



DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2019.3.6>

УДК 551.5

ББК 26.237

Дата поступления статьи: 02.04.2019

Дата принятия статьи: 24.06.2019

РАЗВЕРТЫВАНИЕ РЕГИОНАЛЬНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ЮГА РОССИИ НА ОСНОВЕ REGCM 4.5¹

Александр Валентинович Хоперсков

Доктор физико-математических наук,
заведующий кафедры информационных систем и компьютерного моделирования,
Волгоградский государственный университет
khoperskov@gmail.com, infomod@volsu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0149-7947>
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Константин Михайлович Фирсов

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры лазерной физики,
Волгоградский государственный университет
fkf@volsu.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Александр Викторович Титов

Ассистент кафедры информационных систем и компьютерного моделирования,
Волгоградский государственный университет
alexandr.titov@volsu.ru, infomod@volsu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6373-9708>
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Алексей Александрович Размоллов

Аспирант,
Волгоградский государственный университет
alek.razmolov2010@yandex.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Аннотация. В работе описан первый этап развертывания региональной климатической модели для Юга России на основе RegCM 4.5, что требует актуализации набора схем параметризации подсеточных физических процессов

для заданной территории. Моделирование общей циркуляции атмосферы требует высокой скорости счета радиационных характеристик, что предполагает высокую степень параметризации уравнения переноса излучения, в частности, характеристик молекулярного поглощения. Высокая селективность молекулярного поглощения в сравнении с аэрозольным и молекулярным рассеянием в видимом и инфракрасном диапазоне спектра сильно усложняет эту проблему. Подробно описаны схемы расчетов в радиационном блоке RegCM. Показано, что ряды экспонент обеспечивают высокую степень параметризации и высокую точность расчета сопоставимую с методом line-by-line. Наши вычисления потоков длинноволнового излучения с различными версиями спектроскопической базы данных HITRAN показали, что различия между нисходящими потоками на нижней границе атмосферы для лета умеренных широт не превышали 0.1 Вт/м^2 , а для восходящих потоков на верхней границе атмосферы — не более 0.6 Вт/м^2 . Значения восходящего потока на верхней границе атмосферы при использовании спектроскопической базы данных HITRAN2012 дало величину 281.01 Вт/м^2 , а для нисходящего потока — 351.16 Вт/м^2 . Эти оценки позволяют сделать вывод о том, что современные спектроскопические базы данных обеспечивают высокую точность расчета широкополосных потоков. Для того, чтобы оценить неопределенность в потоках излучения мы использовали модель континуального поглощения паров H_2O , которая применялась во всем длинноволновом спектральном диапазоне, за исключением окна прозрачности $830\text{--}1130 \text{ см}^{-1}$, где она заменялась на разработанную нами модель, основывающуюся на экспериментальных данных. Начальные и граничные условия определяются из глобальной климатической модели European Centre for Medium-Range Weather Forecast's ERA-Interim (EIN15), а для задания температуры поверхности морей применяются данные Indian Ocean Sea Surface Temperature (IOSST). Этап верификации включает: анализ выбора вычислительной области, определение точности вертикальных профилей параметров, сравнение температурных полей с использованием данных наблюдений. Для оценки качества региональных климатических моделей мы предлагаем анализировать возможность появления особых метеорологических событий, прежде всего, связанных с сильными осадками. Такой подход представляется более надежным по сравнению с традиционным рассмотрением распределений температуры.

Ключевые слова: климатическое моделирование, региональные климатические модели, ассимиляция данных, эффективность распараллеливания.

Введение

Повышение точности прогноза климатических изменений для отдельных регионов представляется фундаментальной междисциплинарной проблемой. Изменчивость климатической системы на различных пространственных и временных масштабах является важнейшим ее свойством. Для большого числа практически важных задач необходимо знать о возможных тенденциях изменения метеорологического и климатического состояния и иметь количественные оценки этих вариаций.

Развертывание пакета программ для моделирования регионального климата Regional Climate Model v.4 (RegCM4) требует актуализации набора схем параметризации подсеточных физических процессов для моделируемой территории, определение граничных условий на основе ассимиляции данных глобального реанализа и данных, полученных в рамках других региональных моделей, в нашем случае для Азовско-Черноморского региона [14]. Для повышения качества региональных климатических изменений в условиях континентального и сухого климата подсеточные модели должны быть дополнены новыми методами и алгоритмами для расчетов потоков излучения, скорости радиационного нагрева, обеспечивающие высокую скорость и точность вычислений, сопоставимую с прямыми методами расчета. Развертывание системы региональных климатических моделей в дополнение к глобальной климатической модели [45], основывающейся на общей циркуляции атмосферы и океана, представляется в настоящее время основным направлением повышения качества прогнозов за счет повышения пространственного разрешения, учета региональных особенностей подстилающей поверхности (свойства почвы и растительности, водоемы, орография), специальной настройки наборов схем параметризации подсеточной физики, которая наилучшим образом учитывает зональные особенности (см., например, [7; 20; 31; 36; 39; 47]).

Результаты прогнозов в рамках региональных климатических моделей могут в свою очередь выступать основой для последующего реанализа при построении РКМ для соседних территорий или последующих уточнений РКМ с более лучшим разрешением, в частности, возможно выходя за рамки приближения с гидростатическим вертикальным равновесием. Глобальные климатические модели (ГКМ) за счет все усиливающейся вычислительной мощности компьютеров и повышения качества математических моделей имеют типичное разрешение 50–100 км. Эффективным способом повышения точности прогноза является использование РКМ с разрешением до 25–10 км и учет региональных особенностей для подсеточной физики. Отметим, что ГКМ сильно упрощают параметризацию процессов гидрологического цикла суши [2], что не позволяет делать прогнозы о водном режиме речных систем [37]. Для оценки гидрологических последствий изменения климата используют специальные региональные модели формирования речного стока, примером такого программного комплекса является ЕСОМАГ [4]. Такой подход реализован для бассейна реки Амур [2] для оценки эффективности действующих и планируемых водохранилищ на реках.

Практика расчетов с РКМ указывает на новые предсказательные возможности региональных моделей, например, открытие пространственно-неоднородных изменений ветро-волнового режима в арктических областях [39]. Важным является изучение влияния наблюдаемых и ожидаемых в будущем изменений климата на безопасность и эффективность работы различных промышленных объектов, в частности, производителей энергии на ТЭС, АЭС, ГЭС [10]. Отметим возможности, связанные с проектами «зеленой энергетики», которые существенно зависят от климатических условий и являются очень долговременными [15], трудно переоценить роль таких прогнозов для сельского хозяйства и при принятии решений о крупных проектах [8].

Помимо глобального потепления, которое исследуется на основе глобальных моделей циркуляции, мы имеем разнонаправленные тренды региональных изменений (рис. 1), которые очень важны для принятия решений в различных областях инженерной инфраструктуры, сельскохозяйственного производства, при выборе рекреационных проектов, для оценки состояния природных ландшафтов и особенно речных систем [32; 44].

Важной задачей нашего регионального климатического прогноза является пред-

сказание гидрологического режима Волжского бассейна в целом и состояния Волго-Ахтубинской поймы. В частности, Указ Президента РФ «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» от 7 мая 2018 направлен на решение задачи устойчивого функционирования водохозяйственного комплекса Нижней Волги и сохранение экосистемы Волго-Ахтубинской поймы, для решения которой необходимы надежные долгосрочные прогнозы состояния региональной климатической системы на основе региональной климатической модели (РКМ). Несмотря на сильную зарегулируемость Волги из-за каскада ГЭС, гидрологический режим не может полностью управляться при сильных колебаниях запасов воды в верхних областях течения из-за безопасности водохранилищ и в последнее время все более из-за усиливающейся урбанизации пойменных зон.

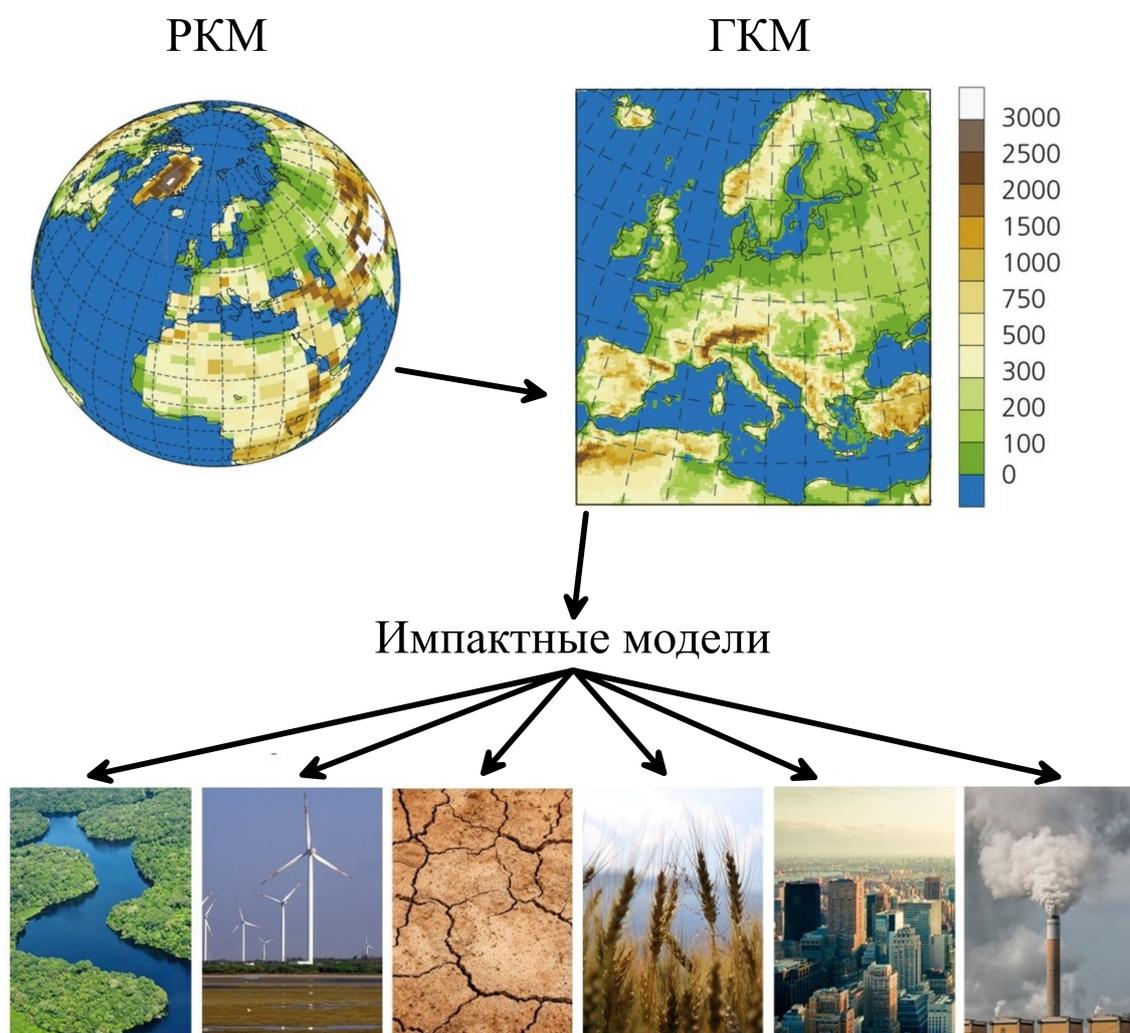


Рис. 1. Области приложений региональных климатических моделей

В работе описан начальный этап развертывания новой региональной климатической модели (РКМ) для территории Юга России с центром в зоне Нижнего Поволжья. Проведена верификация РКМ с использованием различных климатических данных.

1. Модели и условия проведения вычислительных экспериментов

К числу одной из наиболее распространенных РКМ следует отнести RegCM (см. [6; 29; 35; 41]), которая поддерживается International Centre for Theoretical Physics (Trieste, Italy). В настоящее время версия RegCM v4.5 является самой востребованной РКМ прежде всего благодаря системе поддержки разработчиков и большому сообществу пользователей. Выбор модели RegCM обосновывается очень хорошей практикой ее использования для различных регионов: Черноморско -Каспийского региона [1], Западной Сибири [6], Китая [28], Восточного Средиземноморья [24], и других.

1.1. Основные компоненты и структура RegCM

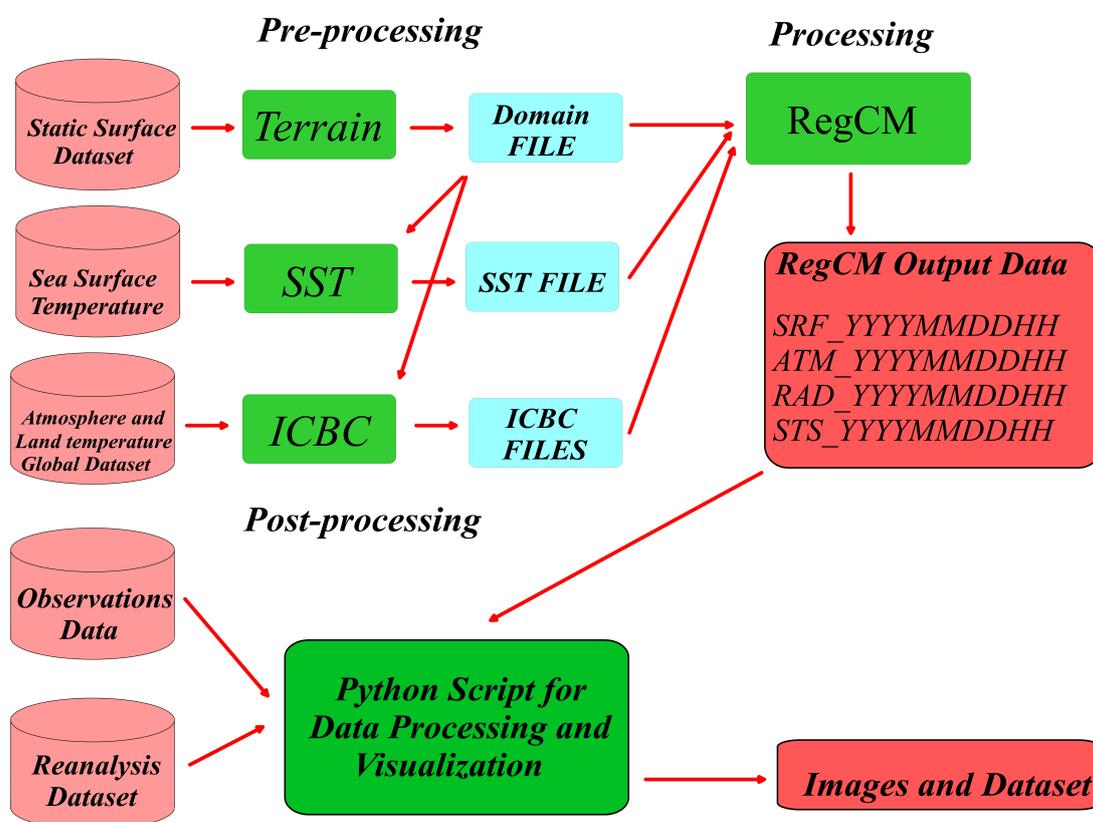


Рис. 2. Схема работы с моделью RegCM

Система моделирования RegCM состоит из пяти основных компонентов: terrain, SST, ICBC, RegCM, Postprocessor. Terrain, SST и ICBC — это три компонента пре-процессора RegCM [42]. Блок terrain выполняет географическую привязку сетки модели посредством задания пространственного разрешения сетки, широты и долготы центральной точки. Модуль SST (Sea Surface Temperature) служит для задания модели океана. Даже в случае удаленности границ расчетной области от океана для запуска РКМ необходимы данные SST. Подпрограмма ICBC (Initial Condition, Boundary Condition) предназначена для задания начальных и граничных условий. Файлы ICBC содержат данные о распределении температуры и давления на уровне подстилающей поверхности,

проекциях скорости ветра, профилях температуры и параметров смеси водяного пара [6] (рис. 2).

Обсудим конфигурацию трехмерной сетки модели. В вертикальном направлении используется безразмерная координата σ , причем вблизи поверхности Земли ($z = 0$) вертикальная координата σ на нижних слоях ($\sigma \sim 2 - 4$) следует за ландшафтом, но с увеличением номера слоя σ -поверхности постепенно сглаживаются, становясь все более плоскими. По определению значение равно 0 сверху и 1 на поверхности земли, остальные уровни σ заданы в конфигурации модели. По умолчанию RegCM позволяет пользователям выбирать из 14, 18 и 23 вертикальных уровней с возможностью изменения вертикальной структуры, устанавливая значения σ во время определения домена. Скалярные переменные (например, температура, давление, компоненты горизонтальной скорости) определяются в центрах ячеек сетки, а компоненты горизонтальной скорости расположены в узлах сетки. Чтобы входные данные соответствовали такому шахматному порядку, происходит интерполирование значений на этапе предварительной обработки прогона модели [42].

Для удобства работы имеется возможность выбора четырех проекций карт:

- полярная стереографическая проекция подходит для высоких широт ($66.0^\circ - 90.0^\circ$ северной и южной широты),
- проекция Ламберта для средних ($23.5^\circ - 66.0^\circ$ северной и южной широты),
- нормальная проекция Меркатора ($0.0^\circ - 23.5^\circ$ северной и южной широты),
- повернутая проекция Меркатора в качестве дополнительного выбора [42].

BATS (Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme) — это модуль, предназначенный для описания роли растительности и влажности почвы в изменении обмена импульса, энергии и водяного пара в атмосфере [42]. Модель включает параметры растительного слоя, снежного покрова, поверхностного слоя почвы толщиной 10 см, слой корневой зоны толщиной 1–2 м и третий глубокий слой почвы толщиной 3 м. Расчеты гидрологии почвы основаны на прогностических уравнениях для содержания воды в разных слоях почвы. В этих уравнениях учитываются осадки, таяние снега, суммарное испарение, инфильтрация ниже корневой зоны и диффузионный обмен воды между слоями почвы [1]. Скорости поверхностного стока выражаются как функции интенсивности осадков и степени насыщенности почвы водой. Глубина снега рассчитывается по снегопаду, таянию снега и сублимации. Ощутимые потоки тепла, водяного пара и импульса на поверхности рассчитываются с использованием формулировки стандартного коэффициента сопротивления поверхности, основанной на теории подобия поверхностного слоя. Коэффициент сопротивления зависит от характерных масштабов неоднородности поверхности и от атмосферной стабильности в поверхностном слое. Скорость поверхностного испарения зависит от наличия воды в почве. В качестве дополнения в региональную климатическую модель RegCM 4.5 в BATS были добавлены два новых типа поверхности для представления городской и пригородной среды [42]. Урбанизация территории не только изменяет поверхностное альbedo и поверхностный энергетический баланс, но также создает зоны непроницаемой поверхности с большими эффектами на сток и суммарное испарение.

В основе РКМ лежат компьютерные модели для расчета состояния климатической системы на основе решения уравнения гидротермодинамики атмосферы с учетом моделей параметризации процессов подсеточных масштабов. Такие уравнения принято называть уравнения гидротермодинамики атмосферы и океана. Гидростатическая модель

использует безразмерную σ -координату для определения вертикальных уровней:

$$\sigma = \frac{p - p_t}{p_s - p_t}, \quad (1)$$

где p_s и p_t — поверхностное и верхнее давление модели, $p_t = \text{const}$. Горизонтальные уравнения импульса определяется уравнениями [30]:

$$\frac{\partial p^* u}{\partial t} = -m^2 \left[\frac{\partial}{\partial x} \frac{p^* u u}{m} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{p^* v u}{m} \right] - \frac{\partial p^* u \dot{\sigma}}{\partial \sigma} - m p^* \left[\frac{\sigma}{\rho} \frac{\partial p^*}{\partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right] + p^* f v + F_H u + F_V u, \quad (2)$$

$$\frac{\partial p^* v}{\partial t} = -m^2 \left[\frac{\partial}{\partial x} \frac{p^* u v}{m} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{p^* v v}{m} \right] - \frac{\partial p^* v \dot{\sigma}}{\partial \sigma} - m p^* \left[\frac{\sigma}{\rho} \frac{\partial p^*}{\partial y} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right] + p^* f u + F_H v + F_V v, \quad (3)$$

где u, v — восточная и северная компоненты скорости, соответственно, φ — геопотенциальная высота, f — параметр Кориолиса, m — масштабный коэффициент проекции, F_H, F_V — учитывают эффекты горизонтальной и вертикальной диффузии соответственно, $p^* = p_s - p_t$, $\dot{\sigma} = \frac{d\sigma}{dt}$.

Температура определяется уравнением [30]:

$$\frac{\partial p^* T}{\partial t} = -m^2 \left[\frac{\partial}{\partial x} \frac{p^* u T}{m} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{p^* v T}{m} \right] - \frac{\partial p^* T \dot{\sigma}}{\partial \sigma} + \frac{R T_v \omega}{c_p (\sigma + p_t/p^*)} + \frac{p^* Q}{c_p} + F_H T + F_V T, \quad (4)$$

где c_p — удельная теплоемкость влажного воздуха при постоянном давлении, Q — диабатический нагрев R — газовая постоянная сухого воздуха. T_v — виртуальная температура. Теплоемкость влажного воздуха при постоянном давлении определяется формула

$$c_p = c_{pd}(1 + 0.8q_v), \quad (5)$$

где c_{pd} — теплоемкость сухого воздуха, q_v — коэффициент смешивания водяного пара. Поверхностное давление определяется выражением:

$$\frac{\partial p^*}{\partial t} = -m^2 \left[\frac{\partial p^* u/m}{\partial x} + \frac{\partial p^* v/m}{\partial y} \right] - \frac{\partial p^* \dot{\sigma}}{\partial \sigma}, \quad (6)$$

или в интегральной форме:

$$\frac{\partial p^*}{\partial t} = -m^2 \int_0^1 \left[\frac{\partial p^* u/m}{\partial x} + \frac{\partial p^* v/m}{\partial y} \right] d\sigma. \quad (7)$$

Вертикальная скорость в $\dot{\sigma}$ -координатах на каждом уровне модели вычисляется из уравнения (6):

$$\dot{\sigma} = -\frac{1}{p^*} \int_0^\sigma \left[\frac{\partial p^*}{\partial t} + m^2 \int_0^1 \left(\frac{\partial p^* u/m}{\partial x} + \frac{\partial p^* v/m}{\partial y} \right) \right] d\sigma', \quad (8)$$

где σ' — переменная интегрирования и $\dot{\sigma}(\sigma = 0) = 0$.

В тепловом уравнении (4) величина $\omega = \frac{dp}{dt}$ определяется выражением

$$\omega = p^* \dot{\sigma} + \sigma \frac{dp^*}{dt}, \quad (9)$$

где

$$\frac{dp^*}{dt} = \frac{\partial p^*}{\partial t} + m \left[u \frac{\partial p^*}{\partial x} + v \frac{\partial p^*}{\partial y} \right]. \quad (10)$$

Гидростатическое уравнение используется для вычисления геопотенциальных высот из виртуальной температуры T_v [30]:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \ln(\sigma + p_t/p^*)} = -RT_v \left[1 + \frac{\sum q_x}{1 + q_v} \right]^{-1}, \quad (11)$$

где $T_v = T(1 + 0.608q_v)$, q_v , q_x — отношения смешивания облачной воды и дождевой воды.

К числу первостепенных задач, возникающих после развертывания РКМ, следует отнести:

- Определение набора схем параметризации подсеточных физических процессов для заданной территории региона, в частности, радиационного блока, турбулентности и конвекции, мелкомасштабной диффузии тепла и влаги, облачности, осадков (в зависимости от типа территории – водоем/суша), турбулентного перемешивания в пограничном слое атмосферы, облачности, радиационных потоков, взаимодействие атмосферы и подстилающей поверхности, тепловлагоперенос в подстилающей поверхности и ее альbedo, испарение влаги, фазовые процессы, содержание аэрозолей и другие факторы.
- Создание программного обеспечения для моделей: а) переноса излучения в солнечном коротковолновом диапазоне спектра, что позволит производить расчеты спектральных и интегральных потоков солнечного излучения, а также скорости радиационного нагрева на разных уровнях по высоте в атмосфере Земли для заданных метеорологических, аэрозольных и облачных условий; б) переноса широкополосного излучения в длинноволновом диапазоне спектра и интеграция в информационную систему, что позволит производить расчеты спектральных и интегральных потоков теплового излучения атмосферы и подстилающей поверхности, а также скорости радиационного нагрева на разных уровнях по высоте в атмосфере Земли для заданных метеорологических, аэрозольных и облачных условий.
- Построение карт распределений параметров подстилающей поверхности, учет орoграфии. Особое внимание должно быть уделено заданию альbedo подстилающей поверхности с учетом сезонных изменений.
- Ассимиляция климатических данных (реанализ, глобальные и региональные климатические модели) для задания граничных условий (использование данных о температуре, давлении, скорости, влажности).
- Настройка региональной климатической модели и валидация РКМ, основываясь на сравнении результатов моделирования с исходными крупномасштабными полями, например, за период 1979–2017.
- Исследовать, как влияет выбор моделируемой территории на результаты прогноза посредством варьирования границ рассматриваемой области. Важность этой задачи обусловлена тем, что если на границе происходящие физические процессы более однородны, то и качество прогноза должно улучшаться.

Более высокое разрешение РКМ по сравнению с ГКМ позволяет использовать большие объемы спектроскопической информации о параметрах линий и сечениях поглощения атмосферных газов, содержащихся в современных базах данных типа HITRAN, преобразуя их в малопараметрические модели.

2. Радиационный блок региональной климатической модели RegCM

Ключевую роль при прогнозировании климата играют радиационные процессы, которые прямо или косвенно связаны с такими факторами, как вариации солнечной постоянной, трансформация свойств подстилающей поверхности, изменения газового и аэрозольного состава атмосферы и другие [5]. Так, например, по оценкам [27], уменьшение в прошлом солнечной постоянной на 1 % провоцировало ледниковые периоды. В настоящее время глобальное изменение климата связывают с возрастанием концентрации парниковых газов CO_2 , CH_4 , N_2O , фреонов. Естественные или антропогенные изменения радиационного баланса атмосферы на ее верхней границе определяют динамику климатической системы Земли. Эти изменения, называемые радиационным форсингом или воздействием, определяются как разность между приходящей коротковолновой радиацией и уходящими коротковолновой и длинноволновой радиацией. Величина этого радиационного форсинга мала в сравнении с приходящими и уходящими потоками излучения и ее среднегодовая величина составляет менее 1 % от величины этих потоков.

Радиационная модель включает следующие процессы взаимодействия электромагнитного излучения (солнечное излучение и собственное излучение Земли и атмосферы): молекулярное поглощение и рассеяние, рассеяние и поглощение аэрозолями и облаками, а также отражение и поглощение поверхностью Земли. Важнейшим параметром, определяющим физические условия на планете, является количество получаемой ею энергии Солнца. Планета поглощает и отражает приходящую энергию излучения. Важной характеристикой планеты является ее интегральное альbedo, которое определяется как отношение восходящего и нисходящего потоков излучения. Планета также генерирует собственное излучение, уходящее в космос. Уравнение баланса можно записать следующим образом:

$$\frac{1}{4}(1 - A) S_0 = \varepsilon \sigma T_S^4, \quad (12)$$

где $A = 0.3 \pm 0.01$ — интегральное альbedo планеты, $S_0 = 1376 \text{ Вт/м}^2$ — Солнечная постоянная, $\varepsilon = 0.62$ — коэффициент излучения системы «атмосфера — поверхность Земли», $T_S = 288 \text{ К}$ — средняя температура Земли. Левая часть уравнения (12) — это энергия системы, полученная от Солнца, а правая часть (12) — собственное излучение атмосферы Земли и подстилающей поверхности, уходящее в космос (закон Стефана — Больцмана для серого тела). Согласно [9] осредненный по земному шару коротковолновый поток излучения от Солнца составляет величину 342 Вт/м^2 , отраженное коротковолновое излучение — 107 Вт/м^2 , а разность между ними 235 Вт/м^2 равна восходящему длинноволновому потоку собственного излучения системы Земля–атмосфера на верхней границе атмосферы. Коротковолновый поток излучения обычно рассчитывают в спектральном диапазоне 0.2–5 мкм, а длинноволновой поток излучения рассчитывается для длин волн больших 3 мкм. Если мы из космоса будем наблюдать Землю и предположим, что она излучает как абсолютно черное тело, тогда согласно (12)

$$F = \sigma T_e^4, \quad (13)$$

что дает $T = 249$ К, а разность $\Delta T = T_S - T_e = 39$ К характеризует парниковый эффект, обусловленный, во-первых, естественным парниковым эффектом за счет поглощения ИК-излучения парниковыми газами H_2O , CO_2 , O_3 , CH_4 , N_2O , во-вторых, атмосферной конвекцией.

В соответствии с (12) изменения температуры возможны при вариациях химического состава атмосферы и прежде всего содержания парниковых газов. Согласно [9] в индустриальную эру (начиная с 1750 г. по настоящее время) долгоживущие парниковые газы, которые связаны с хозяйственной деятельностью, достаточно хорошо изучены и дают положительное радиационное воздействие (2.9 ± 0.3 Вт/м²). Суммарное аэрозольное воздействие, включающее прямой эффект и опосредованный, вызванный изменением альбедо облаков, является отрицательным (-1.3 ± 0.8 Вт/м²). В итоге суммарное радиационное воздействие оценивается в диапазоне $0.6 - 2.4$ Вт/м². Причем наибольшие неопределенности относятся к прямому и косвенному (через образование дополнительной облачности) влиянию влажности и аэрозолей на климат, здесь также важны региональные особенности. Приведенные выше величины дают общее представление о том, какие требования к точности решения уравнения переноса излучения через атмосферу Земли требуется в задачах моделирования климата.

Специфика задач общей циркуляции атмосферы требует высокой скорости вычислений радиационных характеристик, что предполагает высокую степень параметризации уравнения переноса излучения, в частности характеристик молекулярного поглощения. Высокая селективность молекулярного поглощения в сравнении с аэрозольным и молекулярным рассеянием в видимом и инфракрасном диапазоне спектра сильно усугубляет эту проблему. Так, например, характерный масштаб изменения коэффициента молекулярного поглощения сопоставим с полушириной спектральной линии и варьируется от 10^{-1} до 10^{-4} см⁻¹. Для сравнения характерный масштаб в спектре Солнца порядка нескольких см⁻¹ [40]. Еще больший масштаб изменений оптических свойств воды, льда и аэрозолей [3]. В силу этого большие усилия многих исследователей были направлены на создание высокоэффективных моделей расчета характеристик молекулярного поглощения, которые бы обеспечивали высокую степень параметризации без потери точности. Сложность данной задачи состоит в том, что надо объединить взаимоисключающие требования: высокая точность и высокая степень параметризации, для обеспечения высокого быстродействия. Согласно User's Guide Version 4.5 в региональной модели RegCM используется радиационная схема NCAR CCM3, которая детально описана в работе Kiehl et al [21] и основывается на моделях полос поглощения. Модели полос основываются на идеализированном описании спектров поглощения атмосферных газов и позволяют обеспечить малопараметрическое описание функций пропускания обусловленных молекулярным поглощением.

Накопленный различными научными группами опыт разработки компьютерных моделей радиации атмосферы был обобщен в работе [25] в рамках международного сравнения радиационных кодов. В работе приняли участие 38 научных групп. Расчеты проводились прямым методом line-by-line, так и с помощью различных приближенных моделей. Для проверки работоспособности радиационных моделей всем участникам международной группы было предложено выполнить моделирование радиационных характеристик для 55 различных сценариев состояния безоблачной атмосферы и 6 сценариев облачной атмосферы. На рисунке 3, заимствованным из данной работы, показано расхождение в расчетах при сопоставлении различных алгоритмов вычисления потоков тепловой радиации на уровне тропопаузы, а также показано изменения в потоках при удвоении

концентрации CO_2 . Из этого сравнения был сделан вывод, что методы моделей спектров поглощения неприемлемы и необходимы новые методы параметризации сопоставимые с прямым методом line-by-line, погрешность которого ниже чем радиационный форсинг, обусловленный удвоением концентрации CO_2 . Эту проблему решил метод рядов экспонент, получивший в западной литературе название «k-распределение». Общий подход был сформулирован Лебедевым в 1936. Однако применяться на практике он начал только с семидесятых годов для учета поглощения атмосферных газов в численных схемах расчета солнечной радиации в приближении многократного рассеяния. Термин «k-распределение» был впервые введен в работе [16], где функцию пропускания для однородной трассы представили в виде:

$$T(W) = \int_0^{\infty} f(k) \exp(-kW) dk, \quad (14)$$

где W — поглощающая масса, а функции $f(k)$ был дан смысл плотности вероятности распределения коэффициента поглощения, а величина

$$g(k) = \int_0^k f(k) dk \quad (15)$$

представляется функцией распределения коэффициента поглощения. Функция $k(g)$ обратная к $g(k)$, интерпретируется как коэффициент поглощения в пространстве кумулятивных частот g . Поскольку $g(k)$ — функция распределения, то она является монотонно возрастающей и, соответственно, коэффициент поглощения в пространстве кумулятивных частот также будет монотонно возрастающей функцией в отличие от коэффициента молекулярного поглощения, который является быстроосцилирующей функцией в пространстве частот. В работе [16] описано применение этого метода к моделям изолированной линии, Эльзассера и статистической модели Гуди, а в работе [38] данный подход был применен к статистической модели Малкмуса.

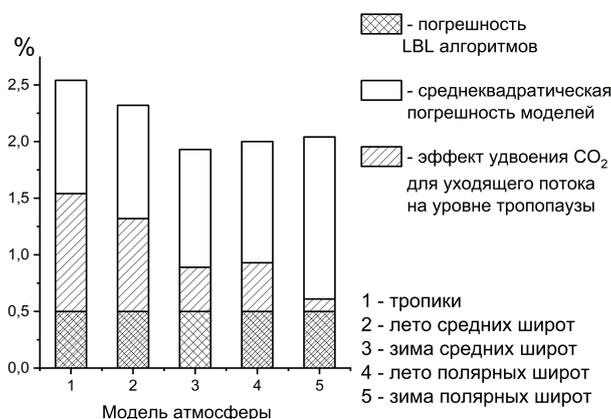


Рис. 3. Сравнение СКО потоков восходящей длинноволновой радиации на уровне тропопаузы, которые рассчитаны приближенными и прямыми методами, а также радиационный форсинг, обусловленный удвоением концентрации CO_2

Однако все возможности этого метода проявились после того, как он стал применяться непосредственно к line-by-line расчетам. В работе [23] было показано, что функцию пропускания можно представить в виде:

$$T(W) = \int_0^1 \exp(-k(g)W) dg, \quad (16)$$

причем для построения $k(g)$ можно достаточно просто: необходимо рассчитать методом line-by-line спектральную зависимость $k(\nu)$, а затем провести сортировку $k(\nu)$ по возрастанию. Вторая схема в радиационном блоке RegCM основывается на модели RRTM_LW, описанной в [17]. Эта модель основывается на аппроксимации функции пропускания рядом экспонент (k -распределение), что обеспечивает более высокое качество параметризации радиационных характеристик. Так, например, RRTM_LW рассчитывает потоки излучения и скорости нагрева в длинноволновом диапазоне спектра. Учитываются следующие молекулярные поглотители: водяной пар, диоксид углерода, озон, закись азота, метан, кислород, азот и фреоны. В сентябре 2002 года была выпущена версия 3.0 RRTM_LW. Проведено сопоставление RRTM_LW v3.0 и LBLRTM для различных атмосферных условий и получены оценки погрешностей параметризации: в потоках излучения — 1.0 Вт/м²; в скорости выхолаживания в тропосфере и нижней стратосфере — 0.1 К день⁻¹ и 0.3 К день⁻¹ в верхней стратосфере и выше. Параметры k -распределения рассчитаны на основе спектроскопической базы данных параметров линии HITRAN96, за исключением водяного пара, для которого использовалась база данных HITRAN 2000.

Для коротковолнового спектрального диапазона разработан программный комплекс RRTM_SW, который рассчитывает потоки излучения и скорости радиационного нагрева [17]. Модель включает водяной пар, диоксид углерода, озон, метан, кислород, аэрозольное и молекулярное рассеяние. Для учета многократного рассеяния используется метод дискретных ординат, реализованный в виде приложения. Нисходящий интегральный полный поток излучения (прямой плюс диффузно рассеянный) на поверхности рассчитанный с использованием RRTM_SW согласуется с расчетами LBLRTM в пределах 1.5 Вт/м².

Приведенные выше результаты свидетельствуют, что ряды экспонент обеспечивают высокую степень параметризации и высокую точность расчета, сопоставимую с методом line-by-line. Проведенные нами расчеты потоков длинноволнового излучения с различными версиями спектроскопической базы данных HITRAN показали, что различия между нисходящими потоками на нижней границе атмосферы для лета умеренных широт не превышали 0.1 Вт/м², а для восходящих потоков на верхней границе атмосферы — не более 0.6 Вт/м² [26]. Соответственно значения восходящего потока на верхней границе атмосферы при использовании спектроскопической базы данных HITRAN2012 составляло величину равную 281.01 Вт/м², а для нисходящего потока — 351.16 Вт/м². Эти оценки позволяют сделать вывод, что современные спектроскопические базы данных обеспечивают высокую точность расчета широкополосных потоков.

Несмотря на то, что селективное молекулярное поглощение, рассчитываемое на основе спектроскопических баз данных HITRAN обеспечивает высокую точность, однако в случае континуального поглощения парами воды ситуация существенно иная. Чувствительность радиационных потоков в микро- и макро-окнах прозрачности атмосферы к погрешностям в коэффициентах континуального поглощения значительно более сильная в сравнении с селективным поглощением. Это обусловлено тем, что в полосах поглощения

наблюдается эффект насыщения, тогда как континуальное поглощение хотя и является относительно малым, но оно не насыщено, является медленно меняющейся функцией частоты и дает вклад в достаточно широких спектральных интервалах. Вследствие того, что континуальное поглощение мало, его исследование сопряжено с большими техническими трудностями и по мере прогресса в экспериментальной технике появляются новые работы, в которых модели континуума уточняются, например [18; 46]. Поскольку радиационные блоки в климатической модели обновляются редко, то прежде чем проводить моделирование климатических характеристик необходимо провести сопоставление используемых моделей континуума.

Как отмечалось выше, в RegCM используется две радиационных схемы: схема NCAR CCM3 и схема RRTM, причем в первой континуальное поглощение H₂O описывается моделью RSB [43], а вторая моделью SKD2.4 [22]. Последняя модель описывает форму контура линии при произвольных отстройках от резонансных частот, что делает их незаменимыми в полосах поглощения, она постоянно корректируется по мере появления новых экспериментальных данных и реализована в виде компьютерных кодов, доступных научному сообществу (<http://rtweb.aer.com>). К настоящему времени модель SKD эволюционировала до MT_SKD2.5 [22]. Основное отличие модели RSB состоит в том, что она описывает континуальное поглощение H₂O лишь в окне прозрачности атмосферы 8–12 мкм, тогда как SKD2.4 описывает континуальное поглощение также и в микро-окнах прозрачности атмосферы. В частности, отметим важность учета континуального поглощения в микро-окнах вращательной полосы H₂O при низких температурах [22].

Для того, чтобы оценить неопределенность в потоках излучения при использовании вышеуказанных моделей мы использовали модель континуального поглощения паров H₂O MT_SKD2.5, которая применялась во всем длинноволновом спектральном диапазоне, за исключением окна прозрачности 830–1130 см⁻¹, где она заменялась на разработанную нами модель, основывающуюся на экспериментальных данных Ю.М. Баранова с соавторами [18; 46], причем коэффициент континуального поглощения рассчитывался по формуле:

$$k = k_s + k_f = (C_s \exp(-T_0/T) \cdot n_{H_2O} + C_f n) p_{H_2O}, \quad (17)$$

где n_{H_2O} — концентрация паров воды, n — концентрация молекул воздуха, p_{H_2O} — парциальное давление паров воды, параметр C_s был заимствован из работы [46], C_f — из работы [18], а T_0 — определялся методом наименьших квадратов на основе температурной зависимости коэффициентов континуального поглощения, зарегистрированной в работе [46]. В результате для каждого подинтервала (шириной 20 см⁻¹) в диапазоне частот (830–1130) см⁻¹ был получен свой набор параметров C_s , C_f и T_0 . Диапазон изменений параметра T_0 составлял величину (1430–1720) К, характер изменений по спектру достаточно монотонный с максимумом на частоте 990 см⁻¹. Измерения в [46] выполнены для широкого диапазона температур 310–363 К, что позволяет достаточно уверенно аппроксимировать эти данные на более низкие температуры, соответствующие атмосферным. Внесенные нами коррективы обусловлены тем, что температурная зависимость коэффициентов self-континуума по нашей модели и модели MTCKD2.5 различаются. Причем, наибольшая неопределенность для окна (8–12) мкм наблюдается в коэффициентах поглощения foreign-континуума. Вклад foreign-континуума в общее поглощение для летних условий приземных высот мал и суммарный коэффициент поглощения рассчитывается достаточно точно. Однако с ростом высоты ситуация меняется.

Роль foreign-континуума с ростом высоты возрастает. Следует также отметить тот факт, что коэффициенты поглощения foreign-континуума, приведенные в работе [18], примерно в 1.5–2 раза превышают коэффициенты, используемые в модели МТ_СКД.

Для проведения расчетов радиационных характеристик для атмосферы Земли мы использовали модель, основанную на разложении функций пропускания в виде рядов экспонент [12] в диапазоне спектра от 0 до 3000 см⁻¹ со спектральным разрешением 20 см⁻¹ для атмосферных высот от 0 до 100 км для произвольных метеорологических условий. Потоки рассчитывались с использованием континуального поглощения RSB, СКД2.4 и модифицированной МТ_СКД2.5 (далее последнюю модель будем обозначать ВАР). Для того чтобы получить представление о возможных вариациях восходящих длинноволновых потоков излучения на верхней границе атмосферы и нисходящих на нижней границе атмосферы, а также вкладе континуума паров воды, мы использовали две выборки метеорологических данных для летних и зимних условий Нижнего Поволжья.

Результаты моделирования показали (см. рис. 4, 5), что расхождения в потоках восходящей радиации составляют для летних условий 1.46 ± 0.47 Вт/м², min = 0.23 Вт/м², max = 2.70 Вт/м², а для зимних, соответственно 1.40 ± 0.21 Вт/м², min = 0.66 Вт/м², max = 1.98 Вт/м². Аналогичные значения для нисходящих потоков на нижней границе атмосферы составили для летних условий (0.8 ± 0.38) Вт/м², min = -0.37 Вт/м², max = 1.56 Вт/м², и для зимних (0.09 ± 0.93) Вт/м², min = -3.24 Вт/м², max = 1.87 Вт/м².

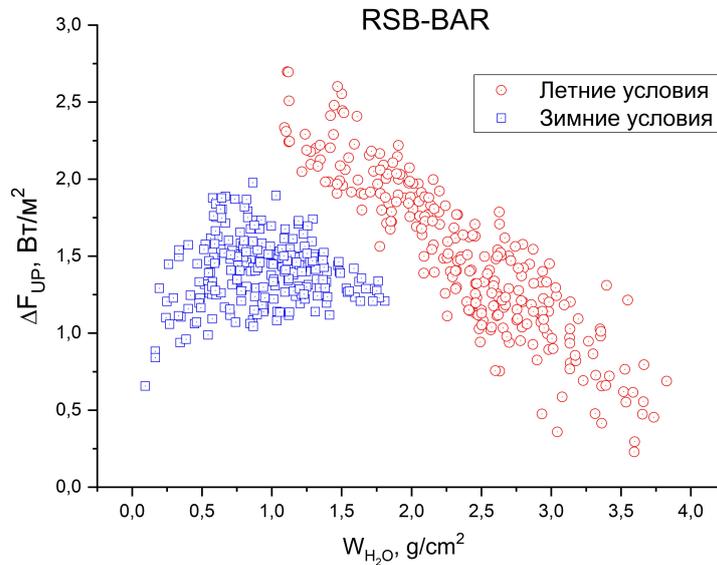


Рис. 4. Расхождения в восходящих потоках излучения на верхней границе атмосферы при использовании модели континуума RSB и модели ВАР

Расхождения в потоках восходящей радиации при использовании моделей СКД2.4 и ВАР составляют для летних условий -0.0 ± 0.07 Вт/м², min = -0.38 Вт/м², max = 0.15 Вт/м², а для зимних, соответственно 0.03 ± 0.11 Вт/м², min = -0.58 Вт/м², max = 0.11 Вт/м². Аналогичные значения для нисходящих потоков на нижней границе атмосферы составили для летних условий (-0.37 ± 0.35) Вт/м², min = -1.15 Вт/м², max = 0.53 Вт/м², и для зимних (-0.10 ± 0.19) Вт/м², min = -0.58 Вт/м², max = 0.45 Вт/м². Из представленных результатов следует, что при использовании в реги-

ональной климатической модели RegCM схемы RRTM_LW неопределенность за счет континуального поглощения парами воды в восходящих и нисходящих потоках излучения много меньше 1 % в сравнении с величиной соответствующих потоков. Применение модели RSB в схеме NCAR CCM3 для региона Нижнего Поволжья может приводить к значительным погрешностям, которые будут особо проявляться при низких температурах.

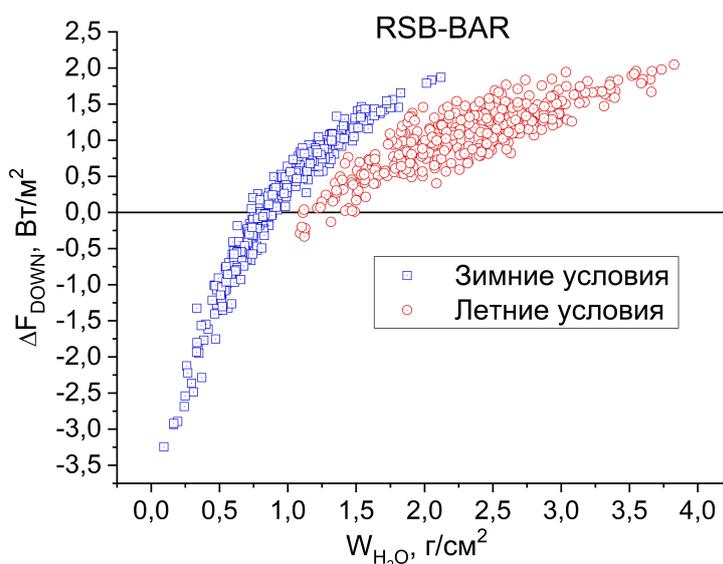


Рис. 5. Расхождения в нисходящих потоках излучения на нижней границе атмосферы при использовании модели континуума RSB и модели BAR

3. Верификация модели

РКМ позволяют повысить пространственное разрешение и учитывать более мелкомасштабные особенности поверхности Земли по сравнению с глобальными моделями климата (ГМК).

Ключевой проблемой климатического моделирования является верификация используемых моделей [1]. Качество прогнозов на основе, как ГМК, так и РКМ, определяется тонкой подстройкой большого числа физических характеристик и параметров численной модели, включая параметры подсеточной физики. Для региональной климатической модели дополнительными проблемами являются наличие граничных условий и выбор расчетной области [6].

3.1. Выбор расчетной области

Выбор вычислительной области может значительно влиять на численное решение РКМ [33]. С одной стороны, эта область должна быть достаточно большой, чтобы обеспечить полное развитие мелкомасштабных движений в атмосфере, и чтобы границы оказывали наименьшее влияние на внутренние процессы. С другой стороны, большие размеры расчетной области требуют больших вычислительных ресурсов.

Для анализа влияния размера и положения расчетной области было проведено две серии экспериментов с различными конфигурациями расчетных областей. При выполнении расчетов используется набор параметров, рекомендованный разработчиками для Каспийского региона, гидростатическое ядро с разрешением модельной сетки 20 км, топографические данные GTOPO с разрешением 30 секунд. Начальные и граничные условия определяются из ГКМ European Centre for Medium-Range Weather Forecast's ERA-Interim (EIN15), а для задания температуры поверхности морей применяются данные Indian Ocean Sea Surface Temperature (IOSST).

Наш анализ показал желательность использования базовой модели *A*, особенно на примере моделирования осадков [33].

3.2. Динамика температуры

Обсудим результаты базового эксперимента, начало моделирования которого соответствует 01.12.2015 г. Мы используем для задания граничных условий набор данных реанализа ERA Interim. Численные эксперименты проводились для трех различных областей *A*, *B*, *C* с числом ячеек 150×150 , 100×100 , 50×50 ячеек в плоскости Земли соответственно (см. рис. 6).

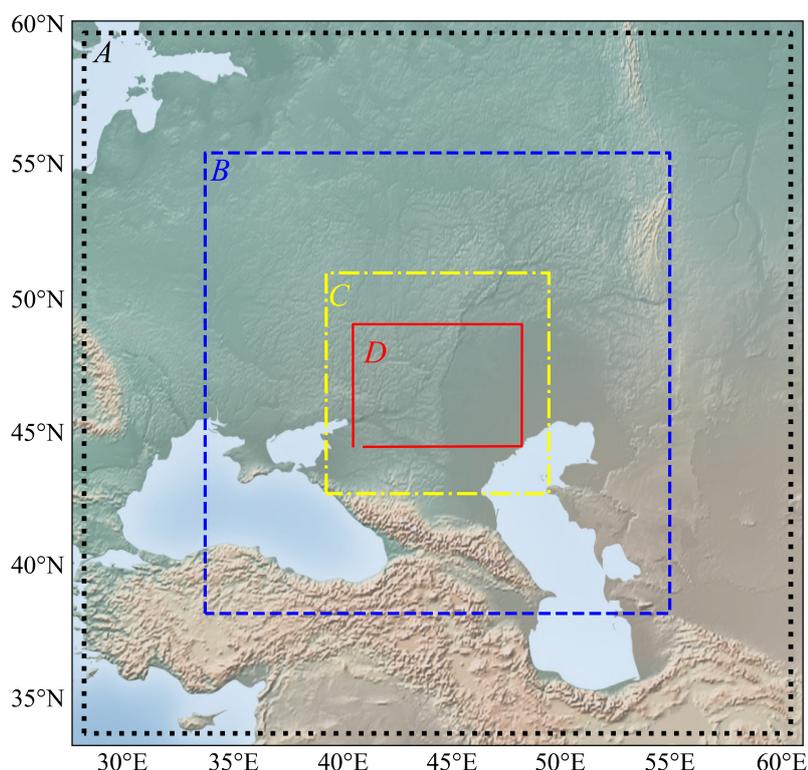


Рис. 6. Различные вычислительные области, используемые для моделирования:
A — базовая модель размером 2000×2000 км с центром в г. Волгоград,
 модели *B*, *C*, *D* имеют меньшую площадь

Сравнение результатов моделирования основывается на данных наблюдений, находящихся на сайте www.pogodaiklimat.ru. На рисунке 7 приведены результаты сопоставления среднемесячной температуры воздуха в приземном слое атмосферы с данными наблюдений для различных городов, попадающих во все расчетные области. Видим, что для всех рассмотренных городов изменения температуры для разных моделей (*A*, *B*, *C*) могут достигать нескольких градусов в отдельные месяцы. Наибольшие различия наблюдаются в период весна–лето. Практически для всех месяцев модель *A* дает более низкую температуру по сравнению с моделями *B* и *C*. Модель *C* дает завышенные температур в весенний период. Можно отметить, что для февраля 2016 года для Ростова-на-Дону модель *B* передает наибольшее отклонение от нормы среднемесячной температуры.

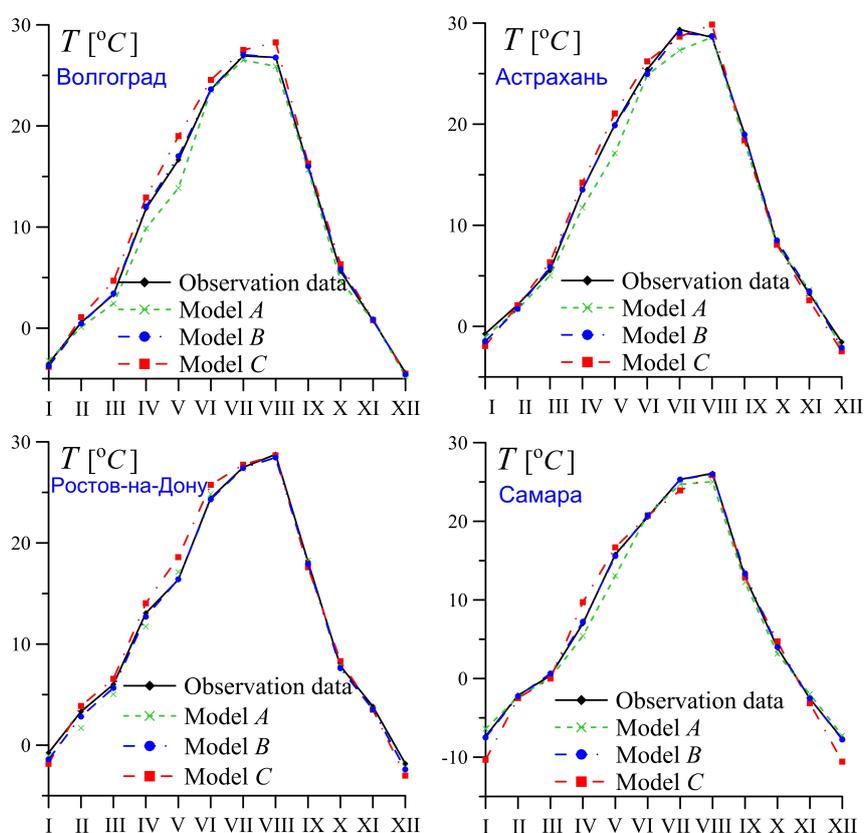


Рис. 7. Зависимость температуры T от времени в течение 2016 года для четырех городов: Волгоград, Астрахань, Ростов-на-Дону, Самара

Рисунок 8 демонстрирует влияние выбора расчетной области для всей зоны *D*. Для территории Нижнего Поволжья при уменьшении расчетной области, как правило, имеем завышенные распределения температуры. Как видим, для июня везде модель *A* дает более низкую температуру по сравнению с моделями *B* и *C*.

На рисунке 8 хорошо виден охлаждающий эффект от ВАП летом. Аналогичный эффект наблюдается по данным earth.nullschool.net. На рисунке 9 показано распределение температуры на 07.07.2019. Овал к северу от Каспийского моря показывает положение Волго-Ахтубинской поймы. На врезке показан профиль температуры поперек ВАП вдоль линии $K_1 - K_2$.

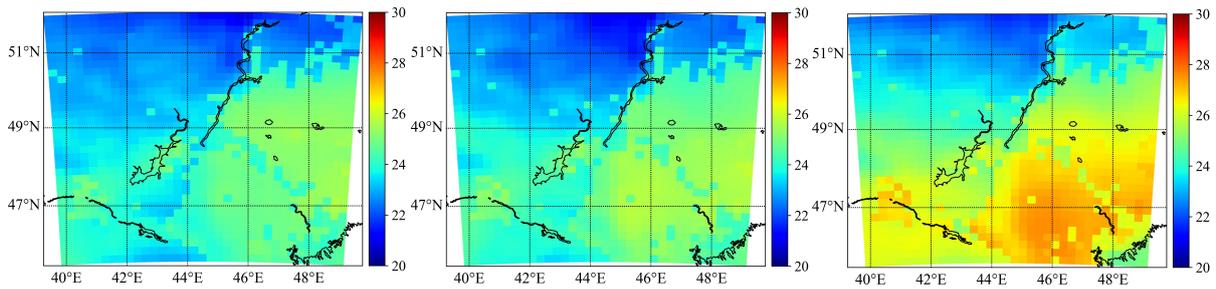


Рис. 8. Зависимость температуры T в области D для моделей A, B, C (слева–направо) для июня 2016 года по результатам нашего моделирования

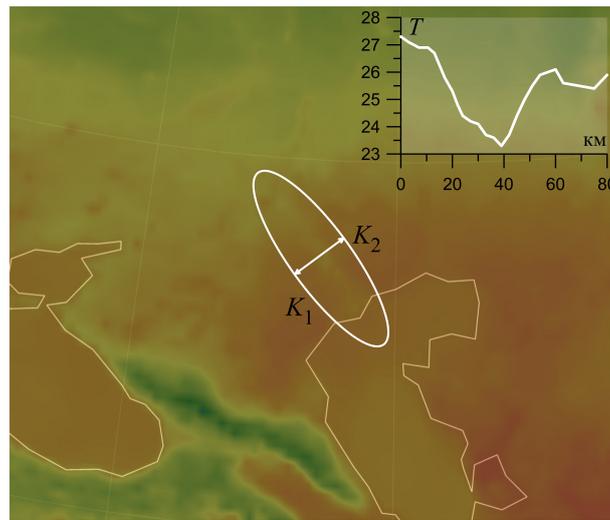


Рис. 9. Охлаждающий эффект от Волго-Ахтубинской поймы, наблюдаемый 07.07.2019.

В рамках моделей с гидростатическим ядром влияние водохранилищ и крупных речных пойм на состояние атмосферы удастся выделить на пределе точности. Для выявления такого влияния от крупных водохранилищ (Волгоградское, Цымлянское, Саратовское) или Волго-Ахтубинской поймы необходимо вводить дополнительную подсеточную параметризацию, либо отказаться от приближения гидростатического равновесия, переходя к размеру ячеек 1–5 км. На рисунке 10 представлены результаты моделирования с использованием негидростатического (с размерами ячеек 5 км) и гидростатического ядер, начало расчета которого соответствует 01.12.2015 г.

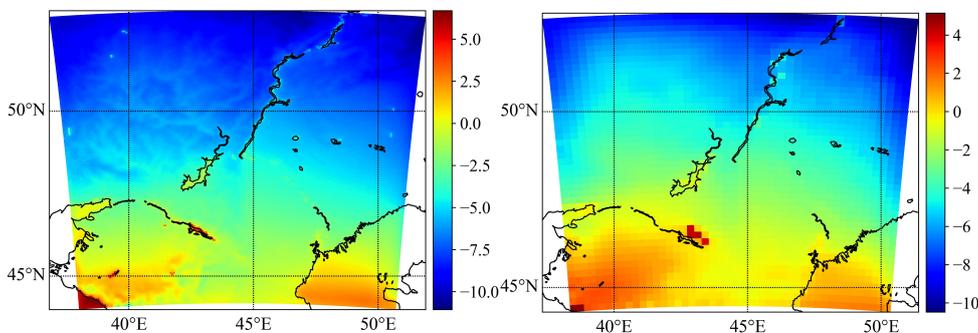


Рис. 10. Сравнение среднемесячного распределения температуры января 2016 для негидростатического (слева) и гидростатического (справа) ядер

Хорошо виден утепляющий эффект в зимний период от крупных водоемов (Черное и Каспийское моря), при использовании негидростатического ядра этот эффект распространяется на меньшую территорию. Можно выделить аналогичное влияние от Цымлянского водохранилища, предельная ширина которого близка к 20 км и разрешается на пределе точности в гидростатической модели.

Укажем на следующую проблему моделирования с использованием негидростатического ядра RegCM 4.5. Объем данных ввода / вывода для моделирования сильно увеличивается с уменьшением размера ячеек. В Таблице 1 приведена информация о количестве входных / выходных данных для региональных моделей с различным пространственным разрешением для модели *A* (см. рис. 6).

Таблица 1

Количество входных и выходных данных в модели *A* для различного пространственного разрешения

	5 км	10 км	20 км
Входные данные модели	285 Гб/год	71 Гб/год	5.5 Гб/год
Выходные данные модели	1.2 Тб/год	290 Гб/год	28 Гб/год

3.3. Моделирование редких метеособытий: сильные осадки

В работе [33] мы предложили для оценки качества моделирования анализировать насколько хорошо РКМ воспроизводит редкие события, к которым прежде всего следует относить сильные осадки. В общем случае распределение осадков зависит от вычислительной области [33], но при определенных условиях наблюдаем хорошую воспроизводимость пространственного распределения положений сильных осадков.

Базовая расчетная область второго эксперимента располагается между 38°N – 56°N и 34°E – 56°E (рис. 6). Размеры нашей базовой модели являются типичными для региональных моделей. В данном эксперименте анализируется возможность появления особых метеорологических событий связанных с осадками. Рассмотрим результаты моделирования только для зоны *B*, начало которого соответствует 01.01.2010 г. На рисунке 11 представлено пространственное распределение трехчасовых сумм осадков в мм, соответствующее трем последовательным моментам времени с разницей в 3 часа, а также линиями тока обозначено направление ветра на дату 16.05.2016.

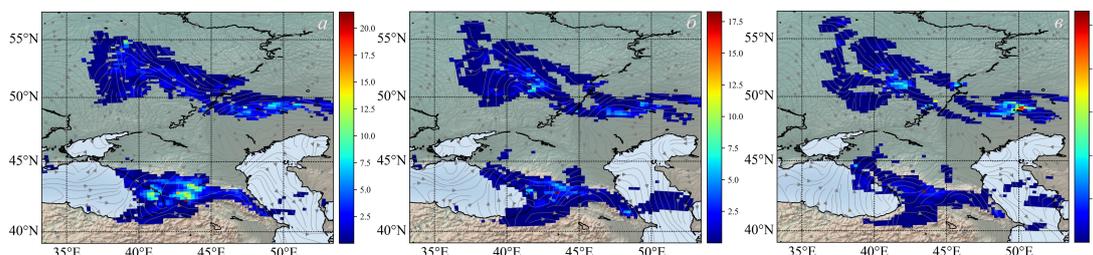


Рис. 11. Результаты климатического моделирования: распределения осадков

Сравнение проводилось с данными earth.nullschool.net (рис. 12). Наблюдается достаточно хорошее качественное и количественное согласие распределения осадков для территории Черноморско–Каспийского региона. Наблюдаем две зоны осадков: между Черным и Каспийским морями и севернее широты Волгограда. Наибольшие значения осадков локально лежат в пределах 10–20 мм.

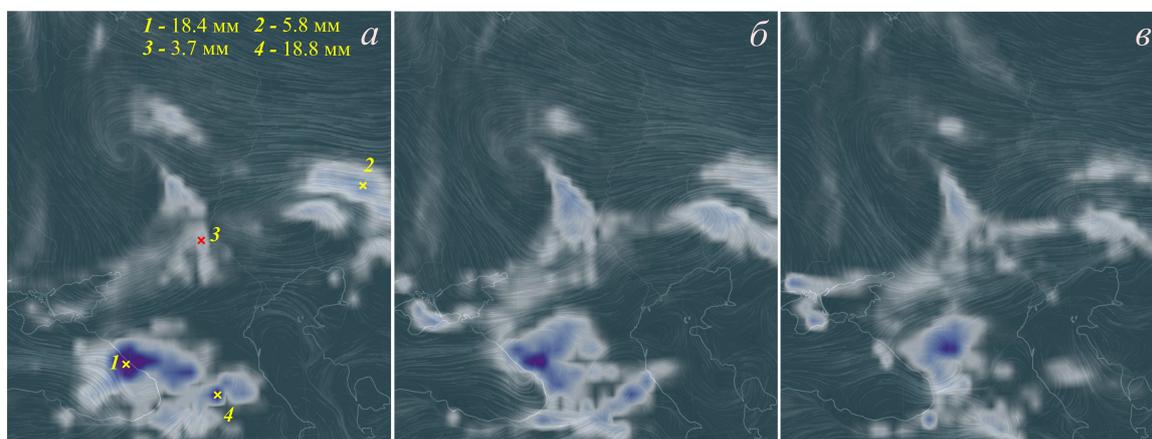


Рис. 12. Распределения осадков по данным earth.nullschool.net (система координат отличается от используемой на рисунке 11)

4. Обсуждение и выводы

Задачи мониторинга атмосферы и земной поверхности, а также повышения качества предсказания погоды и климата, как в глобальном, так и региональном масштабах, требует все более сложных и высокоточных радиационных моделей. Прогностические свойства климатических моделей в существенной мере определяются точностью используемых радиационных расчетов. Согласно отчету международной комиссии по климату (см. [19]) в индустриальную эру (начиная с 1750 г. по настоящее время) долгоживущие парниковые газы, которые связаны с хозяйственной деятельностью, достаточно хорошо изучены и дают положительное радиационное воздействие (2.9 ± 0.3 Вт/м²). Суммарное аэрозольное воздействие, включающее прямой эффект и опосредованный, вызванный изменением альбеда облаков, является отрицательным (-1.3 ± 0.8 Вт/м²). В итоге суммарное радиационное воздействие оценивается в диапазоне (0.6 – 2.4) Вт/м². Причем наибольшие неопределенности относятся к прямому и косвенному (через образование дополнительной облачности) влиянию влажности и аэрозолей на климат, здесь также важны региональные особенности.

Ситуация с водяным паром является более сложной. Он только опосредованно влияет на климатические процессы, поскольку является консервативной примесью и его распределение по земному шару зависит от температуры воздуха. Водяной пар в радиационных процессах может проявляться как через обратные положительные связи, так и отрицательные. Положительная обратная связь приводит к усилению парникового эффекта: при увеличении температуры воздуха влагосодержание атмосферы возрастает, которое и вызывает дальнейшее повышение температуры воздуха. С другой стороны влияние водяного пара может также проявляться через увеличение облачности и изменение количества осадков. В работе [26] было показано, что современные спектроскопические

базы обеспечивают высокую точность расчета радиационных потоков, обусловленных селективным поглощением атмосферными газами, погрешность интегрального потока не более 1 Вт/м^2 .

Континуальное поглощение вносит значительные неопределенности в расчетные значения восходящих и нисходящих потоков, и наибольший вклад в парниковый эффект дает континуум H_2O в длинноволновом диапазоне. Однако неопределенности в длинноволновых потоках при использовании различных современных моделей континуума могут для отдельных метеорологических ситуаций достигать 4.8 Вт/м^2 [13]. В разрабатываемых нами моделях предполагается использовать наиболее точные модели континуума H_2O .

Наш анализ показывает, что широкополосные радиационные коды, выполняющие расчет потоков излучения, скорости радиационного нагрева способны обеспечивать высокую скорость и точность вычислений, которая сопоставима с прямыми методами расчета. Отметим важность параметризации содержания водяного пара и облаков, которые являются наиболее чувствительными факторами климатических изменений для южно-российского региона. Это позволяет повысить эффективность радиационного блока региональной климатической модели.

Дополнительные факторы, влияющие на радиационную модель, могут быть связаны с учетом вариаций приходящей солнечной радиации в физико-математических моделях климата [11]. По данным наблюдений последних 150 лет наблюдаются короткопериодические изменения инсоляции с характерными временными шкалами от 1 до 20 лет и амплитудами 0.0032 % (при годичной вариации 6.9 %). На больших временах изменения как интегральной инсоляции, так и ее широтного распределения могут достигать нескольких процентов.

Для территории Нижнего Поволжья при уменьшении расчетной области, как правило, имеем завышенные распределения температуры. Наибольшее различие в средне-месячной температуре наблюдается в период весна–лето.

Для учета мелкомасштабных особенностей, связанных с влиянием крупных водохранилищ (Волгоградское, Цымлянское, Саратовское) и Волго-Ахтубинской поймы, необходимо вводить дополнительную подсеточную параметризацию, либо отказаться от приближения гидростатического равновесия, переходя к размеру ячеек 1–5 км.

Основным ограничивающим фактором для моделирования регионального климата является объем входных / выходных данных, особенно при использовании негидростатического ядра.

ПРИМЕЧАНИЕ

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области в рамках научного проекта № 18-47-340003 p_a.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов, А. Е. Реанализ атмосферной циркуляции для Черноморско-Каспийского региона / А. Е. Анисимов, Д. А. Яровая, В. С. Барабанов // Морской гидрофизический журнал. — 2015. — № 4. — С. 14–28.

2. Гельфан, А. Н. Сравнение двух методов задания климатических проекций в региональную гидрологическую модель (на примере бассейна р. Амур) / А. Н. Гельфан,

- Т. Ю. Калугин, И. И. Мотовилов // Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения. — Новочеркасск : Изд-во Лик, 2017. — С. 150–154.
3. Зуев, В. Е. Оптические модели атмосферы / В. Е. Зуев, Г. М. Креков. — Л. : Гидрометеиздат, 1986. — 256 с.
4. Калугин, А. С. Модель формирования стока для бассейна реки Амур / А. С. Калугин, Т. Ю. Мотовилов // Водные ресурсы. — 2018. — Т. 45, № 2. — С. 121–132.
5. Кондратьев, К. Я. Радиационные факторы совершенных изменений глобального климата / К. Я. Кондратьев. — Л. : Гидрометеиздат, 1986. — 288 с.
6. Лагутин, А. А. Моделирование климата сибирского региона: результаты модели REGCM / CLM для 1970–2029 гг / А. А. Лагутин, Н. В. Волков, Е. Ю. Мордвин // Вестник алтайской науки. — 2013. — № 1. — С. 191–197.
7. Моделирование климата западной Сибири: верификация результатов модели REGCM4 / К. М. Макушев, А. А. Лагутин, Н. В. Волков, Е. Ю. Мордвин // Ломоносовские чтения на Алтае: фундаментальные проблемы науки и образования: Сборник научных статей международной конференции. — Барнаул : Изд-во АлтГУ, 2015. — С. 1218–1221.
8. О рациональном аграрном природопользовании в Сибири / В. А. Понько, М. И. Иванова, С. В. Хизаметдинов, П. П. Петренко // Мелиорация и водное хозяйство. — 2016. — № 6. — С. 22–26.
9. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории российской федерации / В. П. Мелешко, Г. В. Груза, А. С. Зайцев, И. Л. Кароль, В. М. Катцов, Н. В. Кобышева. — Электрон. текстовые дан. — Режим доступа: <http://climate2008.igce.ru/>. — Загл. с экрана.
10. Оценки возможного влияния изменений климата на функционирование объектов энергетики в России / Г. А. Тюсов, Е. М. Акентьева, Т. В. Павлова, И. М. Школьник // Метеорология и гидрология. — 2017. — № 12. — С. 47–57.
11. Федоров, В. М. Вариации инсоляции земли и особенности их учета в физико-математических моделях климата / В. М. Федоров // Успехи физических наук. — 2019. — Т. 189. — № 1. — С. 33–46.
12. Фирсов, К. М. Роль континуального поглощения паров воды в длинноволновых радиационных процессах приземного слоя атмосферы в регионе Нижнего Поволжья / К. М. Фирсов, Т. Ю. Чеснокова, Е. В. Бобров // Оптика атмосферы и океана. — 2014. — Т. 27. — С. 665–672.
13. Чеснокова, Т. Ю. Вклад континуального поглощения H₂O в потоки длинноволнового излучения облачной и безоблачной атмосферы / Т. Ю. Чеснокова, И. И. Клиточенко, К. М. Фирсов // Оптика атмосферы и океана. — 2016. — Т. 29, № 10. — С. 843–849.
14. Яровая, Д. А. Параметры атмосферных осадков в Азово-Черноморском регионе на основе модельных и натуральных данных / Д. А. Яровая, В. Л. Посошков // Морской гидрофизический журнал. — 2017. — № 1 (193). — С. 11–26.
15. A numerical approach for planning offshore wind farms from regional to local scales over the Mediterranean / I. Baloga, P. Ruti, I. Tobin, V. Armenio, R. Vautard // Renewable Energy. — 2016. — Vol. 85. — P. 395–405.
16. Arking, A. The influence of line shape and band structure on temperatures in planetary atmospheres / A. Arking, K. Grossman // Journal of the Atmospheric Sciences. — 1972. — Vol. 29. — P. 937–949.
17. Atmospheric radiative transfer modeling: a summary of the AER codes / S. A. Clough, M. W. Shephard, E. J. Mlawer, J. S. Delamere, M. J. Iacono, K. Cady-Pereira, S. Boukabara, P. D. Brown // Journal of Quantitative Spectroscopy Radiative Transfer. — 2005. — Vol. 91. — P. 233–244.
18. Baranov, Yu. I. The water vapour self- and water-nitrogen continuum absorption in the 1000 and 2500 cm⁻¹ atmospheric windows / Yu. I. Baranov, W. J. Lafferty // Phil. Trans. R. Soc. A. — 2012. — Vol. 370. — P. 2578–2589.
19. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing / P. Forster, V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D. W. Fahey, J. Haywood, J. Lean,

D. C. Lowe, G. Myhre // *Climate Change*. — 2007. — P. 129–134.

20. Cyclone activity in the arctic from an ensemble of regional climate models / M. Akperov, I. I. Mokhov, V. A. Semenov, M. A. Dembitskaya // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. — 2018. — Vol. 123, № 5. — P. 2537–2554.

21. Description of the near community climate model (ccm3), Tech. Rep. NCAR/TN-420+STR / J. T. Kiehl, J. J. Hack, G. B. Bonan, B. A. Boville, B. P. Breigleb, D. Williamson, P. Rasch // National Center for Atmospheric Research. — 1996. — P. 152.

22. Development and recent evaluation of the MT_CKD model of continuum absorption / E. J. Mlawer, V. H. Payne, J.-L. Moncet, J. S. Delamere, M. J. Alvarado, D. C. Tobin // *Phil. Trans. R. Soc. A*. — 2012. — Vol. 370. — P. 2520–2556.

23. Domoto, G. A. Frequency integration for radiative transfer problem involving homogeneous non-gray gases: the inverse transmission function / G. A. Domoto // *Journ. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transf.* — 1974. — Vol. 14. — P. 935–942.

24. Dozkurt, D. Downscaled simulations of the ECHAM5, CCSM3 and HadCM3 global models for the eastern Mediterranean–Black Sea region: evaluation of the reference period / D. Dozkurt, U. Turuncoglu, O. L. Sen // *Physical Oceanography*. — 2012. — Vol. 39. — P. 207–225.

25. Ellingson, R. G. The intercomparison of radiation codes used in climate models: long wave results / R. G. Ellingson, J. Ellis, S. Feis // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. — 1991. — Vol. 96. — P. 8929–8953.

26. Estimation of uncertainties in the longwave radiative fluxes simulation due to spectroscopic errors / K. M. Firsov, T. Yu. Chesnokova, E. V. Bobrov, I. I. Klitochenko. — *Proc. SPIE 9292, 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. — Electronic text data. — Mode of access: 10.1117/12.2075550. — Title from screen.

27. Fourquart, Y. Intercomparing shortwave radiation codes for climate studies / Y. Fourquart, B. Bonnel, V. Ramaswamy // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. — 1991. — Vol. 96, iss. D5. — P. 8955–8968. — DOI: 10.1029/90JD00290.

28. Gao, X. J. Comparison of convective parameterizations in RegCM4 experiments over China with CLM as the land surface model / X. J. Gao, Y. Shi, F. Giorgi // *Atmospheric and Oceanic Science Letters*. — 2016. — Vol. 9. — P. 246–254.

29. Giorgi, F. RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains / F. Giorgi, E. Coppola, F. Solmon // *Climate Research*. — 2012. — Vol. 52. — P. 7–29.

30. Grell, G. A. Description of the fifth generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5) / G. A. Grell, J. Dudhia, D. R. Stauffer. — NCAR Scientific Tech Note. NCAR/TN-398+STR. — Electronic text data. — Mode of access: <http://n2t.net/ark:/85065/d7b857g2>. — Title from screen.. — DOI: 10.5065/D60Z716B.

31. How the Performance of Hydrological Models Relates to Credibility of Projections Under Climate Change / V. Krysanova, F. Hattermann, F. Hattermann, Z. W. Kundzewicz, C. Donnelly, B. Arheimer, A. Gelfan, D. Gerten // *Hydrological Sciences Journal*. — 2018. — Vol. 63, № 5. — P. 696–720. — DOI: 10.1080/02626667.2018.1446214.

32. Kalugin, A. S. Runoff Formation Model for the Amur River Basin / A. S. Kalugin, Y. G. Motovilov, A. Padari // *Water Resources*. — 2018. — Vol. 45. — P. 121–132.

33. Khoperskov, A. V. Regional Climate Model for the Lower Volga: Parallelization Efficiency Estimation / A. V. Khoperskov, A. V. Titov // *Supercomputing Frontiers and Innovations*. — 2018. — Vol. 5, № 4. — P. 107–110. — DOI: 10.14529/jsfi180413.

34. Klikunova, A. Yu. Numerical hydrodynamic model of the Lower Volga / A. Yu. Klikunova, A. V. Khoperskov // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2018. — Vol. 1128, № 012087. — P. 1–6. — DOI: 10.1088/1742-6596/1128/1/012087.

35. Krichak, S. O. Regional climate model simulation of present-day regional climate over the European part of Russia with RegCM3 / S. O. Krichak, E. E. Small, E. A. B. Eltahir // *Russian Meteorology and Hydrology*. — 2008. — Vol. 33. — P. 20–26.

36. Kulkarni, S. Performance of the CORDEX regional climate models in simulating offshore wind and wind potential / S. Kulkarni, M. C. Deo, S. Ghosh // *Theoretical and Applied*

Climatology. — 2019. — Vol. 135. — P. 1449–1464.

37. Kundzewicz, Z. W. Are climate models «ready for prime time» in water resources management applications, or is more research needed / Z. W. Kundzewicz, E. Z. Stakhiv // *Hydrological Sciences Journal*. — 2010. — Vol. 55. — P. 1085–1089.

38. Lacis, A. A. A description of the K-distribution methods for modelling nongray gaseous absorption, thermal emission, and multiple scattering in vertically inhomogeneous atmospheres / A. A. Lacis, V. A. Oinas // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. — 1991. — Vol. 96, № D5. — P. 9027–9063.

39. Mokhov, I. I. Assessment of the Ability of Contemporary Climate Models to Assess Adequately the Risk of Possible Regional Anomalies and Trends / I. I. Mokhov // *Doklady Earth Sciences*. — 2018. — Vol. 479, № 2. — P. 482–485. — DOI: 10.1134/S1028334X18040050.

40. Neckel, H. The solar radiation between 3300 and 23500 Å / H. Neckel, D. Labs // *Solar Physics*. — 1984. — Vol. 26. — P. 205–258. — DOI: 10.1029/90JD00290.

41. Pal, J. S. Simulation of regional-scale water and energy budgets: Representation of subgrid cloud and precipitation processes within RegCM / J. S. Pal, E. E. Small, E. A. B. Eltahir // *Journal of Geophysical Research*. — 2000. — Vol. 105. — P. 29579–29594.

42. Regional Climate Model RegCM Reference Manual / N. Elguindi, X. Bi, F. Giorgi, B. Nagarajan, J. Pal // *International Centre for Theoretical Physics*. — 2014. — P. 1–37.

43. Roberts, R. E. Biberman Infrared continuum absorption by atmospheric water vapor in the 8–12 micron meter window / R. E. Roberts, J. E. A. Selby, L. M. Biberman // *Application Optics*. — 1976. — Vol. 15. — P. 2085–2090.

44. Tamm, O. Modelling the effects of land use and climate change on the water resources in the eastern Baltic Sea region using the SWAT model / O. Tamm, S. Maasikamae, A. Padari // *Catena*. — 2018. — Vol. 167. — P. 78–89.

45. Volodin, E. M. Simulation of modern climate with the new version of the INM RAS climate model / E. M. Volodin // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. — 2017. — Vol. 53. — P. 142–155. — DOI: 10.1134/S0001433817020128.

46. Water-vapor continuum absorption in the 800–1250 cm⁻¹ spectral region at temperatures from 311 to 363 K / Yu. I. Baranov, W. J. Lafferty, Q. Ma, R. H. Tipping // *JQSRT*. — 2008. — Vol. 109. — P. 2291–2302.

47. Xu, J. On the role of horizontal resolution over the Tibetan Plateau in the REMO regional climate model / J. Xu, N. Koldunov, A. R. C. Remedio // *Climate Dynamics*. — 2018. — Vol. 51, № 11–12. — P. 4525–4542. — DOI: 10.1007/s00382-018-4085-7.

REFERENCES

1. Anisimov A.E., Yarovaya D.A., Barabanov V.S. Reanaliz atmosferynoy tsirkulyatsii dlya Chernomorsko-Kaspiyskogo regiona [Reanalysis of Atmospheric Circulation for the Black Sea-Caspian Region]. *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*, 2015, no. 4, pp. 14–28.

2. Gelfan A.N., Kalugin T.Yu., Motovilov I.I. Sravnenie dvukh metodov zadaniya klimaticheskikh proektsiy v regionalnuyu gidrologicheskuyu model (na primere basseyna r. Amur) [Comparison of Two Methods of Setting Climate Projections in the Regional Hydrological Model (on the Example of the Amur River Basin)]. *Vodnye resursy: novye vyzovy i puti resheniya*. Novocherkassk, Lik Publ, 2017, pp. 150–154.

3. Zuev V.E., Krekov G.M. *Opticheskie modeli atmosfery* [Optical Models of the Atmosphere]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1986. 256 p.

4. Kalugin A.S., Motovilov T.Yu. Model formirovaniya stoka dlya basseyna reki Amur [Runoff Formation Model for the Amur River Basin]. *Vodnye resursy*, 2018, vol. 45, no. 2, pp. 121–132.

5. Kondratyev K.Ya. *Radiatsionnye faktory sovershennykh izmeneniy globalnogo klimata*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1986. 288 p.

6. Lagutin A.A., Volkov N.V., Mordvin E.Yu. Modelirovanie klimata sibirskogo regiona: rezultaty modeli REGCM / CLM dlya 1970–2029 gg. *Vestnik altayskoy nauki*, 2013, no. 1, pp. 191–197.

7. Makushev K.M., Lagutin A.A., Volkov N.V., Mordvin E.Yu. Modelirovanie klimata zapadnoy Sibiri: verifikatsiya rezultatov modeli REGCM4 [Modeling West Siberia Climate: Verification Results of the RegCM4 Model]. *Lomonosovskie chteniya na Altae: fundamentalnye problemy nauki i obrazovaniya: Sbornik nauchnykh statey mezhdunarodnoy konferentsii*. Barnaul, Izd-vo AltGU Publ., 2015, pp. 1218-1221.

8. Ponko V.A., Ivanova M.I., Khizametdinov S.V., Petrenko P.P. O ratsionalnom agrarnom prirodopolzovanii v Sibiri [About Rational Agrarian Environmental Management in Siberia]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo*, 2016, no. 6, pp. 22-26.

9. Meleshko V.P., Gruza G.V., Zaytsev A.S., Karol I.L., Kattsov V.M., Kobysheva N.V. *Otsenochnyy doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii rossiyskoy federatsii* [Rohydromet Assessment Report on Climate Change Its Consequences in Russian Federation]. URL: <http://climate2008.igce.ru/>.

10. Tyusov G.A., Akentyeva E.M., Pavlova T.V., Shkolnik I.M. Otsenki vozmozhnogo vliyaniya izmeneniy klimata na funktsionirovanie obyektov energetiki v Rossii [Projected Climate Change Impacts on the Operation of Power Engineering Facilities in Russia]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2017, no. 12, pp. 47-57.

11. Fedorov V.M. Variatsii insolyatsii zemli i osobennosti ikh uchyota v fiziko-matematicheskikh modelyakh klimata [Earth Insolation Variation and Its Incorporation Into Physical and Mathematical Climate Models]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2019, vol. 189, no. 1, pp. 33-46.

12. Firsov K.M., Chesnokova T.Yu., Bobrov E.V. Rol kontinualnogo pogloshcheniya parov vody v dlinnovolnykh radiatsionnykh protsessakh prizemnogo sloya atmosfery v regione Nizhnego Povolzhya [Role of Water Vapor Continual Absorption in the Atmospheric Longwave Radiative Processes of the Surface Layer in the Lower Volga Region]. *Optika atmosfery i okeana*, 2014, vol. 27, pp. 665-672.

13. Chesnokova T.Yu., Klitochenko I.I., Firsov K.M. Vklad kontinualnogo pogloshcheniya N₂O v potoki dlinnovolnogo izlucheniya oblachnoy i bezoblachnoy atmosfery [Contribution of Water Vapor Continuum Absorption to Longwave Radiative Fluxes in the Cloudy and Cloudless Atmosphere]. *Optika atmosfery i okeana*, 2016, vol. 29, no. 10, pp. 843-849.

14. Yarovaya D.A., Pososhkov V.L. Parametry atmosferykh osadkov v Azovo-Chernomorskom regione na osnove modelnykh i naturnykh dannykh [Parameters of the Azov-Black Sea Region Precipitation Based on the Model and Field Data]. *Morskoy gidrofizicheskyy zhurnal*, 2017, no. 1 (193), pp. 11-26.

15. Baloga I., Ruti P., Tobin I., Armenio V., Vautard R. A Numerical Approach for Planning Offshore Wind Farms From Regional to Local Scales over the Mediterranean. *Renewable Energy*, 2016, vol. 85, pp. 395-405.

16. Arking A., Grossman K. The Influence of Line Shape and Band Structure on Temperatures in Planetary Atmospheres. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1972, vol. 29, pp. 937-949.

17. Clough S.A., Shephard M.W., Mlawer E.J., Delamere J.S., Iacono M.J., Cady-Pereira K., Boukabara S., Brown P.D. Atmospheric Radiative Transfer Modeling: a Summary of the AER Codes. *Journal of Quantitative Spectroscopy Radiative Transfer*, 2005, vol. 91, pp. 233-244.

18. Baranov Yu.I., Lafferty W.J. The Water Vapour Self- and Water-Nitrogen Continuum Absorption in the 1000 and 2500 Cm⁻¹ Atmospheric Windows. *Phil. Trans. R. Soc. A.*, 2012, vol. 370, pp. 2578-2589.

19. Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., Berntsen T., Betts R., Fahey D.W., Haywood J., Lean J., Lowe D.C., Myhre G. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. *Climate Change*, 2007, pp. 129-134.

20. Akperov M., Mokhov I.I., Semenov V.A., Dembitskaya M.A. Cyclone Activity in the Arctic From an Ensemble of Regional Climate Models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, vol. 123, no. 5, pp. 2537-2554.

21. Kiehl J.T., Hack J.J., Bonan G.B., Boville B.A., Breigleb B.P., Williamson D., Rasch P. Description of the Near Community Climate Model (Ccm3), Tech. Rep. NCAR/TN-420+STR. *National Center for Atmospheric Research*, 1996, pp. 152.

22. Mlawer E.J., Payne V.H., Moncet J.-L., Delamere J.S., Alvarado M.J., Tobin D.C. Development and Recent Evaluation of the MT_CKD Model of Continuum Absorption. *Phil. Trans. R. Soc. A.*, 2012, vol. 370, pp. 2520-2556.
23. Domoto G.A. Frequency Integration for Radiative Transfer Problem Involving Homogeneous Non-Gray Gases: the Inverse Transmission Function. *Journ. Quant. Spectrsc. and Radiat. Transf.*, 1974, vol. 14, pp. 935-942.
24. Dozkurt D., Turuncoglu U., Sen O.L. Downscaled Simulations of the ECHAM5, CCSM3 and HadCM3 Global Models for the Eastern Mediterranean--Black Sea Region: Evaluation of the Reference Period. *Physical Oceanography*, 2012, vol. 39, pp. 207-225.
25. Ellingson R.G., Ellis J., Feis S. The Intecomparison of Radiation Codes Used in Climate Models: Long Wave Results. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1991, vol. 96, pp. 8929-8953.
26. Firsov K.M., Chesnokova T.Yu., Bobrov E.V., Klitochenko I.I. *Estimation of uncertainties in the longwave radiative fluxes simulation due to spectroscopic errors*. Proc. SPIE 9292, 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. URL: 10.1117/12.2075550.
27. Fourquart Y., Bonnel B., Ramaswamy V. Intercomparing Shortwave Radiation Codes for Climate Studies. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1991, vol. 96, iss. D5, pp. 8955-8968. DOI: 10.1029/90JD00290.
28. Gao X.J., Shi Y., Giorgi F. Comparison of Convective Parameterizations in RegCM4 Experiments over China with CLM as the Land Surface Model. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2016, vol. 9, pp. 246-254.
29. Giorgi F., Coppola E., Solmon F. RegCM4: Model Description and Preliminary Tests over Multiple CORDEX Domains. *Climate Research*, 2012, vol. 52, pp. 7-29.
30. Grell G.A., Dudhia J., Stauffer D.R. *Description of the fifth generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5)*. NCAR Scientific Tech Note. NCAR/TN-398+STR. URL: <http://n2t.net/ark:/85065/d7b857g2>. DOI: 10.5065/D60Z716B.
31. Krysanova V., Hattermann F., Hattermann F., Kundzewicz Z.W., Donnelly C., Arheimer B., Gelfan A., Gerten D. How the Performance of Hydrological Models Relates to Credibility of Projections Under Climate Change. *Hydrological Sciences Journal*, 2018, vol. 63, no. 5, pp. 696-720. DOI: 10.1080/02626667.2018.1446214.
32. Kalugin A.S., Motovilov Y.G., Padari A. Runoff Formation Model for the Amur River Basin. *Water Resources*, 2018, vol. 45, pp. 121-132.
33. Khoperskov A.V., Titov A.V. Regional Climate Model for the Lower Volga: Parallelization Efficiency Estimation. *Supercomputing Frontiers and Innovations*, 2018, vol. 5, no. 4, pp. 107-110. DOI: 10.14529/jsfi180413.
34. Klikunova A.Yu., Khoperskov A.V. Numerical Hydrodynamic Model of the Lower Volga. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1128, no. 012087, pp. 1-6. DOI: 10.1088/1742-6596/1128/1/012087.
35. Krichak S.O., Small E.E., Eltahir E.A.B. Regional Climate Model Simulation of Present-Day Regional Climate over the European Part of Russia with RegCM3. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2008, vol. 33, pp. 20-26.
36. Kulkarni S., Deo M.C., Ghosh S. Performance of the CORDEX Regional Climate Models in Simulating Offshore Wind and Wind Potential. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, vol. 135, pp. 1449-1464.
37. Kundzewicz Z.W., Stakhiv E.Z. Are Climate Models «ready for Prime Time» in Water Resources Management Applications, Or Is More Research Needed. *Hydrological Sciences Journal*, 2010, vol. 55, pp. 1085-1089.
38. Lacis A.A., Oinas V.A. A Description of the K-Distribution Methods for Modelling Nongray Gaseous Absorption, Thermal Emission, and Multiple Scattering in Vertically Inhomogeneous Atmospheres. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1991, vol. 96, no. D5, pp. 9027-9063.
39. Mokhov I.I. Assessment of the Ability of Contemporary Climate Models to Assess Adequately the Risk of Possible Regional Anomalies and Trends. *Doklady Earth Sciences*, 2018, vol. 479, no. 2, pp. 482-485. DOI: 10.1134/S1028334X18040050.

40. Neckel H., Labs D. The Solar Radiation Between 3300 and 23500 Å. *Solar Physics*, 1984, vol. 26, pp. 205-258. DOI: 10.1029/90JD00290.
41. 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. *Journal of Geophysical Research*, 2000, vol. 105, pp. 29579-29594.
42. Elguindi N., Bi X., Giorgi F., Nagarajan B., Pal J. Regional Climate Model RegCM Reference Manual. *International Centre for Theoretical Physics*, 2014, pp. 1-37.
43. Roberts R.E., Selby J.E.A., Biberman L.M. Biberman Infrared Continuum Absorption by Atmospheric Water Vapor in the 8 –12 Micron Meter Window. *Application Optics*, 1976, vol. 15, pp. 2085-2090.
44. Tamm O., Maasikamae S., Padari A. Modelling the Effects of Land Use and Climate Change on the Water Resources in the Eastern Baltic Sea Region Using the SWAT Model. *Catena*, 2018, vol. 167, pp. 78-89.
45. Volodin E.M. Simulation of Modern Climate with the New Version of the INM RAS Climate Model. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2017, vol. 53, pp. 142-155. DOI: 10.1134/S0001433817020128.
46. Baranov Yu.I., Lafferty W.J., Ma Q., Tipping R.H. Water-Vapor Continuum Absorption in the 800–1250 Cm⁻¹ Spectral Region at Temperatures From 311 to 363 K. *JQSRT*, 2008, vol. 109, pp. 2291-2302.
47. Xu J., Koldunov N., Remedio A.R.C. On the Role of Horizontal Resolution over the Tibetan Plateau in the REMO Regional Climate Model. *Climate Dynamics*, 2018, vol. 51, no. 11-12, pp. 4525-4542. DOI: 10.1007/s00382-018-4085-7.

DEPLOYMENT OF THE REGIONAL CLIMATE MODEL FOR THE SOUTH OF RUSSIA BASED ON REGCM 4.5

Alexander Valentinovich Khoperskov

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Head of the Department of Information Systems and Computer Modeling,
Vologograd State University
khoperskov@gmail.com, infomod@volsu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0149-7947>
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Vologograd, Russian Federation

Konstantin Mikhaylovich Firsov

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Laser Physics,
Vologograd State University
fkm@volsu.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Vologograd, Russian Federation

Alexander Viktorovich Titov

Assistant, Department of Information Systems and Computer Modeling,
Vologograd State University
alexandr.titov@volsu.ru, infomod@volsu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6373-9708>
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Vologograd, Russian Federation

Aleksey Aleksandrovich Razmolov

Postgraduate Student,
Volgograd State University
alek.razmolov2010@yandex.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Abstract. We describe the first stage of the deployment of the regional climate model for Southern Russia based on RegCM 4.5, which requires updating a set of parameterization schemes for subgrid physical processes for the simulated region. Modeling the general circulation of the atmosphere requires a high rate of calculation of the radiation characteristics, which implies a high degree of parametrization of the radiation transfer equation, including the characteristics of molecular absorption. Molecular absorption has a high selectivity compared with aerosol and molecular scattering in the visible and infrared spectral range, which is a significant problem.

The calculation schemes in the RegCM radiation block are described in detail. Our research has shown that the rows of exhibitors provide a high degree of parametrization and high accuracy of calculation comparable to the line-by-line method. Calculations of fluxes of long-wave radiation with different versions of the spectroscopic HITRAN database showed that the differences between the down-fluxes are less than 0.1 W/m^2 at the lower atmosphere for summer in moderate latitudes, and fluxes upwards are not more than 0.6 W/m^2 at the upper boundary of the atmosphere. The upstream value at the upper atmosphere is 281.01 W/m^2 using the spectroscopic database HITRAN2012, and our estimate of the downward flux is 351.16 W/m^2 .

These results indicate that modern spectroscopic databases provide highly accurate calculation of broadband fluxes. To estimate the uncertainty in the radiation fluxes, we used the continuum absorption model for the vapor H_2O , which was used in the entire long-wavelength spectral range except the transparency window $830\text{--}1130 \text{ cm}^{-1}$, where we used our model based on experimental data.

Initial and boundary conditions are determined from the European Center for Medium-Range Weather Forecast's ERA-Interim global climate model (EIN 15), and Indian Ocean Sea Surface Temperature (IOSST) data are used to set sea surface temperatures.

The verification phase includes analyzing the choice of the computing area, determining the accuracy of the vertical profiles of parameters, comparing temperature fields using observational data. We propose to analyze the spatial-temporal characteristics of specific meteorological events, first of all, heavy precipitation to assess the quality of regional climate models. This approach seems to be more reliable than the traditional consideration of temperature distributions.

Key words: climate simulations, regional climate models, data assimilation, parallelization efficiency.