

Система COSMO-Ru негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: второй этап реализации и развития

Г. С. Ривин*, И. А. Розинкина*, Р. М. Вильфанд*, Д. Ю. Алферов*,
Е. Д. Астахова*, Д. В. Блинов*, А. Ю. Бундель*, Е. В. Казакова*,
А. А. Кирсанов*, М. А. Никитин*, В. Л. Перов*, Г. В. Суркова*,
А. П. Ревокатова*, М. В. Шатунова*, М. М. Чумаков*

Описан второй этап работы (2011—2014 гг.) по реализации и развитию системы мезомасштабного негидростатического краткосрочного прогноза погоды COSMO-Ru (первый этап реализации и развития системы COSMO-Ru описан в работах [7, 8]). Показано влияние работ и идей Г. И. Марчука на развитие современных методов решения систем дифференциальных уравнений, описывающих атмосферные процессы (в частности, вариант метода расщепления Марчука используется для нахождения решения разностной схемы системы дифференциальных уравнений модели COSMO), и методов усвоения метеорологической информации, связанных с применением сопряженных уравнений. Приводится краткое описание модели атмосферы и деятельного слоя суши COSMO, системы COSMO-Ru и работ по развитию этой системы.

Ключевые слова: ###

###

Введение

На развитие основных направлений [45] современного численного прогноза погоды, а именно методов решения систем дифференциальных уравнений, описывающих атмосферные процессы, и методов усвоения метеорологической информации, связанных с применением сопряженных уравнений, существенное влияние оказали работы Гурия Ивановича Марчука. Так, предложенный им метод расщепления решения конечно-разностных аналогов систем дифференциальных уравнений, описывающих атмосферные процессы, используемый в его различных вариантах практически во всех оперативных численных моделях прогноза погоды, принято называть методом Марчука [21].

Для демонстрации признания вклада Г. И. Марчука приведем два характерных примера.

В своем интервью выдающийся канадский специалист в области численного прогноза погоды А. Робер [44] рассказал о влиянии, которое на него оказали

* Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации; e-mail: gdaly.rivin@mail.ru.

работы Г. И. Марчука, и прямо сказал, что его известный полунейный метод является эффективной модификацией нейного метода Г. И. Марчука, опубликованного в 1965 г. в работе [41]. Это интервью показывает, что для отражения вклада обоих ученых следует называть этот метод не полунейным методом, а полунейным методом Марчука — Робера.

В обзорной статье [43], опубликованной в 1986 г. в сборнике докладов Международной конференции “Вариационные методы в науках о Земле”, главным редактором которого являлся Й. Сасаки — основатель применения вариационных методов в метеорологии, указывается, что применение сопряженных уравнений в разных метеорологических проблемах (например, в современных методах вариационного усвоения данных) основано на пионерских работах Г. И. Марчука [18, 42] (их описание приведено в обзоре [39]).

Следует отметить, что Гурий Иванович Марчук явился инициатором, руководителем и главным мозговым центром по решению целого комплекса работ по разным направлениям вычислительной метеорологии и океанологии, суммированным Г. И. Марчуком в монографиях [13—18]. При этом Гурий Иванович проводил не только теоретические исследования, но и стремился довести их до практического применения.

В качестве примера можно привести цикл работ, выполненных им и его учениками при его непосредственном участии, по разработке оперативной системы краткосрочного прогноза погоды для Сибирского региона. Первая публикация [20] этого цикла была опубликована 50 лет назад. В этой статье были описаны результаты численного прогноза для ограниченной территории с примитивными (теперь чаще говорят — полными, точнее исходными) уравнениями гидротермодинамики на 10 уровнях по вертикали (отметим, что в это время в мире еще не было публикаций об экспериментах с примитивными уравнениями с таким числом уровней по вертикали). На основе этой работы и приобретенном опыте применения конечно-разностных законов сохранения в дальнейшем для Сибирского региона была подготовлена оперативная численная модель атмосферы, использующая метод расщепления для системы уравнений адвекции и нормальные моды для эффективного нахождения решения системы уравнений адаптации, сначала адиабатическая [19], затем неадиабатическая [9]. Соответствующую технологическую линию более 25 лет использовали в качестве оперативной в Новосибирске. В работе [27] приведены обзор работ, связанных с разработкой и совершенствованием этой системы прогноза погоды для Сибирского региона, эффективный вариант адиабатической версии модели и оценки качества этого варианта.

Влияние Г. И. Марчука и его школы ощущается и на работах, связанных с развитием системы COSMO-Ru. Так, приятно отметить, что метод решения конечно-разностной схемы [34] системы уравнений модели COSMO также основан на связанном с расщеплением по времени варианте [50] метода расщепления Марчука [17].

Система COSMO-Ru

В сентябре 2009 г. Росгидромет стал полноправным членом метеорологического консорциума COSMO (COnsortium for Small-scale MOdeling). Цель и обязанность метеослужб — членов консорциума (Германии, Греции, Италии, Польши, России, Румынии и Швейцарии) — совместно развивать и поддержи-

вать общую для ограниченной территории оперативную совместную модель COSMO негидростатической модели атмосферы и многослойной модели деятельного слоя суши [30]. Метеослужбы — члены консорциума COSMO — для задания необходимых начальных и боковых граничных условий для прогноза по ограниченной территории получают в оперативном режиме прогностические поля системы ICON (с 20 января 2015 г.) глобального моделирования Метеорологической службы Германии (Германия, Польша, Россия и Румыния) и системы IFS Европейского центра среднесрочных прогнозов (Греция, Италия и Швейцария). Оперативная *негидростатическая* модель ICON в настоящее время имеет 90 уровней по вертикали (до 75 км) и шаг треугольной сетки по горизонтали 13 км [51].

В соответствии с правилами консорциума версия Росгидромета модели COSMO имеет название COSMO-Ru.

Первый этап реализации и развития системы COSMO-Ru описан в работах [7, 8]. Уже на этом этапе система COSMO-Ru показала достаточно высокий уровень успешности и информативности прогнозирования, особенно метеорологических величин в приземном слое атмосферы, несмотря на то, что была использована небольшая сетка, имеющая $168 \times 300 \times 40$ узлов с шагом $h = 14$ км (168 узлов по параллели, 300 — по меридиану и 40 — число уровней).

Ввод в эксплуатацию в 2009 г. вычислительной системы SGI Altix 4700 позволил уменьшить шаг сетки, увеличить число узлов и создать оперативную систему COSMO-Ru7 с сеткой $700 \times 620 \times 40$ узлов с шагом $h = 7$ км. Эта сетка включает не только европейскую территорию России, но и Урал, часть Западной Сибири и почти всю Европу (за исключением ее самой западной части: Великобритании, Гренландии, Ирландии, Исландии, Испании, Португалии и Франции).

11 апреля 2011 г. Центральная методическая комиссия Росгидромета, рассмотрев оперативные испытания системы в Гидрометцентре России для теплого (с 1 мая по 30 сентября 2010 г.) и холодного (с 1 октября 2010 г. по 25 марта 2011 г.) периодов [28] приняла решение рекомендовать Гидрометцентру России внедрить в оперативную практику в качестве базовой модель COSMO-Ru7 для численного прогнозирования следующих метеорологических величин (полей и метеограмм): осадков, температуры и влажности воздуха, фонового приземного ветра, подготовить технологию распространения прогностической продукции модели COSMO-Ru7 в прогностические подразделения УГМС/ЦГМС европейской территории России и рекомендовать оперативно-прогностическим подразделениям Росгидромета использовать в практической работе выходную продукцию мезомасштабной модели COSMO-Ru7.

К настоящему времени в вычислительной системе Росгидромета в Москве и Новосибирске для слоя атмосферы толщиной 23 км и деятельного слоя суши толщиной 7 м функционирует разработанная технологическая линия системы COSMO-Ru для следующих территорий (рис. 1):

— Центральной и Восточной Европы, Урала и части Западной Сибири (с запада на восток от Франции до Новосибирской области и с севера на юг от Новой Земли до Ливана), сетка $700 \times 620 \times 40$ с шагом $h = 7$ км, шаг по времени $\Delta t = 66$ с, прогноз на 78 ч, COSMO-Ru7;

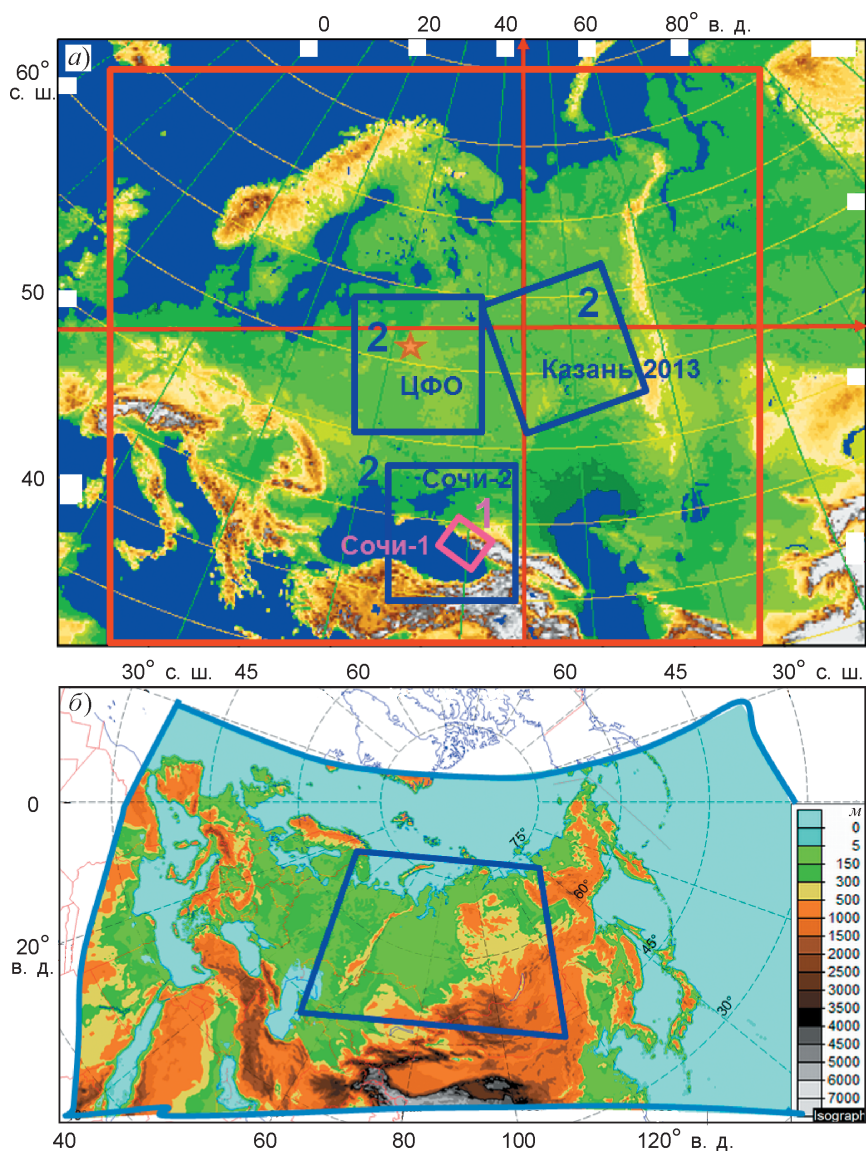


Рис. 1. Области интегрирования системы COSMO-Ru:
 а) COSMO-Ru1 (Сочи1), COSMO-Ru2 (ЦФО, Сочи-2 и Казань-2013) и COSMO-Ru7 (граница выделена красным цветом); б) COSMO-RuENA (вся область) и COSMO-RuSib (внутренняя область).

— Сибири, Урала и восточной части европейской части России, сетка $360 \times 250 \times 40$ с $h = 14$ км, $\Delta t = 80$ с, прогноз на 78 ч (прогноз проводится только в Новосибирске), COSMO-RuSib14;

— часть Южного федерального округа, прилегающая к Черному и Азовскому морям, сетка $420 \times 470 \times 50$ с $h = 2,2$ км, $\Delta t = 15$ с, прогноз на 42 ч, COSMO-RuSFO2;

— Центрального федерального округа, сетка $420 \times 470 \times 50$ с $h = 2,2$ км, $\Delta t = 15$ с, прогноз на 24 ч, COSMO-RuCFO2;

— Европы и северной части Азии, сетка $1000 \times 500 \times 40$ с $h = 13,2$ км, $\Delta t = 80$ с, прогноз на 168 ч, COSMO-RuENA13.

Кроме того, для метеорологического обеспечения Летней универсиады Казань-2013 и Зимней Олимпиады Сочи-2014 были разработаны и применены специальные технологические линии системы COSMO-Ru для следующих территорий:

— региона с центром в Казани, сетка $420 \times 470 \times 50$ с $h = 2,2$ км, $\Delta t = 15$ с, прогноз на 42 ч, COSMO-RuVFO2;

— региона Сочи, сетка $190 \times 190 \times 50$ с $h = 1,1$ км, $\Delta t = 5$ с, прогноз на 36 ч, COSMO-RuSoc1.

Система уравнений модели COSMO

В качестве *горизонтальных координат* используется так называемая *сдвинутая* сферическая система координат (λ, φ) , в которой северный полюс сдвинут по меридиану, имеющему географическую долготу λ_g , так, что экватор в этой системе пройдет также через заданную точку (например, для COSMO-Ru7 для этой точки заданы координаты Москвы). Благодаря этому сдвинутая сферическая система координат позволяет получить расстояние по меридиану и параллели между соседними узлами сетки, фактически близкими, если равно расстояние в градусах.

В модели COSMO-Ru использована *гибридная вертикальная координата* ζ , равная высоте над уровнем моря для точек, лежащих выше некоторой заданной величины, а ниже — основанная на высоте поверхности земли над уровнем моря с учетом крупномасштабной и мезомасштабной частей орографии [46].

Переменные модели заданы по вертикали на сетке Лоренца (скаляры задаются в центрах кубов, окружающих узел сетки, а нормальные компоненты скорости — на соответствующих гранях) и на сетке C по классификации Аракавы по горизонтали.

Атмосфера в модели рассматривается как смесь сухого воздуха, водяного пара, жидкой и твердой фаз воды (последние две категории могут быть также разбиты на подкатегории: капли воды в облаках, дождевые капли, кристаллы льда, град и т. п.). Негидростатическая атмосферная модель COSMO-Ru основана на системе термогидродинамических уравнений, описывающих сжимаемый поток воздуха во влажной атмосфере [34, 35, 36, 40, 47, 48, 50] и базируется на системе уравнений, описывающих основные законы механики сплошных сред: законе сохранения массы, законе сохранения импульса (количества движения), законе сохранения энергии и уравнения состояния (уравнение Клапейрона).

Введем следующие обозначения: t — время, с; p — давление, Па = Н/м²; ρ — плотность, кг/м³; $\vec{V} = (u, v, w)$ — скорость, м/с; T — температура, К; T_c — температура, °С; g — ускорение свободного падения, $g \approx 9,81$ м/с²; $\vec{\Omega}$ — вектор угловой скорости вращения Земли, рад/с, $|\vec{\Omega}| \approx 7,292 \times 10^{-5}$ рад/с; Q — приток тепла, Дж/кг, 1 Дж = 1 кг $\times$ м²/с²; R — удельная газовая постоянная, $R = 287$ Дж/(К $\times$ кг); c_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении, $c_p = 1004$ Дж/(К $\times$ кг); c_v — удельная теплоемкость при постоянном объеме, $c_v = 717$ Дж/(К $\times$ кг); $\vec{F}_V$ — вектор силы, определяемый в дальнейшем при параметризации физических процессов; $T = T_c + 273,15$ К; $\kappa = c_p/c_v \approx 1,4$; θ — потенциальная температура, $\theta = T(1000/p)^{R/c_p}$.

Система уравнений модели (вывод дан в работе [36]), приведенная к координатам $(\lambda, \varphi, \zeta)$, где ζ — криволинейная орографическая координата, выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = - \left\{ \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial E_h}{\partial \lambda} - v V_a \right\} - \dot{\zeta} \frac{\partial u}{\partial \zeta} - \frac{1}{\rho a \cos \varphi} \left(\frac{\partial p'}{\partial \lambda} - \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \frac{\partial p_0}{\partial \lambda} \frac{\partial p'}{\partial \zeta} \right) + M_u, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = - \left\{ \frac{1}{a} \frac{\partial E_h}{\partial \varphi} + u V_a \right\} - \dot{\zeta} \frac{\partial v}{\partial \zeta} - \frac{1}{\rho a} \left(\frac{\partial p'}{\partial \varphi} - \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \frac{\partial p_0}{\partial \varphi} \frac{\partial p'}{\partial \zeta} \right) + M_v, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} = & - \left\{ \frac{1}{a \cos \varphi} u \frac{\partial w}{\partial \lambda} + v \cos \varphi \frac{\partial w}{\partial \varphi} \right\} - \dot{\zeta} \frac{\partial w}{\partial \zeta} + \frac{g}{\sqrt{\gamma}} \frac{\rho_0}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial \zeta} + M_w + \\ & + g \frac{\rho_0}{\rho} \left\{ \frac{(T - T_0)}{T} - \frac{T_0 p'}{T p_0} \right\} + g \frac{\rho_0}{\rho} \left\{ \left(\frac{R_v}{R_d} - 1 \right) q^v - q^l - q^f \right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial p'}{\partial t} = - \left\{ \frac{1}{a \cos \varphi} \left(u \frac{\partial p'}{\partial \lambda} + v \cos \varphi \frac{\partial p'}{\partial \varphi} \right) \right\} - \dot{\zeta} \frac{\partial p'}{\partial \zeta} + g \rho_0 w - \frac{c_{pd}}{c_{vd}} p D, \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = - \left\{ \frac{1}{a \cos \varphi} \left(u \frac{\partial T}{\partial \lambda} + v \cos \varphi \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) \right\} - \dot{\zeta} \frac{\partial T}{\partial \zeta} - \frac{1}{\rho c_{vd}} p D + Q_T, \quad (5)$$

$$\frac{\partial q^v}{\partial t} = - \left\{ \frac{1}{a \cos \varphi} \left(u \frac{\partial q^v}{\partial \lambda} + v \cos \varphi \frac{\partial q^v}{\partial \varphi} \right) \right\} - \dot{\zeta} \frac{\partial q^v}{\partial \zeta} - (S^l + S^f) + M_{q^v}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial q^l}{\partial t} = - \left\{ \frac{1}{a \cos \varphi} \left(u \frac{\partial q^l}{\partial \lambda} + v \cos \varphi \frac{\partial q^l}{\partial \varphi} \right) \right\} - \dot{\zeta} \frac{\partial q^l}{\partial \zeta} - \frac{g}{\sqrt{\gamma}} \frac{\rho_0}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial \zeta} + S^l + M_{q^l}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial q^f}{\partial t} = - \left\{ \frac{1}{a \cos \varphi} \left(u \frac{\partial q^f}{\partial \lambda} + v \cos \varphi \frac{\partial q^f}{\partial \varphi} \right) \right\} - \dot{\zeta} \frac{\partial q^f}{\partial \zeta} - \frac{g}{\sqrt{\gamma}} \frac{\rho_0}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial \zeta} + S^f + M_{q^f}, \quad (8)$$

$$\rho = p \left\{ R_d \left(1 + \left(\frac{R_v}{R_d} - 1 \right) q^v - q^l - q^f \right) T \right\}^{-1}. \quad (9)$$

Здесь

$$B = g \frac{\rho_0}{\rho} \left\{ \frac{T'}{T} - \frac{T_0 p'}{T p_0} + \left(\frac{R_v}{R_d} - 1 \right) q^v - q^l - q^f \right\},$$

$$E_h = \frac{1}{2} (u^2 + v^2) \text{ — кинетическая энергия горизонтального движения,}$$

$$V_a = \frac{1}{a \cos \varphi} \left\{ \frac{\partial v}{\partial \lambda} - \frac{\partial}{\partial \varphi} (v \cos \varphi) \right\} + f \text{ — абсолютный вихрь,}$$

$$\sqrt{\gamma} = \frac{\partial p_0}{\partial \zeta} \text{ — модифицированный якобиан перехода к } \zeta\text{-координатам.}$$

Значения функций $\dot{\zeta}$ и D вычисляются по следующим формулам:

$$\dot{\zeta} = - \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \left(\frac{u}{a \cos \varphi} \frac{\partial p_0}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial p_0}{\partial \varphi} + g \rho_0 w \right),$$

$$D = \frac{1}{a \cos \varphi} \left\{ \frac{\partial u}{\partial \lambda} - \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \frac{\partial p_0}{\partial \lambda} \frac{\partial u}{\partial \zeta} + \frac{\partial}{\partial \varphi} (v \cos \varphi) - \frac{\cos \varphi}{\sqrt{\gamma}} \frac{\partial p_0}{\partial \varphi} \frac{\partial v}{\partial \zeta} \right\} - \frac{g \rho_0}{\sqrt{\gamma}} \frac{\partial w}{\partial \zeta}.$$

Члены в правых частях уравнений, обозначенные буквой M с символом, описывают притоки из-за турбулентного перемешивания:

$$M_u \equiv -\frac{1}{\rho}(\nabla T) \vec{e}_k, \quad M_v \equiv -\frac{1}{\rho}(\nabla T) \vec{e}_\varphi, \quad M_w \equiv -\frac{1}{\rho}(\nabla T) \vec{e}_z, \\ M_{q^x} \equiv -\frac{1}{\rho} \nabla \bar{F}^x, \quad M_T \equiv -\frac{1}{\rho c_{pd}} \nabla \bar{H};$$

переменные S^l и S^f описывают источники и стоки соответствующих компонентов из микрофизики облаков на единицу массы сухого воздуха,

$$\vec{P}^{l,f} = P_{l,f} \vec{e}_z = -\rho q^{l,f} |\vec{v}_T^{l,f}| \vec{e}_z;$$

член $Q_T \equiv \frac{1}{\rho c_{pd}} Q_h = \frac{L_v}{c_{pd}} S^l + \frac{L_s}{c_{pd}} S^f + M_T + Q_r$ описывает неадиабатический приток тепла в T -уравнении (5), а $Q_r \equiv -1/\rho c_{pd} \nabla \bar{R}$ — изменение температуры из-за притока (стока) тепла вследствие солнечной и тепловой радиации.

Если известны члены M_ψ , S^l и S^f , P^l и P_f , а также радиационный приток тепла Q_r , который входит в выражение для общего неадиабатического притока тепла

$$Q_T = \frac{L_v}{c_{pd}} S^l + \frac{L_s}{c_{pd}} S^f + M_T + Q_r,$$

то уравнения (1)—(9) составляют замкнутую систему, позволяющую рассчитывать и прогнозировать 9 метеорологических величин u , v , w , T , p , ρ , c , q^v , q^l и q^f .

Физическая часть модели содержит описание радиационных и конвективных процессов, процессов, происходящих в облаках и деятельном слое почвы, осадков [35].

Метод решения конечно-разностного аналога системы уравнений (1)—(9) является вариантом [50] метода расщепления по времени Марчука [17]. Этот вариант Викера — Скамарока связан с расщеплением системы уравнений на две системы: одна с быстрыми акустическими и гравитационными волнами и силой плавучести (соответствующие члены подчеркнуты в уравнениях (1)—(5)), вторая — с медленными атмосферными процессами, определяющими качество прогнозов. По времени используется трехшаговый метод Рунге — Кутты, адвективные члены аппроксимируются с 5-м порядком. Для конвективных членов применяется явно-неявный метод, а для диффузионных — метод Кранка — Николсона. Подробное изложение дано в работе [34] и в приведенных там ссылках.

Результаты численного прогноза погоды с помощью системы COSMO-Ru получают ежедневно 4 раза в сутки по начальным данным 0, 6, 12 и 18 ч ВСВ, их подготавливают и пересылают пользователям на серверы в виде файлов в коде GRIB (в разных системах вертикальных координат и разного состава в зависимости от запросов пользователей), в виде метеорологических карт (порядка 3000 карт в сутки) и метеограмм (примерно 1000 в сутки) пересылают по электронной почте и частично выкладывают на сайтах Росгидромета, Гидрометцентра России и СибНИГМИ. Численные прогнозы COSMO-Ru проводятся параллельно прогнозам по модели ICON со сдвигом примерно 10 мин. На рис. 2 показана технологическая линия системы COSMO-Ru. В настоящее время при параллельном использовании 288 ядер суперкомпьютера SGI ICE-X оперативные прогнозы на 78 ч для сетки $700 \times 620 \times 40$ с шагом $h = 7$ км требуют примерно 50 мин процессорного времени. Рассылка всех карт, метеограмм и файлов для двух первых территорий заканчивается через 3 ч 45 мин после срока наблюдения. На рис. 3 для COSMO-Ru7 приведены счетные уровни по вертикали (це-

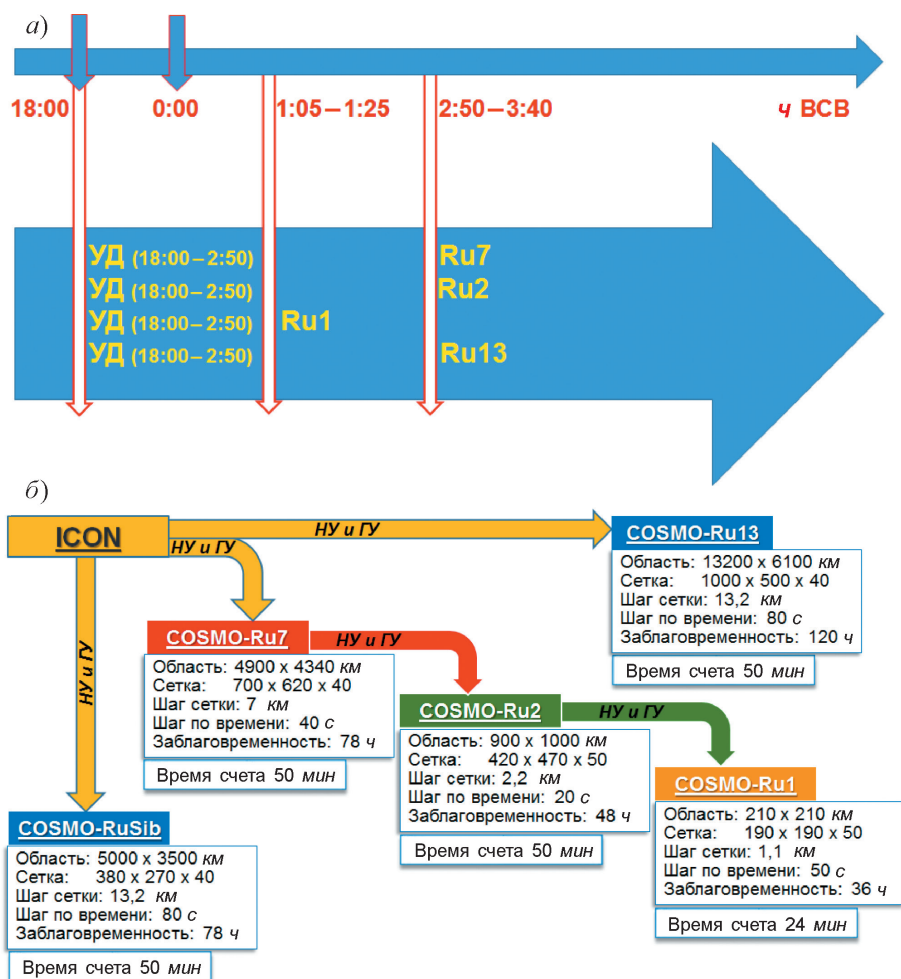


Рис. 2. Технологическая линия системы COSMO-Ru:

а) время счета (УД — усвоение данных), б) начальные (IC) и боковые (BC) условия.

лые — основные) в атмосфере и деятельном слое суши, а также распределение переменных по уровням.

Во время Зимних Олимпийских игр Сочи-2014 система COSMO-Ru была основной оперативной системой прогноза погоды. На рис. 4 для 17—18 февраля 2014 г. приведено сравнение прогнозов температуры на высоте 2 м над поверхностью земли и относительной влажности этой системы с численными прогнозами, подготовленными в проводившей перед этим метеорологическое обслуживание Зимней Олимпиады 2010 г. метеорологической службе Канады с помощью версий модели GEM (Global Environmental Multiscale) с шагами сетки 2,5, 1 км и 250 м. Период 17—18 февраля 2014 г. вошел в список избранных синоптических случаев периода Олимпиады. Он характеризовался ухудшением видимости в горном кластере из-за большой влажности 17 февраля и по причине прохождения холодного фронта 18 февраля. На рис. 4 видно, что прогноз по COSMO-Ru2 и COSMO-Ru1 ближе к данным наблюдений, чем прогнозы по версиям модели GEM.

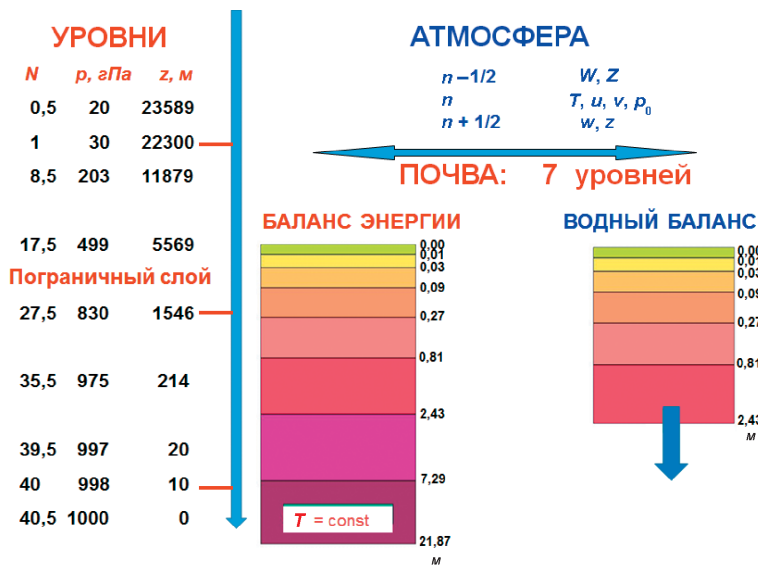


Рис. 3. COSMO-Ru7: счетные уровни по вертикали (целые — основные) в атмосфере и деятельном слое суши, распределение переменных по уровням.

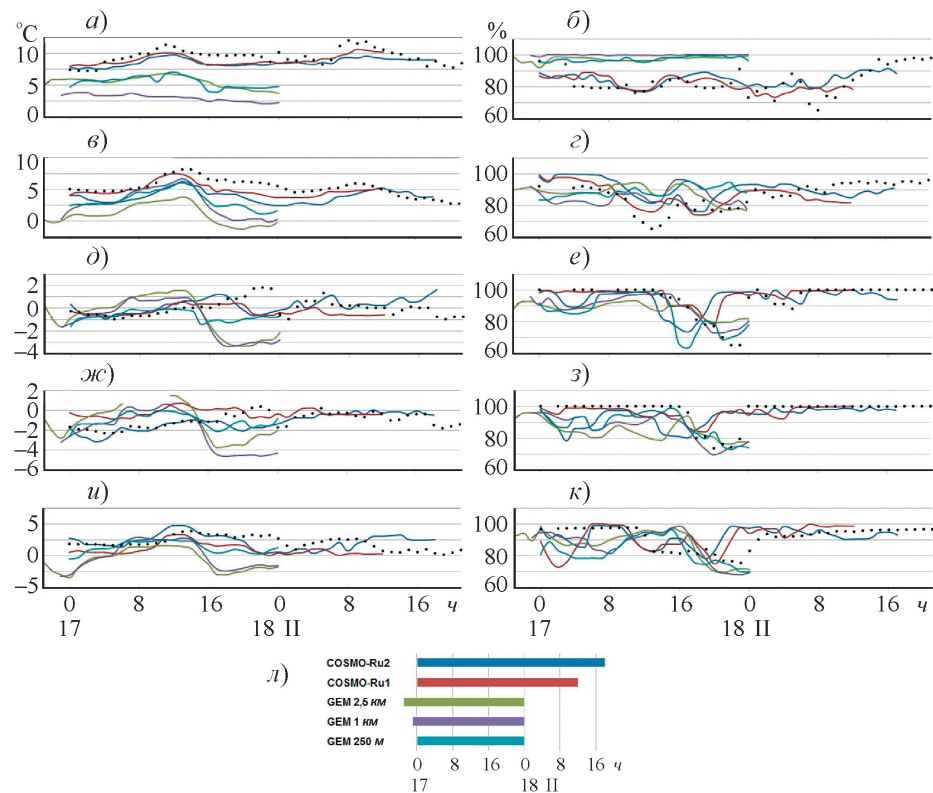


Рис. 4. Сравнение прогнозов температуры на высоте 2 м (а, в, д, е, и) и относительной влажности во время Зимних Олимпийских игр Сочи-2014 по моделям высокого разрешения COSMO-Ru2, COSMO-Ru1, GEM (2,5 км), GEM (1,0 км), GEM (250 м) для одной точки прибрежного кластера (Имеритянка — 5 м) (а, в) и четырех точек горного кластера (Красная Поляна, 560 м (д, ж), Горная карусель, 1480 м (и, к), Роза хутор 4, 1580 м (б, г) и Роза хутор 7, 980 м (е, з) по начальным данным за 17 февраля 2014 г. с данными наблюдений (черные точки).

Во время второго этапа в Гидрометцентре России проведены следующие работы по развитию COSMO-Ru:

- разработана технологическая линия включая препроцессинг и постпроцессинг (циклическая архивация, визуализация, расчет высоты свежевыпавшего снега, подготовка и распространение результатов) [4, 11, 29];

- разработаны новые и предложены модификации некоторых используемых в модели параметризаций физических [10, 24, 25, 37, 38] процессов в атмосфере и деятельном слое суши;

- проведена работа по адаптации химического блока COSMO-ART [49] к системе COSMO-Ru, организации ежедневной работы COSMO-Ru7-ART в квазиоперативном режиме [26, 31, 32];

- проведена разработка варианта усвоения данных на основе метода подталкивания с помощью алгоритма, описанного в работе [47];

- разработана система ансамблевых прогнозов высокого разрешения [1] и обеспечения вероятностными прогнозами [2] для региона проведения Зимних Олимпийских игр;

- проводились непрерывная верификация прогнозов и исследование прогноза опасных метеорологических явлений для отдельных эпизодов [3, 5, 6, 22, 23];

- подготовка и проведение оперативного метеорологического обслуживания прогнозами системы COASMO-Ru важнейших мероприятий в стране (например, Универсиады в Казани в 2013 г., Зимней олимпиады Сочи-2014), включая подготовку новой версии COSMO-Ru с шагом сетки 1,1 км [12, 33];

- подготовка новой конфигурации для краткосрочного прогноза погоды по всей территории России и ее регионов с учетом всех областей, влияющих на погоду на территории России, и проведение регулярного прогноза погоды по этой территории.

Подробное описание этой работы приведено в статьях, указанных выше. В настоящее время продолжается работа по совершенствованию модели COSMO, начата работа по переходу к унифицированной сетке для всех версий COSMO-Ru и подготовке к применению нового мощного суперкомпьютера. За основу предполагается использовать сетку и выбор сдвинутой сферической системы координат, используемой для территории COSMO-RuENA.

Работа выполнена благодаря неоценимой помощи руководства и сотрудников Гидрометцентра России, Главного вычислительного центра Росгидромета, СибНИГМИ и кафедры метеорологии и гидрологии географического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова. В частности, большую помощь оказали Г. В. Елисе-ев, Д. Б. Киктев, В. И. Лукьянов, А. Д. Харлашин, М. Ю. Ковтуненко, Ю. В. Алферов, А. Н. Багров, А. Д. Голубев, И. И. Жабина, А. М. Кабак, А. Ю. Недачина, Б. Е. Песков и Ю. А. Степанов (Гидрометцентр России), В. А. Анцыпович и С. В. Лубов (Главный вычислительный центр Росгидромета), В. Н. Крупчатников и И. В. Колотовкин (СибНИГМИ), А. В. Кислов (кафедра метеорологии и гидрологии географического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова), коллеги из консорциума, особенно М. Baldauf, J. Foerstner, J. Helmert, R. Hess, M. Gertz, D. Majewski, D. Mironov, U. Shaettler, C. Schraff (Германия), М. Arpagaus, J.-M. Bettems, P. Eckert, G. de Morsier, P. Steiner (Швейцария), А. Montani, C. Mar-sigli, T. Raccagnella (Италия).

Всем им выражаем свою глубокую признательность.

Литература

1. Алферов Д. А., Астахова Е. Д., Ривин Г. С., Розинкина И. А. Разработка системы ансамблевых прогнозов высокого разрешения для региона проведения Зимних Олимпийских игр Сочи-2014. — Труды Гидрометцентра России, 2014, вып. 352, с. 5—20.
2. Алферов Д. Ю., Ривин Г. С. Система мезомасштабного прогноза погоды COSMO-Ru: ансамблевый прогноз. — Труды Гидрометцентра России, 2011, вып. 346, с. 5—16.
3. Блинов Д. В., Перов В. Л., Песков Б. Е., Ривин Г. С. Экстремальная бора 7—8 февраля 2012 г. в районе г. Новороссийск и ее прогноз по модели COSMO-Ru. — Вестник Московского университета, сер. 5, география, 2013, № 4, с. 36—43.
4. Блинов Д. В., Ривин Г. С., Розинкина И. А. Система мезомасштабного прогноза погоды COSMO-Ru: технологические аспекты визуализации и распространения прогнозов. — Труды Гидрометцентра России, 2011, вып. 346, с. 53—61.
5. Бундель А. Ю., Астахова Е. Д., Розинкина И. А. и др. Верификация кратко- и среднесрочных прогнозов осадков на основе системы ансамблевого моделирования Гидрометцентра России. — Метеорология и гидрология, 2011, № 10, с. 20—34.
6. Бундель А. Ю., Кирсанов А. А., Муравьев А. В. и др. Первые результаты оценки успешности мезомасштабных численных прогнозов COSMO-Ru, выпускаемых в рамках метеобеспечения Олимпиады Сочи-2014. — Труды Гидрометцентра России, 2014, вып. 352, с. 37—54.
7. Вильфанд Р. М., Ривин Г. С., Розинкина И. А. Мезомасштабный краткосрочный региональный прогноз погоды в Гидрометцентре России на примере COSMO-RU. — Метеорология и гидрология, 2010, № 1, с. 5—17.
8. Вильфанд Р. М., Ривин Г. С., Розинкина И. А. Система COSMO-Ru мезомасштабного краткосрочного регионального прогноза погоды Гидрометцентра России: первый этап реализации и развития. — Метеорология и гидрология, 2010, № 8, с. 5—20.
9. Дымников В. П., Контарев Г. Р., Гусева Н. В. и др. Прогноз метеорологических элементов на ограниченной территории по полным уравнениям. — Метеорология и гидрология, 1975, № 9, с. 6—12.
10. Казакова Е. В., Розинкина И. А., Мачульская Е. Е. Результаты тестирования новой схемы параметризации снежного покрова в условиях таяния снега в модели COSMO-Ru. — Труды Гидрометцентра России, вып. 344, Физика атмосферы и прогноз погоды, М., 2010, с. 147—164.
11. Казакова Е. В., Чумаков М. М., Розинкина И. А. Алгоритм расчета высоты свежевыпавшего снега, предназначенный для постпроцессинга систем атмосферного моделирования (на примере COSMO). — Труды Гидрометцентра России, 2013, вып. 350, с. 195—212.
12. Киктев Д. Б., Астахова Е. Д., Блинов Д. В. и др. Развитие прогностических технологий для метеорологического обеспечения Олимпиады Сочи-2014. — Метеорология и гидрология, 2013, № 10, с. 5—15.
13. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. — М., Наука, 1982, 320 с.
14. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики. — М., Наука, 1980, 608 с.
15. Марчук Г. И. Методы расщепления. — М., Наука, 1988, 264 с.
16. Марчук Г. И. Сопряженные уравнения и анализ сложных систем. — М., Наука, 1992, 336 с.
17. Марчук Г. И. Численные методы в прогнозе погоды. — Л., Гидрометеиздат, 1967, 356 с. (пер. на англ.: Marchuk G. I., Numerical Methods in Weather Prediction. Academic Press, 1975, 227 p.).
18. Марчук Г. И. Численное решение задач динамики атмосферы и океана. — Л., Гидрометеиздат, 1974, 303 с.
19. Марчук Г. И., Контарев Г. Р., Ривин Г. С. Краткосрочный прогноз погоды по полным уравнениям на ограниченной территории. — Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1967, т. 3, № 11, с. 1168—1178.
20. Марчук Г. И., Курбаткин Г. П., Каленкович Е. Е. и др. О решении системы уравнений краткосрочного прогноза погоды. — Известия АН СССР, сер. геофиз., 1964, № 12, с. 1849—1858.
21. Мезингер Ф., Аракава А. Численные методы, используемые в атмосферных моделях (пер. с англ.). — Л., Гидрометеиздат, 1979, 136 с.
22. Муравьев А. В., Бундель А. Ю., Киктев Д. Б. и др. Верификация мезомасштаб-

ных прогнозов для района Олимпийских игр 2014 г. по первому тестовому периоду. Часть I: Технология верификации и полигонные оценки качества прогнозов на основе модели COSMO. — Метеорология и гидрология, 2013, № 11, с. 5—21.

23. Муравьев А. В., Бундель А. Ю., Киктев Д. Б., Смирнов А. В. Верификация мезомасштабных прогнозов для района Олимпийских игр 2014 г. по первому тестовому периоду. Часть II. Предварительные результаты диагностических оценок качества и калибровки прогнозов модели COSMO-Ru2. — Метеорология и гидрология, 2013, № 12, с. 5—22.

24. Перов В. Л. Расчет коэффициентов турбулентного перемешивания на основе спектрального алгоритма и его использование в модели COSMO-Ru. — Труды Гидрометцентра России, 2012, вып. 347, с. 81—94.

25. Перов В. Л. Реализация алгоритма расчета турбулентного масштаба длины, основанного на методе смещения частиц воздуха под влиянием сил плавучести в модуле пограничного слоя атмосферы модели COSMO-Ru Гидрометцентра России. — Труды Гидрометцентра России, 2011, вып. 346, с. 76—86.

26. Ревокатова А. П., Суркова Г. В., Кирсанов А. А., Ривин Г. С. Прогноз загрязнения атмосферы Московского региона с помощью модели COSMO-ART. — Вестник Московского ун-та, сер. 5, география, 2012, т. IV, с. 25—33.

27. Ривин Г. С., Медведев С. Б. Гидродинамическая модель атмосферы для Сибирского региона с применением метода расщепления. — Метеорология и гидрология, 1995, № 5, с. 13—22.

28. Ривин Г. С., Розинкина И. А., Багров А. Н., Блинов Д. В. Мезомасштабная модель COSMO-Ru7 и результаты ее оперативных испытаний. — Информационный сборник Гидрометцентра России, 2012, № 39, с. 15—48.

29. Ривин Г. С., Розинкина И. А., Блинов Д. В. Технологическая линия системы краткосрочных прогнозов погоды COSMO-Ru с шагом сетки 7 км. — Труды Гидрометцентра России, 2012, вып. 347, с. 61—80.

30. Сайт консорциума COSMO: <http://www.cosmo-model.org>.

31. Суркова Г. В., Блинов Д. В., Кирсанов А. А. и др. Моделирование распространения шлейфов воздушных загрязнений от очагов лесных пожаров с использованием

химико-транспортной модели COSMO-Ru7-ART. — Оптика атмосферы и океана, 2014, т. 27, № 1, с. 75—81.

32. Суркова Г. В., Кирсанова А. А., Кислов А. В. и др. Прогноз концентрации загрязняющих веществ с помощью объединенной модели COSMO-Ru7-ART. — Труды Гидрометцентра России, 2014, вып. 352, с. 115—138.

33. Шатунова М. В., Ривин Г. С. Модель с высоким пространственным разрешением COSMO-Ru1: влияние внешних параметров на результаты моделирования. — Труды Гидрометцентра России, 2014, вып. 352, с. 150—167.

34. Baldauf M., Seifert A., Forstner J., et al. Operational convective-scale numerical weather prediction with the COSMO model: Description and sensitivities. — Mon. Wea. Rev., 2011, vol. 139, pp. 3887—3905.

35. Doms G., Forstner J., Heise E., et al. A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model. — Part II: Physical Parameterization. — COSMO-Model 4.20. September 2011, 154 p. (<http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/cosmoPhysParamtr.pdf>).

36. Doms G., Schaettler U., and Baldauf M. A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model. Part I: Dynamics and Numerics. — COSMO-Model 4.20. September 2011, 147 p. (<http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/cosmoDyncsNumes.pdf>).

37. Kazakova E. and Rozinkina I. Testing of Snow Parameterization Schemes in COSMO-Ru: Analysis and Results. — COSMO Newsletter, 2011, No. 11, pp. 41—51.

38. Kazakova E., Chumakov M., and Rozinkina I. Realization of the parametric snow cover model SMFE for snow characteristics calculation according to standard net meteorological observations. — COSMO Newsletter, 2013, No. 13, pp. 39—49.

39. Kontarev G. The adjoint equation technique applied to meteorological problems. — ECMWF Technical Report No. 21, Reading, U.K., 1980, 21 p.

40. Majewski D., Liermann D., Prohl P., et al. The operational global icosahedral-hexagonal gridpoint model GME: Description and high-resolution tests. — Mon. Wea. Rev., 2002, vol. 130, pp. 319—338.

41. Marchuk G. I. A new approach to the numerical solution of differential equations of at-

mospheric processes. — World Meteorological Organisation Technical Note No. 66, Geneva, Switzerland, 1965, pp. 286—294.

42. Marchuk G. I. Mathematical issues of industrial effluent optimization. — J. Meteorol. Soc. Japan, vol. 60, 1982, pp. 481—485.

43. Navon I. M. A review of variational and optimization methods in meteorology. /In: Y. K. Sasaki (ed.). Variational Methods in Geosciences (Proceedings of the Internal Symposium on Variational Methods in Geosciences held at the University of Oklahoma, Norman, Oklahoma, October 15—17, 1985). — Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, 1986, pp. 29—32 (<http://people.sc.fsu.edu/~inavon/pubs1/vmg.pdf>).

44. Ritchie H. and Robert A. A Historical Perspective on Numerical Weather Prediction: A 1987 Interview with André Robert // Atmosphere-Ocean, 1997, 35: sup1 (Special Issue: Monograph: Numerical Methods in Atmospheric and Oceanic Modelling: The André J. Robert Memorial Volume), pp. 1—24 (<http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/07055900.1997.9687340> или <http://dx.doi.org/10.1080/07055900.1997.9687340>).

45. Rivin G. S. Modern computational technologies for the estimation of atmospheric processes on regional scales. Air pollution processes in regional scales, 2003, NATO Science series, IV. — Earth and Environmental

Sci. Kluwer Academic publishers, Dordrecht / Boston / London, vol. 30, pp. 241—248.

46. Schaer C., Leuenberger D., Fuhrer O., et al. A new terrain-following vertical coordinate formulation for atmospheric prediction models. — Mon. Wea. Rev., 2002, vol. 130, pp. 2459—2480.

47. Schraff C. and Hess R. A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model. — Part III: Data Assimilation, Offenbach, 2012, 93 p. (<http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/cosmoAssim.pdf>).

48. Steppeler J., Doms G., Schaettler U., et al. Meso-gamma scale forecasts using the non-hydrostatic model LM. — Meteorol. Atmos. Phys., 2003, vol. 82, pp. 75—96.

49. Vogel B., Vogel H., Baumner D., et al. COSMO-ART: Aerosols and reactive trace gases within the COSMO model. /In: Baklanov A., Mahura, A., Sokhi R. (eds.). Integrated systems of meso-meteorological and chemical transport models. — Springer, 2011, pp. 75—80.

50. Wicker L. J. and Skamarock W. C. Time-splitting methods for elastic models using forward time schemes. — Mon. Wea. Rev., 2002, vol. 130, pp. 2088—2097.

51. Zaengl G. ICON. Presentation on COSMO General Meeting, Eretria, Greece, 09.09.2014. http://cosmo-model.org/content/consortium/generalMeetings/general2014/plenary/icon_zaengl.pdf.

Поступила
9 II 2015