, наиболее существенные различия прослеживаются для горных районов. В летний сезон осадки на Кавказе по модели *RegCM4* более слабые, чем по данным *ERA-Interim*. В восточной части Балканского п-ова, в Карпатах и Центральной Украине модель несколько занижает количество осадков. Различия существенны как по абсолютной величине (в некоторых областях до  $0,6 - 0,8 \text{ мм} \cdot \text{сут}^{-1}$ ), так и в процентном отношении (в некоторых районах Карпат различие составляет до 30%). Различия в режиме осадков оказывают влияние на завышение летней температуры региональной моделью в этих областях. В южной части расчетной области модель также несколько занижает количество осадков (рис. 5, *a*), но по абсолютной величине различие невелико. На северо-востоке домена региональная модель, напротив, воспроизводит более интенсивные осадки (количество осадков по сравнению с данными реанализа *ERA-Interim* больше на  $0,2 - 0,4 \text{ мм} \cdot \text{сут}^{-1}$ ).

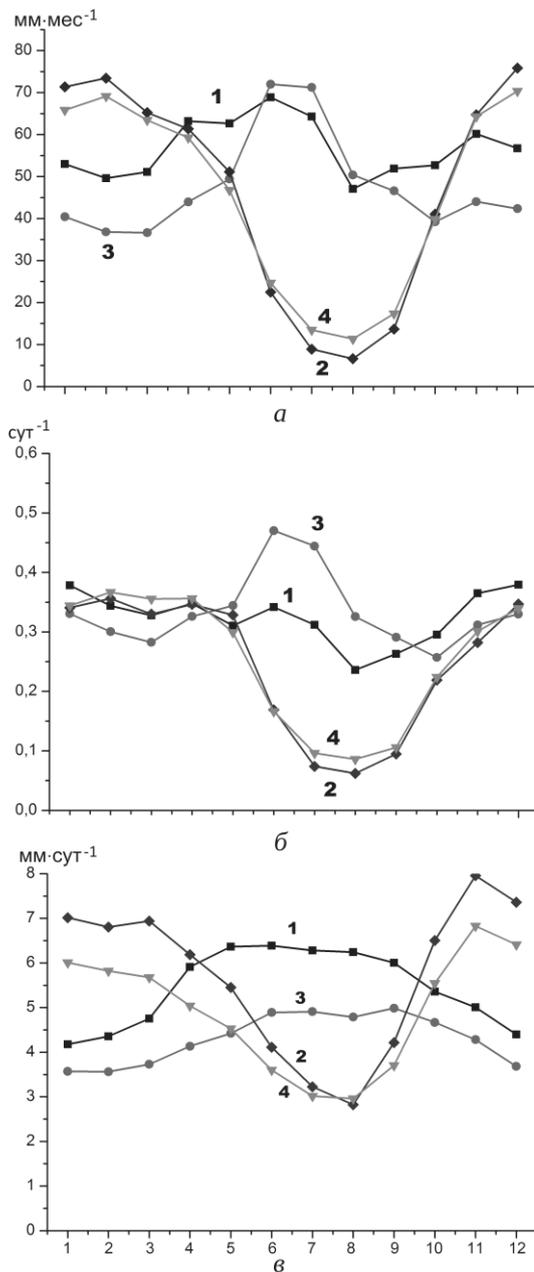


**а**



**б**

**Рис. 4.** Среднесезонные разности количества атмосферных осадков ( $\text{мм}\cdot\text{мес}^{-1}$ ) по выходным данным модели *RegCM4* и входным данным реанализа *ERA-Interim* за 1979 – 2013 гг. для лета (*а*) и зимы (*б*)



**Рис. 5.** Годовой ход суммарного количества осадков,  $\text{мм}\cdot\text{мес}^{-1}$  (а), их частоты,  $\text{сут}^{-1}$  (б) и интенсивности,  $\text{мм}\cdot\text{сут}^{-1}$  (в), осредненных для северной (1) и южной (2) частей пространственного домена по выходным данным модели *RegCM4* и для северной (3) и южной (4) частей по входным данным реанализа *ERA-Interim* за 1979 – 2013 гг.

Зимой (рис. 4, б) различия в режимах осадков более существенны. В обширной северной области по региональной модели воспроизводится значительно больше осадков. Величины разности достаточно равномерно распределены по пространству (хотя в горах различие более существенно), что позволяет говорить о некой систематической ошибке. В зимний сезон количество осадков по региональной модели превышает данные реанализа на  $0,4 \text{ мм}\cdot\text{сут}^{-1}$  для территории от Центральной Украины до запада Казахстана. Как видно из рис. 5, а, данное завышение характерно не только для зимнего, но и для весеннего и осеннего сезонов.

Для более детального рассмотрения режима осадков по двум моделям были рассчитаны также частота и интенсивность атмосферных осадков. На рис. 5, б, в показан годовой ход их значений, осредненных для северной и южной частей домена. Частота рассчитывалась как относительная повторяемость влажных суток. При определении влажных суток был выбран общепринятый порог в  $1 \text{ мм}\cdot\text{сут}^{-1}$ . Аналогично интенсивность рассчитывалась как среднее количество осадков во влажные сутки. Было установлено, что в случае летнего, более сухого, режима в северной части домена происходит занижение повторяемости осадков. Это может быть связано с недостатками схемы параметризации конвекции, поскольку именно конвективные осадки в летний сезон в модели преобладают.

Завышение количества осадков в северной части расчетной области происходит именно за счет усиления их интенсивности (рис. 5, *в*), так как частота осадков по данным реанализа примерно соответствует частоте, полученной по модели *RegCM4*, в течение всего года, за исключением летнего периода. В целом интенсивность осадков по данным региональной модели существенно превосходит интенсивность осадков по данным реанализа на протяжении всего года. Не приводя данных, отметим, что в холодное время года это связано с более интенсивными крупномасштабными (неконвективными) осадками, которые преобладают в этот период.

На недостатки схемы параметризации и слишком интенсивные зимние осадки, рассчитанные по модели *RegCM4*, указывали и другие авторы [25]. Также существуют работы, посвященные экспериментам по определению чувствительности модели к изменению входных параметров с целью поиска оптимальной конфигурации этой численной схемы [15]. Если различия в воспроизведении осадков над горами естественным образом связаны с разностью в высотах рельефа в *ERA-Interim* и *RegCM4*, то в равнинных областях эти различия обусловлены уже несовершенством численных схем самой модели. В нашем случае наибольшая погрешность при воспроизведении осадков в равнинной части домена, как уже указывалось, возникает в северной области в осенние и зимние месяцы (рис. 5), когда модель завышает крупномасштабные (неконвективные) осадки. Таким образом, первоочередной задачей является подгонка схемы расчета неконвективных осадков *SUBEX* в модели *RegCM4* к нашим условиям. Согласно работе [26], схема *SUBEX* наиболее чувствительна к коэффициентам  $C_{\text{evap}}$ , который задает скорость испарения осадков во время выпадения, и  $Q_{\text{th}}$ , определяющему пороговое значение для концентрации облачных капель, при котором образуются дождевые капли. Увеличение этих коэффициентов, очевидно, приводит к снижению неконвективных осадков.

Предварительные численные эксперименты по настройке схемы *SUBEX* позволили установить, что увеличение коэффициента  $Q_{\text{th}}$  на порядок в среднем приводит к значительному уменьшению осадков в домене, в том числе и в его северной области. Однако поскольку схема *SUBEX* не позволяет задавать переменные по времени коэффициенты, количество осадков уменьшается также и в летние месяцы, когда это нежелательно. Помимо этого, в численных экспериментах выявляется четкая связь между изменениями количества осадков и изменениями приповерхностной температуры: увеличение суммарного количества осадков приводит к снижению температуры и наоборот. В качестве основного вывода можно отметить, что для настройки чис-

ленной схемы необходимы проведение более тщательных численных экспериментов и отладка для каждого отдельного региона. Это представляется темой для дальнейших исследований.

**Заключение.** Региональная численная модель *RegCM4* с повышенным пространственным разрешением  $25 \times 25$  км была применена для воспроизведения климата Черноморско-Каспийского региона. В качестве исходных полей использовались данные глобального реанализа *ERA-Interim*. В результате регионализации восстановлены поля атмосферной циркуляции в регионе с повышенным пространственным разрешением за 1979 – 2013 гг. Полученный массив данных может быть использован для решения целого ряда задач научного и прикладного характера.

С целью валидации региональной модели было выполнено сравнение полученных результатов с входными крупномасштабными данными. Анализ показал, что модель способна корректно воспроизводить климат в регионе, сохраняя при этом исходные интегральные климатические характеристики. Модель воспроизводит основные черты климата, дополняя исходные крупномасштабные поля деталями, связанными с локальными особенностями подстилающей поверхности и береговой черты. В модели реализуются реалистичный годовой ход и сезонные пространственные распределения основных метеорологических характеристик: температуры, осадков, ветровой циркуляции. В качестве основных недостатков следует указать завышение количества атмосферных осадков в осенне-зимний период в северной части пространственного домена на 25 – 30% и завышение летней температуры воздуха в этом же регионе на  $1,5 - 2^\circ\text{C}$ . Дальнейший анализ показал, что увеличение количества осадков происходит в основном в результате завышения их интенсивности, в то время как рассчитанная частота осадков примерно соответствует входным данным; следовательно, необходима оптимизация схемы параметризации атмосферных осадков.

Исследование выполнено при финансовой поддержке в рамках совместного проекта РФФИ и ГФФИ Украины № Ф53/95-2013. Авторы также благодарны коллективу разработчиков модели *RegCM4*.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *Ефимов В.В., Белокопытов В.Н., Анисимов А.Е.* Оценка составляющих водного баланса Черного моря // Метеорология и гидрология. – 2012. – № 12. – С. 69 – 76.
3. *Giorgi F., Anyah R.O.* The road towards RegCM4 // Clim. Res. – 2012. – 52. – P. 3 – 6.

4. *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.
5. *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.
6. *Halenka T. Cecilia* – EC FP6 Project on the Assessment of Climate Change Impacts in Central and Eastern Europe // *Global Environmental Change: Challenges to Science and Society in Southeastern Europe.* – Netherlands: Springer, 2010. – P. 125 – 137.
7. *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.
8. *Mearns L.O., Arritt R., Biner S. et al.* The North American regional climate change assessment program: Overview of phase I results // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* – 2012. – 93, № 8. – P. 1337 – 1362.
9. *Önol B., Semazzi F.H.M.* Regionalization of climate change simulations over the eastern Mediterranean // *J. Clim.* – 2009. – 22, № 8. – P. 1944 – 1961.
10. *Bozkurt D., Turuncoglu U., Sen O.L. et al.* Downscaled simulations of the ECHAM5, CCSM3 and HadCM3 global models for the eastern Mediterranean – Black Sea region: evaluation of the reference period // *Clim. Dyn.* – 2012. – 39, № 1 – 2. – P. 207 – 225.
11. *Giorgi F., Marinucci M.R., Bates G.T.* Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part I: Boundary-layer and radiative transfer processes // *Mon. Wea. Rev.* – 1993. – 121, № 10. – P. 2794 – 2813.
12. *Giorgi F., Marinucci M.R., Bates G.T. et al.* Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part II: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions // *Ibid.* – P. 2814 – 2832.
13. *Grell G.A., Dudhia J., Stauffer D.R.* A description of the fifth-generation Penn State / NCAR mesoscale model (MM5) // *NCAR Tech. Note.* – 1995. – 131 p.
14. *Holtslag A., de Bruijn E., Pan H.L.* A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting // *Mon. Wea. Rev.* – 1990. – 118, № 8. – P. 1561 – 1575.
15. *Giorgi F., Coppola E., Solmon F. et al.* RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains // *Clim. Res.* – 2012. – 52. – P. 7 – 29.
16. *Grell G.A.* Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations // *Ibid.* – 1993. – 121, № 3. – P. 764 – 787.
17. *Arakawa A., Schubert W.H.* Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment. Part I // *J. Atmos. Sci.* – 1974. – 31, № 3. – P. 674 – 701.
18. *Emanuel K.A.* A scheme for representing cumulus convection in large-scale models // *Ibid.* – 1991. – 48, № 21. – P. 2313 – 2329.
19. *Pal J.S., Small E.E., Eltahir E.A.B.* Simulation of regional-scale water and energy budgets: Representation of subgrid cloud and precipitation processes within RegCM // *J. Geophys. Res. Atmos.* – 2000. – 105, № D24. – P. 29579 – 29594.
20. *Kiehl J.T., Hack J.J., Bonan G.B. et al.* Description of the NCAR community climate model (CCM3). – Tech. Rep. TN-420+STR, National Center for Atmospheric Research, 1996. – 152 p.
21. *Giorgi F., Mearns L.O.* Introduction to special section: Regional climate modeling revisited // *J. Geophys. Res. Atmos.* – 1999. – 104, № D6. – P. 6335 – 6352.
22. *Dickinson R.E., Kennedy P.J., Henderson-Sellers A. et al.* Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as Coupled to the NCAR Community Climate Model. – Tech. Rep. TN-387+STR, National Center for Atmospheric Research, 1993. – 72 p.

23. *Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J. et al.* The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* – 2011. – 137, № 656. – P. 553 – 597.
24. *Ефимов В.В., Анисимов А.Е.* Влияние Черного моря на региональный климат // *Морской гидрофизический журнал.* – 2012. – № 2. – С. 37 – 49.
25. *Torma C., Coppola E., Giorgi F et al.* Validation of a high-resolution version of the regional climate model RegCM3 over the Carpathian Basin // *J. Hydrometeorol.* – 2011. – 12, № 1. – P. 84 – 100.
26. *Elguindi N., Bi X., Giorgi F et al.* Regional Climatic Model RegCM User Manual. Version 4.3. – The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, 2013. – 34 p.

## **Reanalysis of atmospheric circulation for the Black Sea-Caspian region**

**A.E. Anisimov, D.A. Yarovaya, V.S. Barabanov**

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

Results of numerical simulations aimed at dynamic downscaling the *ERA-Interim* reanalysis data for the Black Sea-Caspian region using the *RegCM4* climate model are described. The downscaling results in reconstruction of the atmospheric circulation fields in the region with the increased spatial resolution ( $25 \times 25$  km) for 1979 – 2013. The modeling results are compared with the original large-scale fields with the purpose to validate the regional model. The analysis shows that the model correctly reproduces climate in the region; at that original integral climatic characteristics are retained. Realistic annual cycle and seasonal spatial distribution of main meteorological parameters (temperature, precipitation and wind circulation) are obtained by the model simulations. However, the increased (by 25 – 30%) precipitation in the autumn-winter period and the heightened (by 1.5 – 2°C) air temperature in summer are noted in the northern part of the region. Further analysis shows that the increased precipitation is, mainly, a result of overestimating its intensity, whereas the simulated precipitation frequency approximates the original data. Hence, the scheme of precipitation parameterization requires optimization.

**Keywords:** Black Sea region, Caspian region, climate modeling, regional model, reanalysis.