

УДК 551.509.3(47+57-25)

Система краткосрочного численного прогноза высокой детализации COSMO-Ru, ее развитие и приложения

*Г.С. Ривин^{1,2}, И.А. Розинкина¹, Е.Д. Астахова¹,
Д.В. Блинов¹, А.Ю. Бундель¹, А.А. Кирсанов¹, М.В. Шатунова¹,
Н.Е. Чубарова^{1,2}, Д.Ю. Алферов¹, М.И. Варенцов^{1,2}, Д.И.
Захарченко^{1,2}, В.В. Копейкин¹, М.А. Никитин¹, А.А. Полюхов^{1,2},
А.П. Ревокатова¹, Е.В. Татаринovich¹, Е.В. Чурюлин^{1,2}*

*¹ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия;*

*² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
г. Москва, Россия*

В Гидрометцентре России начиная с 2009 г. функционирует оперативная система COSMO-Ru регионального краткосрочного численного прогноза погоды для территории России и прилегающих регионов с шагами сеток от 13,2 до 1 км, признанная на основе оперативных испытаний 2011, 2016 и 2018 гг. базовой отечественной технологией численного краткосрочного прогноза погоды. Эта система полностью соответствует уровню ведущих метеослужб мира как по показателям успешности прогнозов, так и по примененным технологическим решениям. Продукция COSMO-Ru четыре раза в сутки рассылается в подавляющее большинство прогнозистических центров Росгидромета, являясь одной из наиболее востребованных.

Система COSMO-Ru и входящие в ее состав конфигурации COSMO-Ru негидростатической модели COSMO одноименного консорциума находятся в постоянном развитии, в частности благодаря тесному партнерству со специалистами стран консорциума, а также регулярному обновлению консорциумом версий модели COSMO. В свою очередь, разработки российских специалистов внедрены либо находятся на стадии внедрения в комплексы программных средств консорциума. Применение современных технологических решений позволяют адаптировать COSMO-Ru к широкому спектру задач метеорологического обеспечения и приложений. Важным примером является создание специальных версий для метеобеспечения зимних Олимпийских и Паралимпийских игр в Сочи 2014 года, Универсиады Казань-2013 и Универсиады Красноярск-2019 на сетках 2,2 км, для горных районов – 1,1 км. В 2018 г. началась разработка версии на сетках с шагом 1 км и менее для Московского региона с описанием урбанизированных территорий, что позволит прогнозировать погоду по частям города. Ввод в эксплуатацию нового суперкомпьютера Росгидромета является залогом поддержания достигнутого уровня отечественных высокодетальных технологий численных прогнозов и их развития.

Ключевые слова: численный прогноз погоды, негидростатическая модель атмосферы, конфигурация модели

COSMO-Ru high-resolution short-range numerical weather prediction system: its development and applications

**G.S. Rivin^{1,2}, I.A. Rozinkina¹, E.D. Astakhova¹, D.V. Blinov¹,
A.Yu. Bundel¹, A.A. Kirsanov¹, M.V. Shatunova, N.Ye. Chubarova^{1,2},
D.Yu. Alferov¹, M.I. Varentsov^{1,2}, D.I. Zakharchenko^{1,2}, V.V. Kopeykin¹,
M.A. Nikitin¹, A.A. Poliukhov^{1,2}, A.P. Revokatova¹,
E.V. Tatarinovich¹, E.V. Churiulin^{1,2}**

¹*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;*

²*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

The COSMO-Ru operational system for the regional short-range numerical weather prediction for the territory of Russia and adjacent regions with a grid spacing of 13.2 to 1 km has operated at the Hydrometcentre of Russia since 2009. Based on operational tests in 2011, 2016, and 2018, the system was recognized by the Roshydromet Central Methodological Commission as the basic national technology for the numerical short-range weather forecasting. The system is fully consistent with the leading weather services of the world both in terms of forecast accuracy and applied technological solutions. The COSMO-Ru output products (being one of the most demanded) are distributed to the overwhelming majority of Roshydromet forecast centers four times a day.

The COSMO-Ru system and its configurations of the COSMO non-hydrostatic model (developed by the COSMO consortium) are in constant development, in particular, due to close cooperation with specialists of the consortium as well as due to the regular updating of COSMO model versions by the consortium. In turn, the achievements of the Russian specialists either have been implemented or are at the stage of implementation in the software complexes of the consortium. The application of modern technological solutions allows to adapt the COSMO-Ru to a wide range of weather support tasks. For example, the special versions of the COSMO-Ru with a grid spacing of 2.2 and 1.1 km for mountain areas were developed for the Sochi Olympic Games in 2014, for the Universiades in Kazan in 2013 and in Krasnoyarsk in 2019. The development of the version describing urban areas for the Moscow region with a grid spacing of 1 km or less started in 2018 that will allow predicting weather in different parts of the city. The commissioning of the new Roshydromet supercomputer is the key factor of maintaining the achieved level of the national high-resolution technologies for numerical weather prediction and its development.

Keywords: numerical weather prediction, non-hydrostatic atmospheric model, model configuration

Углублявшаяся в начале нынешнего века изоляция России в области численного прогноза погоды (ЧПП) и моделирования атмосферных процессов привела к снижению эффективности развития отечественных оперативных систем ЧПП и методическому отставанию от зарубежных метеослужб, так как доступ к публикациям с описанием новых разработок либо отсутствовал, либо становился возможным через 2–3 года с момента их создания. Исходя из этого и на основе предыдущего положительного опыта двустороннего сотрудничества с Немецкой службой погоды в июне 2005 года Руководителем Росгидромета А.И. Бедрицким было принято решение о целесообразности вступления России в консорциум

по мезомасштабному моделированию COSMO (Consortium for Small-scale Modeling), руководству Консорциума был направлен соответствующий запрос.

Главная мотивация данного решения – обеспечить возможность развития в нашей стране технологии высокодетального ЧПП мирового уровня, быстрее внедрения в оперативную практику новейших разработок в области ЧПП и его инфраструктурных элементов, конструктивного перманентного повышения квалификации сотрудников НИУ Росгидромета путем интеграции в коллективы численного прогнозирования ведущих метеослужб Европы, регламентированного потока начальных данных и данных на боковых и нижних границах высокой пространственно-временной детализации из системы глобального моделирования высокой надежности.

До этого в Гидрометцентре России был опыт двусторонних отношений с США по мезомасштабному моделированию на основе модели WRF (<https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>), но при этом не предоставлялись консультации со стороны разработчиков по запросам российских специалистов (предлагалось приехать на длительную стажировку), да и конструктивного интереса к сотрудничеству со стороны американской метеослужбы не проявлялось. Эксплуатация WRF по замыслам разработчиков не предполагает участия пользователей в ее развитии и должна базироваться на полностью автономном подходе без методических контактов с авторами. В этом случае обучение сводится к «запуску» готового программного комплекса без понимания алгоритмов и направления развития модели. Более того, привязка к имеющейся в открытом доступе информации о начальных и боковых граничных условиях из прогнозов по модели Центра моделирования окружающей среды Национальных центров прогноза окружающей среды США (EMC NCEP), которая необходима для работы данной системы моделирования и обуславливает ее высокое качество, не подкреплена никакими межгосударственными соглашениями и регламентами (данный поток данных обеспечивается вне информационных потоков ВМО). Указанная возможность может быть прервана в любой момент в одностороннем порядке со стороны поставщиков данных без нарушения каких-либо соглашений.

В 2006 году, одновременно с началом своей технической модернизации, Росгидромет подтвердил свое намерение участия в работе Консорциума. В 2007 г., после детального согласования с рабочими группами Консорциума конкретных тем потенциальной кооперации с российскими специалистами, Управляющим комитетом COSMO было принято решение о принятии Росгидромета в состав COSMO в качестве ассоциированного члена на 2-летний период, в течение которого специалисты Росгидромета должны были подтвердить свой научный потенциал и возможность выполнения ежегодно объема работ, эквивалентного вкладу двух специалистов высокого уровня при их полной занятости (2 FTE – Full Time Equivalent), по приоритетным направлениям деятельности Консорциума.

По истечении 2-летнего периода ассоциированного членства на основании успешных результатов российских специалистов по направлениям усвоения данных, а также описания физических процессов на подстилающей поверхности и в пограничном слое атмосферы, в 2009 году руководством Консорциума было принято решение о приеме Росгидромета в качестве полноправного члена COSMO. Решение было подписано руководителями всех метеослужб-членов Консорциума на тот момент времени: Германии, Италии, Швейцарии, Польши, Греции и Польши – с одной стороны, и России – с другой.

Благодаря этому в Гидрометцентре России начиная с 2009 года разработана, функционирует и развивается оперативная система COSMO-Ru краткосрочного ЧПП для территории России и прилегающих регионов с шагом сетки в настоящее время от 13,2 до 1 км. На основе оперативных испытаний 2011, 2016 и 2018 гг. входящих в систему конфигураций COSMO-Ru модели COSMO с шагом сетки, соответственно, 7 км, 2,2 км и 13,2 км система признана Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета в качестве базовой отечественной технологии численного краткосрочного прогноза погоды. Для принятия решения было проведено тщательное сравнение ЧПП по практически всем используемым в Гидрометцентре России глобальным и региональным отечественным и зарубежным моделям атмосферы (подробнее см. сайт Методического кабинета Гидрометцентра России и [22, 23]). Отметим, что сравнение проводилось для прогнозов осадков, приземной температуры воздуха и точки росы, фонового приземного ветра.

В настоящее время система COSMO-Ru полностью соответствует уровню ведущих метеослужб мира как по показателям успешности прогнозов, так и по примененным технологическим решениям.

На рис. 1 приведены области оперативного прогноза системы ЧПП COSMO-Ru в Гидрометцентре России и СибНИГМИ. Оперативный счет в Гидрометцентре России проводится на кластере SGI ICE-X с пиковым быстродействием 14 Тфлопс. В СибНИГМИ на кластере Altix 4700 (пиковое быстродействие порядка 0,8 Тфлопс) работает практически такая же система ЧПП, но с конфигурациями COSMO-Ru13Sib и COSMO-Ru6Sib с шагом сетки 13,2 км и 6,6 км соответственно, с одной и той же областью прогноза с центром примерно в Новосибирске (рис. 1).

На рис. 2 приведена схема технологической линии системы ЧПП COSMO-Ru. Начальные данные и боковые граничные условия для модели поступают 4 раза в сутки. Передача данных начинается примерно через 2 ч 40 мин после срока наблюдения и продолжается по мере того, как данные подготавливаются в Германии в ходе глобального прогноза по модели ICON. Данные помещаются вначале на специальный сервер Главного вычислительного центра Росгидромета (ГВЦ Росгидромета), а потом пересылаются на дисковую систему, общую для всех компьютеров ГВЦ Росгидромета, и в архив.

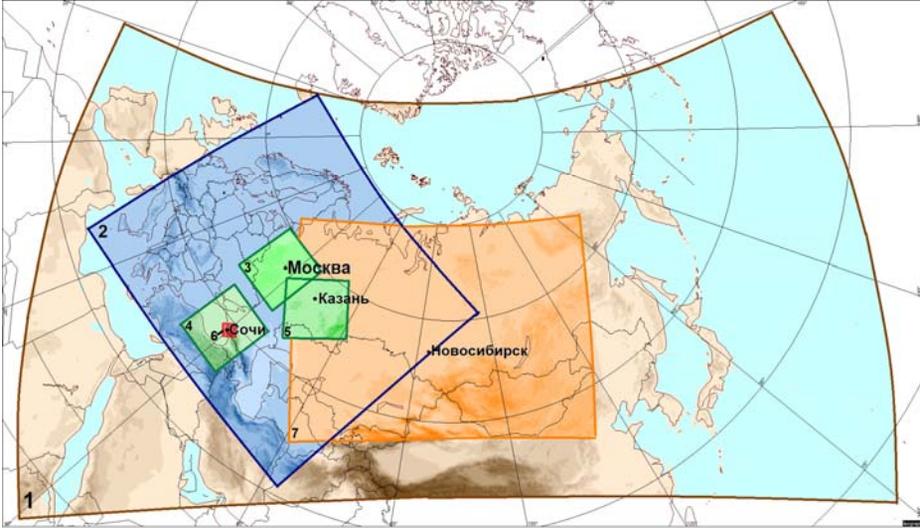


Рис. 1. Области оперативного прогноза системы ЧПП COSMO-Ru в Гидрометцентре России, проводимого на кластерах SGI ICE-X и в СибНИГМИ на Altix 4700. 1-COSMO-Ru13ENA, 2-COSMO-Ru7ETR, 3-COSMO-Ru2CFO, 4-COSMO-Ru2SFO, 5-COSMO-Ru2VFO, 6-COSMO-Ru1Sochi, 7-COSMO-Ru13Sib / COSMO-Ru6Sib.

Fig. 1. The operational domains of COSMO-Ru NWP system forecasts on the SGI ICE-X cluster at the Hydrometcenter of Russia and on the Altix 4700 cluster at SibNIGMI. 1-COSMO-Ru13ENA, 2-COSMO-Ru7ETR, 3-COSMO-Ru2CFO, 4-COSMO-Ru2SFO, 5-COSMO-Ru2VFO, 6-COSMO-Ru1Sochi, 7-COSMO-Ru13Sib / COSMO-Ru6Sib.

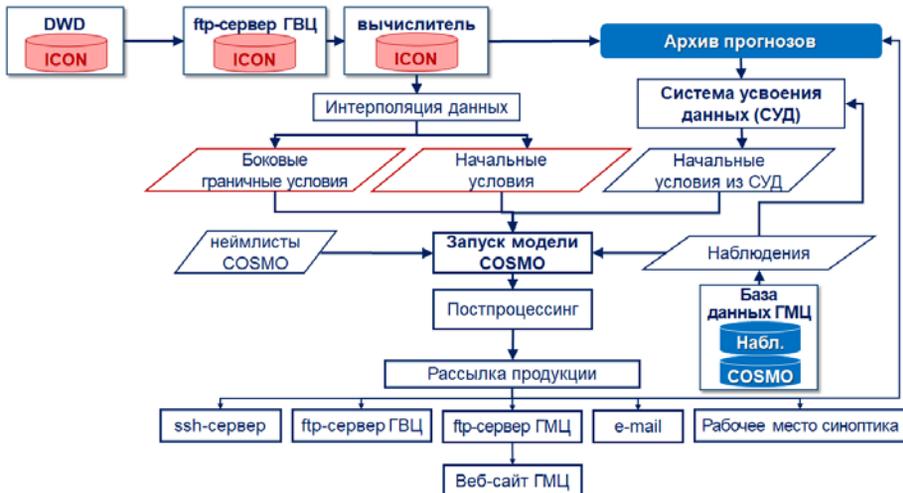


Рис. 2. Схема технологической линии системы ЧПП COSMO-Ru.
Fig. 2. The technological line of COSMO-Ru NWP system.

В настоящее время в качестве метода усвоения данных в системе COSMO-Ru используется метод подталкивания (nudging). Его главное отличие от остальных методов усвоения состоит в том, что отклонения от прогностических значений подставляются в соответствующее уравнение в качестве источника или стока. В результате в качестве интерполянта используется сама модель атмосферы. Для негидростатических моделей атмосферы с небольшим шагом сетки этот метод хотя и уступает другим методам, но практически незначительно.

Фактически система усвоения данных работает не в полном виде. На самом деле используется метод наджкаста (nudgcast), как называют такой метод немецкие коллеги. В этом случае счет начинается за 3 или 6 ч до момента наблюдения, что позволяет усваивать с помощью метода подталкивания все данные наблюдений, которые пришли до момента прихода начальных данных и граничных условий из глобальной модели Немецкой службы погоды.

Указанные на рис. 2 операторы NAMELIST (неймлисты) объявления именованных списков языка программирования Фортран предназначены для ввода параметров во время счета. В них задаются область прогноза погоды, используемая в модели сетка, шаг сетки, шаг по времени, дата и срок прогноза, настройки динамического и физического блоков, списки файлов ввода/вывода и т. д.

ЧПП с помощью системы COSMO-Ru проводится четыре раза в сутки в моменты времени 00, 06, 12 и 18 ч ВСВ. Продукция COSMO-Ru рассылается в подавляющее большинство прогностических центров Росгидромета, являясь одной из наиболее востребованных. Система COSMO-Ru находится в постоянном развитии, в частности благодаря тесному партнерству со специалистами стран Консорциума, а также регулярному обновлению Консорциумом версий одноименной негидростатической модели атмосферы.

На рис. 3 приведена оценка ежемесячных среднеквадратических отклонений прогностических (для заблаговременностей 12, 36 и 60 ч) значений ЧПП от данных наблюдений полей температуры на уровне 2 м и скорости на высоте 10 м для 5-летнего периода: июнь 2013 г. – сентябрь 2019 г. Оценки рассчитаны для территории Центрального федерального округа для первой внедренной в оперативную практику конфигурации COSMO-Ru7 (вся территория прогноза показана на рис. 1). Вертикальные прямые указывают на начало использования глобальной модели ICON [32, 39] для задания начальных и боковых условий в 2015 г. и соответствующей системы усвоения в 2016 году.

Приятно отметить, что разработки российских специалистов [1–30, 33–38] по усовершенствованию радиационного блока модели COSMO, формированию начальных данных о снежном покрове, генерации случайных возмущений для ансамблевых систем прогнозирования и усвоения данных, прогнозу загрязнения атмосферы и распространения продуктов

горения лесов на основе конфигураций COSMO-ART-Ru, вычислению показателей успешности ансамблевых прогнозов внедрены либо находятся на стадии внедрения в комплексы программных средств Консорциума.

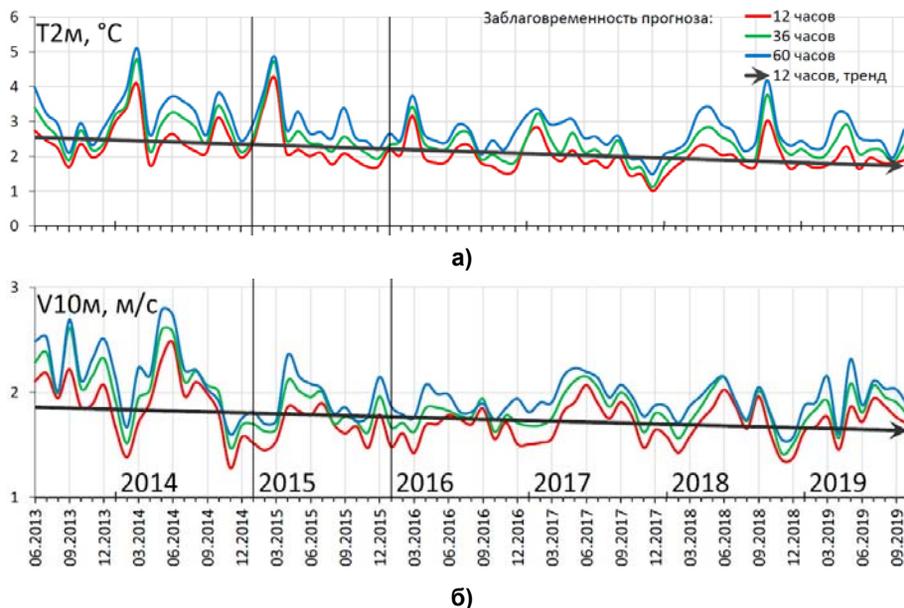


Рис. 3. Ежемесячные значения для периода июнь 2013 г. – сентябрь 2019 г. для территории Центрального федерального округа среднеквадратического отклонения прогностических (заблаговременность 12, 36 и 60 ч) значений ЧПП (конфигурация COSMO-Ru7) от данных наблюдений температуры на уровне 2 м (а) и скорости на высоте 10 м (б).

Fig. 3. Monthly standard deviations of NWP forecasts (with 12, 36, and 60 h lead times) (COSMO-Ru7 configuration) from observations over the Central Federal District for the period June 2013 – September 2019: 2-m temperature (a); 10-m wind speed (б).

Применение современных технологических решений позволило адаптировать систему COSMO-Ru к широкому спектру задач метеорологического обеспечения и приложений. Важными примерами такой адаптации являются создание специальных версий для метеорологического обеспечения Игр Олимпиады Сочи-2014, Универсиад Казань-2013 и Красноярск-2019 на сетках 2,2 км и 1,1 км (для горных районов) [32, 37, 38], подготовка исходных данных для проектирования объектов обустройства морских месторождений, метеорологического обслуживания авиации и различных общественных многоярусных культурных мероприятий. Были проведены исследования по оценке качества различных аэрозольных климатологий, задаваемых в модели COSMO, и их влияния на суммарную солнечную радиацию и температуру воздуха у поверхности Земли.

В настоящее время идет освоение суперкомпьютера Cray XC40-LC (пиковое быстродействие – 1,3 Пфлопс, быстродействие на тестах LINPACK – 1,2 Пфлопс). На нем уже установлена адаптированная к этому компьютеру и его математическому обеспечению (операционной системе, компиляторам и библиотекам) система COSMO-Ru с тремя конфигурациями модели COSMO (рис. 4) с шагом соответствующих сеток 6,6 км для территории Европы и северной части Азии COSMO-Ru6 ENA (вместо 13,2 км в прежней конфигурации COSMO-Ru13 ENA), 2,2 км для значительно расширенной территории (для всей Европейской территории России и ряда прилегающих стран, включая Белоруссию) и 1 км для Московского мегаполиса.

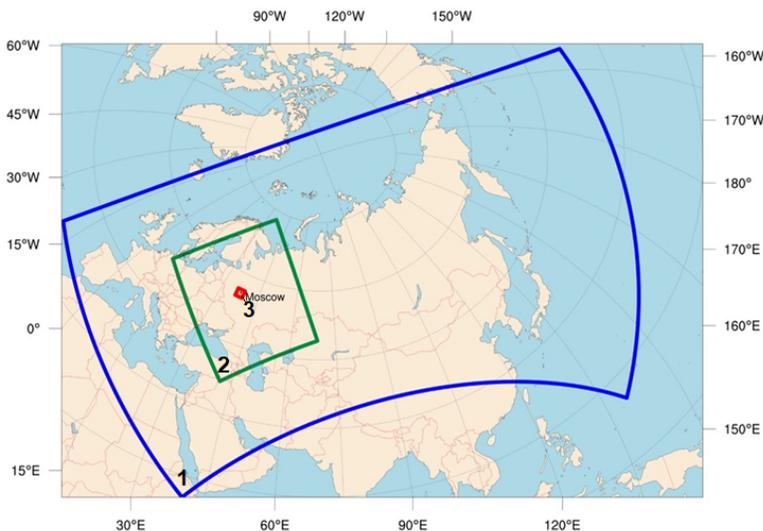


Рис. 4. Области оперативного прогноза системы ЧПП COSMO-Ru в Гидрометцентре России, проводимого на суперкомпьютере Cray XC40-LC: 1-COSMO-Ru6ENA, 2-COSMO-Ru2, 3-COSMO-Ru1M.
Fig. 4. The operational domains of COSMO-Ru NWP system forecasts on Cray XC40-LC supercomputer at the Hydrometcenter of Russia: 1-COSMO-Ru6ENA, 2-COSMO-Ru2, 3-COSMO-Ru1M.

На рис. 5 представлена схема поступления начальных данных и граничных условий с указанием времени (прошедшего от срока наблюдения) начала и окончания ЧПП для конфигураций модели COSMO. Согласно этой схеме, примерно через 15 мин после окончания получения граничных условий из Германии заканчивается работа системы COSMO-Ru, включая визуализацию и автоматическую рассылку карт, метеограмм, аэрологических диаграмм и полей в принятых в ВМО форматах.

На рис. 6 и 7 приведены примеры продукции COSMO-Ru6 ENA. На рис. 6 представлен прогноз с заблаговременностью 78 ч тайфуна

Хагибис, обрушившегося на Японию. На рис. 7 приведен пример новой продукция системы COSMO-Ru – аэрологическая диаграмма.

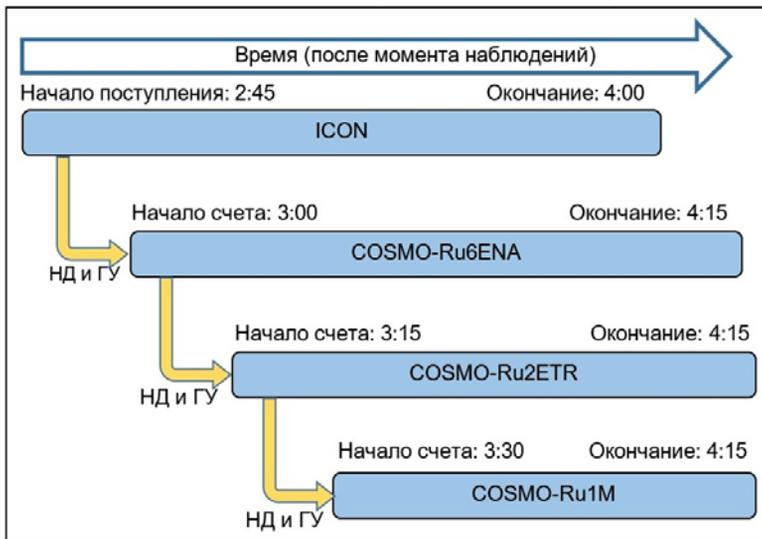


Рис. 5. Cray XC40-LC: схема поступления начальных данных (НД) и граничных условий (ГУ) с указанием времени (от срока наблюдения) начала и окончания ЧПП для конфигураций модели COSMO.

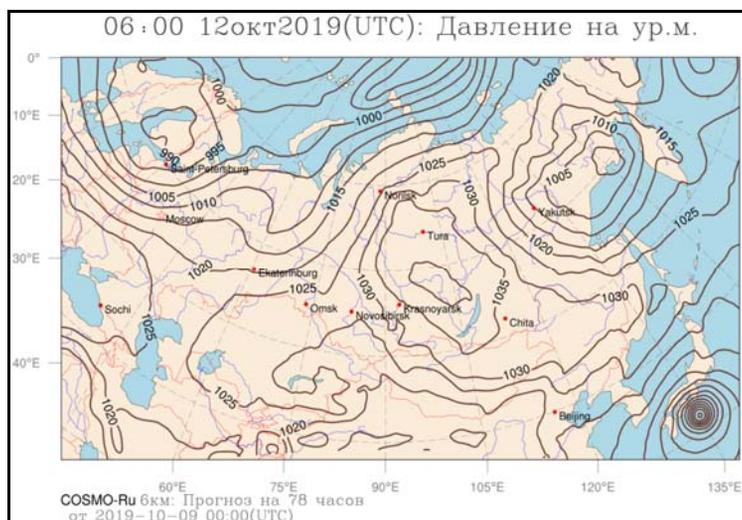
Fig. 5. Cray XC40-LC: a scheme of initial data and boundary conditions flow with indication of NWP start and end time (related to observation time) for various COSMO model configurations.

В настоящее время проводятся численные эксперименты для выбора оптимального гибридного распараллеливания (одновременно используются технологии MPI и OpenMP) конфигурации ICON-Ru глобальной модели ICON. Прогнозы по глобальной модели ICON предполагается проводить в ГВЦ Росгидромета, чтобы избежать передачи по каналам связи большого объема информации, необходимой для планируемого уменьшения интервалов времени между обновлениями боковых граничных условий в системе COSMO-Ru (в настоящее время передача граничных условий из глобальной модели ICON проводится каждые 3 часа прогностического времени). Это важно и для повышения надежности вычисления оперативного прогноза. Первые результаты приведены на рис. 8 и свидетельствуют о возможности высоко эффективного распараллеливания вычислительного процесса конфигурации ICON-Ru с учетом ввода/вывода.

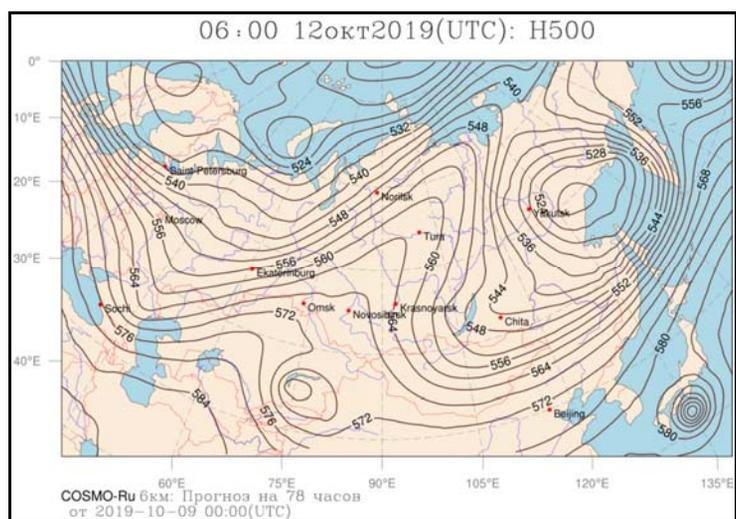
В таблице приведены значения коэффициента полезности распараллеливания δ , %:

$$\delta = \frac{t_1 / t_2}{N_2 / N_1} \cdot 100,$$

где t_1 и t_2 – время счета с использованием количества ядер N_1 и N_2 соответственно.



а)



б)

Рис. 6. Пример оперативного прогноза тайфуна с заблаговременностью 78 ч системой ЧПП COSMO-Ru с конфигурацией COSMO-Ru6ENA: шаг сетки 6,6 км, начальные данные – 9 октября 2019 г. 00 ч: давление на уровне моря (а); высота поверхности 500 ГПа (вычисления проведены на суперкомпьютере Cray XC40-LC) (б).

Fig. 6. The operational 78-h forecast of a typhoon issued by the COSMO-Ru NWP system with the COSMO-Ru6ENA configuration (grid step 6.6 km, initial data October 9, 2019 00 UTC): sea level pressure (a); 500 hPa height (calculations were performed on the Cray XC40-LC supercomputer) (б).

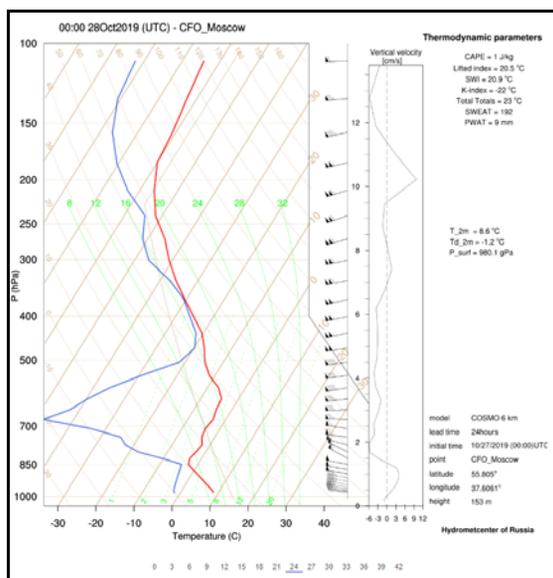


Рис. 7. Пример аэрологической диаграммы (оперативный прогноз на сутки по данным за 27 октября 2019 г.) системой ЧПП COSMO-Ru с конфигурацией COSMO-Ru6ENA (шаг сетки 6,6 км).

Fig. 7. An aerological diagram (operational 24-h forecast starting on October 27, 2019) produced by the COSMO-Ru NWP system with the COSMO-Ru6ENA configuration (grid spacing 6.6 km).

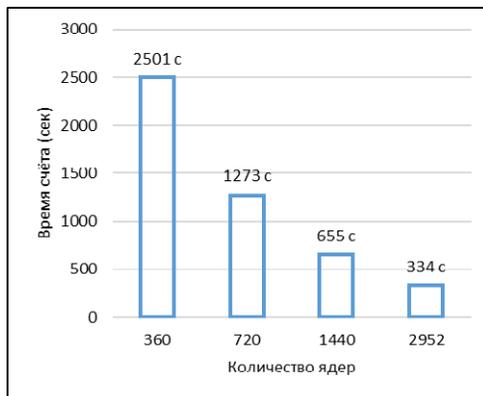


Рис. 8. Зависимость от количества ядер времени счёта прогноза на сутки с помощью конфигурации ICON-Ru глобальной модели ICON (13 км шаг сетки, 90 уровней, верхний уровень 75 км) при гибридном (одновременном использовании средств MPI и OpenMP и 8 процессов ввода/вывода для распараллеливания вывода).

Fig. 8. The computational cost of a 24-h forecast as a function of the number of cores. The ICON-Ru configuration of the global model ICON (13 km

grid spacing, 90 levels, the uppermost level at 75 km) with hybrid parallelization using simultaneously MPI and OpenMP and 8 processes for I/O.

Объясним смысл коэффициента полезности распараллеливания на конкретных примерах. Если $\delta = 100\%$, то во сколько раз мы увеличиваем использованное для вычислений число ядер (N_2 / N_1), во столько же раз уменьшается и время счета t_1 / t_2 . Если $\delta = 50\%$, то при увеличении числа ядер в k раз соответствующее уменьшение времени счета окажется в 2 раза меньше (например, если $k=2$, то время счета вообще не изменится; если $k=4$, то время счета уменьшится всего в 2 раза; если $k=8$, то время счета уменьшится всего в 4 раза). Если $\delta = 90\%$, то при увеличении числа ядер в k раз время счета станет только в $0,9 k$ раз меньше (например, если $k=2$, то время счета изменится в 1,8 раза; если $k=4$, то время счета уменьшится в 3,6 раза; если $k=8$, то время счета уменьшится в 7,2 раза). Из этих примеров следует, что высокая эффективность метода распараллеливания соответствует значениям КПР, большим 90%. Как следует из таблицы, при выбранных параметрах реализации параллельного ввода/вывода и сочетания MPI и OpenMP использованный в системе метод распараллеливания является высокоэффективным.

Таблица. Коэффициент полезности распараллеливания δ при использовании 360, 720, 1440 и 2952 ядер для гибридного распараллеливания (при одновременном использовании средств MPI и OpenMP, а также 8 процессов для распараллеливания ввода/вывода). Детали в тексте и на рис. 8.

Table. The coefficient of parallelization usefulness δ for computations on 360, 720, 1440 and 2952 cores using hybrid MPI and OpenMP parallelization and 8 processes for parallelizing I/O. See details in the text and in fig. 8.

N_1	t_1, c	N_2	t_2, c	N_2 / N_1	t_1 / t_2	$\delta, \%$
360	2501	720	1273	2	1,96	98,0
360	2501	1440	655	4	3,82	95,5
360	2501	2952	334	8,2	7,49	91,3

Начата подготовка по выбору частоты подстановки боковых условий (не через 3 ч, как это делается сейчас, а, например, каждый час, каждые полчаса и даже чаще). В 2020 г. предполагается перейти к использованию модели ICON вместо модели COSMO.

В 2018 г. началась разработка версии на сетках с шагом 1 км и менее для Московского региона с описанием урбанизированных территорий, что позволит в дальнейшем прогнозировать погоду по частям города [26].

Все это вселяет не только надежду, но и уверенность, что поставленные задачи на ближайшее пятилетие будут выполнены в полном объеме и на высоком уровне.

Авторы выражают глубокую благодарность за внимание, помощь и полезные обсуждения различных аспектов работы, оказанную нашими коллегами – сотрудниками ФГБУ «Гидрометцентр России», ФГБУ «ГВЦ Росгидромета» и кафедры метеорологии и климатологии МГУ им. М.В. Ломоносова, особенно Р.М. Вильфанду, Д.Б. Киктеву, А.В. Кислову и С.В. Лубову.

Работа велась по темам Росгидромета и частичной поддержке Гранта РНФ № 18-17-00149 и Гранта (Постановление Правительства Москвы от 3 апреля 2018 г. № 257-ПП) на реализацию мероприятий по развитию системы мониторинга, прогнозирования и предупреждения о неблагоприятных погодных явлениях в городе Москве.

Список литературы

1. Алферов Д.Ю., Ривин Г.С. Система мезомасштабного прогноза погоды COSMO-RU: ансамблевый прогноз // Труды Гидрометцентра России. 2011. Вып. 346. С. 5-16.
2. Беорницкий А.И., Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б., Ривин Г.С. Суперкомпьютерные технологии численного прогноза погоды в Росгидромете // Метеорология и гидрология. 2017. № 7. С. 10-23.
3. Блинов Д.В., Ривин Г.С., Розинкина И.А. Система краткосрочного прогноза погоды COSMO-Ru: технологические аспекты визуализации и распространения прогнозов // Труды Гидрометцентра России. 2011. Вып. 346. С. 53-61.
4. Блинов Д.В., Ривин Г.С. Система краткосрочного негидростатического прогноза погоды COSMO-Ru: технологическая линия // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 365. С. 142-162.
5. Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б., Ривин Г.С., Розинкина И.А. Цифровая кухня арктической погоды и гидрометеорологическая безопасность // Арктическое обозрение. 2018. № 4. С. 8-17.
6. Вильфанд Р.М., Кирсанов А.А., Ривин Г.С., Ревокатова А.П., Суркова Г.В. Прогноз перемещения и трансформации загрязняющих веществ в атмосфере с помощью модели COSMO-ART // Метеорология и гидрология. 2017. № 5. С. 31-40.
7. Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А. Современные оперативные системы численного прогноза погоды для ограниченной территории // Труды СибНИГМИ. 2011. Вып. 106. С. 5-12.
8. Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А. Мезомасштабный краткосрочный прогноз погоды в Гидрометцентре России на примере COSMO-Ru // Метеорология и гидрология. 2010. № 1. С. 5-17.
9. Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А. Система COSMO-Ru негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: первый этап реализации и развития // Метеорология и гидрология. 2010. № 8. С. 5-20.
10. Кислов А.В., Ривин Г.С., Платонов В.С., Варенцов М.И., Розинкина И.А., Никитин М.А., Чумаков М.М. Мезомасштабное моделирование экстремальных ветров над Охотским морем и островом Сахалин // Известия РАН. ФАО. 2018. Т. 54, № 4. С. 381-385.
11. Климат Москвы в условиях глобального потепления. М.: Из-во МГУ, 2017. 288 с.
12. Кузьмина Е.В., Ольчев А.В., Розинкина И.А., Ривин Г.С., Никитин М.А. Применение мезомасштабной модели COSMO-CLM для оценки влияния изменения лесистости Европейской части России на региональные метеорологические условия // Метеорология и гидрология. 2017. № 9. С. 48-58.
13. Никитин М.А., Ривин Г.С., Розинкина И.А., Чумаков М.М. Идентификация полярных циклонов над акваторией Карского моря с помощью гидродинамического моделирования // Вести газовой науки. 2015. № 2. С. 106-112.
14. Никитин М.А., Ривин Г.С., Розинкина И.А., Чумаков М.М. Использование прогностической системы COSMO-Ru для исследования свойств полярных циклонов: эпизод 25-27 марта 2014 года // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 361. С. 128-145.
15. Ольчев А.В., Авиллов В.К., Байбар А.С., Белотелов Н.В., Болондинский В.К., Иванов Д.Г., Кузьмина Е.В., Курбатова Ю.А., Левашиова Н.Т., Мамкин В.В., Мангура П.А., Молчанов А.Г., Мухартова Ю.В., Никитин М.А., Новенко Е.Ю., Придача В.Б., Ривин Г.С., Розинкина И.А., Сазонова Т.А., Сандлерский Р.Б., Суркова Г.В., Холопцева Е.С. Леса Европейской территории России в условиях

изменяющегося климата. М: Товарищество научных изданий КМК (KMK Scientific Press Ltd.), 2017. 275 с.

16. Ольчев А.В., Розинкина И.А., Кузьмина Е.В., Никитин М.А., Ривин Г.С. Оценка влияния изменения лесистости центрального региона Восточно-Европейской равнины на летние погодные условия // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017. Т. 4. С. 79-101.

17. Онищенко Д.А., Чумаков М.М., Новиков А.И., Цвезинский А.С., Ривин Г.С., Дианский Н.А. Методология расчета экстремальных значений параметров ледяного покрова и характеристик опасных природных явлений, основанная на детализированном реанализе и результатах натурных наблюдений, в целях подготовки исходных данных для проектирования объектов обустройства морских месторождений (на примере Охотского моря) // Сборник работ лауреатов Международного конкурса 2017 г. научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа (при поддержке Правительства Российской Федерации) 2017. М.: Министерство энергетики Российской Федерации, ООО "Технологии развития", 2017. С. 75-80.

18. Полохов А.А., Чубарова Н.Е., Ривин Г.С., Шатунова М.В., Тарасова Т.А. Оценка качества расчета солнечной радиации в COSMO-Ru по данным точных радиационных расчетов и измерений в Москве в безоблачных условиях // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 364. С. 38-52.

19. Ревокатова А.П., Суркова Г.В., Кирсанов А.А., Ривин Г.С. Прогноз загрязнения атмосферы Московского региона с помощью модели COSMO-ART // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2012. № 4. С. 25-32.

20. Ривин Г.С. Современные системы мезомасштабного прогноза погоды: состояние и перспективы // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада лтд, 2010. С. 82-93.

21. Ривин Г.С., Блинов Д.В., Розинкина И.А. Система краткосрочного прогноза погоды COSMO-RU: технологические аспекты визуализации и распространения прогнозов // Труды Гидрометцентра России. 2011. Вып. 346. С. 47-54.

22. 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.

23. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Багров А.Н., Блинов Д.В. Мезомасштабная модель COSMO-Ru7 и результаты ее оперативных испытаний // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2012. Информационный сборник № 39. С. 15-48.

24. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Багров А.Н., Блинов Д.В., Кирсанов А.А., Кузьмина Е.В., Шатунова М.В., Чумаков М.М., Алферов Д.Ю., Бундель А.Ю., Зайченко М.Ю., Никитин М.А. Мезомасштабная модель COSMO-Ru2 и результаты ее оперативных испытаний // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2017. Информационный сборник № 44. С. 25-55.

25. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд Р.М., Алферов Д.Ю., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Казакова Е.В., Кирсанов А.А., Никитин М.А., Перов В.Л., Суркова Г.В., Ревокатова А.П., Шатунова М.В., Чумаков М.М. Система COSMO-Ru негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: второй этап реализации и развития // Метеорология и гидрология. 2015. № 6. С. 58-71

26. Ривин Г.С., Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б., Розинкина И.А., Тудрий К.О., Блинов Д.В., Варенцов М.И., Самсонов Т.Е., Бундель А.Ю., Кирсанов А.А., Захарченко Д.И. Развитие системы численного прогнозирования опасных метеорологических явлений для Московского мегаполиса: прототип системы // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 33-45.

27. Розинкина И.А., Киктев Д.Б., Ривин Г.С., Муравьев А.В., Жабина И.И., Пурина И.Э., Шатунова М.В., Блинов Д.В., Смирнов А.В., Варенцов М.И. Информационные технологии Гидрометцентра России для сверхкраткосрочного и краткосрочного прогнозов погоды // Метеоспектр. 2017. № 4. С. 17-33.

28. Шатунова М.В., Бундель А.Ю., Блинов Д.В., Кирсанов А.А., Ривин Г.С. Оценка модели численного прогноза погоды высокого пространственного разрешения COSMO // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. №1 (375) (в печати).

29. Шатунова М.В., Ривин Г.С., Розинкина И.А. Прогноз видимости 16-18 февраля 2014 года в районе проведения Олимпийских Игр Сочи-2014 с помощью модели с высоким пространственным разрешением COSMO-Ru1 // Метеорология и гидрология. 2015. № 8. С. 45-55.

30. Bundel A., Gofa F., Alferov D., Astakhova E., Baumann P., Boucouvala D., Damrath U., Eckert P., Kirsanov A., Lapillonne X., Linkowska J., Marsigli C., Montani A., Muraviev A., Oberto E., Tesini M.S., Vela N., Wyszogrodzki A., Zaichenko M., Walsler A. COSMO Priority Project INSPECT Final Report // COSMO technical report 37. 2019. DOI: 10.5676/DWD_pub/nwv/cosmo-tr_37

31. Doms G., Baldauf M. A. Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model. Part I: Dynamics and Numerics. 2018. 161 p.
<http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/cosmoDyncsNumcs.pdf>
32. Giorgetta M.A., Brokopf R., Crueger T., Esch M., Fiedler S., Helmert J., Hohenegger C., Kornbluh L., Köhler M., Manzini E., Mauritsen T., Nam C., Raddatz T., Rast S., Reinert D., Sakradzija M., Schmidt H., Schneek R., Schnur R., Silvers L., Wan H., Zängl G., Stevens B. ICON-A, the Atmosphere Component of the ICON Earth System Model: I. Model Description // *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2018. Vol. 10, no. 7. P. 1613-1637.
33. Kiktev D., Joe P., Isaac G., Montani A., I-L Frogner, Nurmi P., Bica B., Milbrandt J., Tsyrlunikov M., Astakhova E., Bundel A., Belair S., Pyle M., Muravyev A., Rivin G., Rozinkina I., Paccagnella T., Wang Y., Reid J., Nipen T., K-D Ahn. FROST-2014: the Sochi Winter Olympics International Project // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 2017. No. 9. P. 1908-1929.
34. Platonov V., Kislov A., Rivin G., Varentsov M., Rozinkina I., Nikitin M., Chumakov M. Mesoscale atmospheric modelling technology as a tool for creating a long-term meteorological dataset // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2017. Vol. 96, 012004. P. 1-9, DOI: 10.1088/1755-1315/96/1/012004
35. Poliukhov A., Chubarova N., Kinne S., Rivin G., Shatunova M., Tarasova T. Comparison Between Calculations Of Shortwave Radiation With Different Aerosol Datasets And Measured Data At the MSU MO (Russia) // *AIP Conference Proceedings.* 2017. Vol. 1810. P. 100006.1-100006.4.
36. Revokatova A.P., Kislov A.V., Surkova G.V., Kirsanov A.A., Rivin G.S., Vogel B., Vogel H. Short-Term Forecast of the Carbon Monoxide Concentration Over the Moscow Region by COSMO-ART // *Pure and Applied Geophysics.* 2019. Vol. 176, no. 2. P. 885-899.
37. Rivin G., I. Rozinkina, Astakhova E., Montani A., Bettems J-M., Alferov D., Blinov D., Eckert P., Euripides A., Helmert J., Shatunova M. The COSMO Priority Project CORSO-A Final Report // *COSMO Technical Report.* 2019. No. 38. P. 65. DOI: 10.5676/DWD pub/nwv/cosmo-tr 38
38. Rivin G., Rozinkina I., Astakhova E., Montani A., Alferov D., Arpagaus M., Helmert J., Kazakova E., Kirsanov A., Kopeikin V., Kukanova E., Majewski D., Marsigli C., de Morsier G., Muravev A., Paccagnella T., Schattler U., Schra C., Shatunova M., Shcherbakov A., Steiner P., Zaichenko M. The COSMO Priority Project CORSO Final Report // *COSMO Technical Report.* 2018. No. 35. 65 p.
39. Zängl G., Reinert D., Ripodas P., Baldauf M. The ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2015. Vol. 141, no. 687. P. 563-579.

References

1. Alferov D.Yu., Rivin G.S. The mesoscale weather forecast COSMO-RU system: the ensemble forecast. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2011, vol. 346, pp. 5-16 [in Russ.].
2. Bedritskii A. I., Vil'fand R. M., Kiktev D. B., Rivin G. S. Roshydromet supercomputer technologies for numerical weather prediction. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2017, vol. 42, no. 7, pp. 425-434. DOI: 10.3103/S1068373917070019.
3. Blinov D.V., Rivin G.S., Rozinkina I.A. The mesoscale weather forecast COSMO-RU system: the technological aspects of the visualization and mailing of the forecasts. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2011, vol. 346, pp. 53-61 [in Russ.].
4. Blinov D.V., Rivin G.S. The short-term non-hydrostatic mesoscale weather forecast system COSMO-Ru: The technological line. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 365, pp. 142-162 [in Russ.].
5. Vil'fand R.M., Kiktev D.B., Rivin G.S., Rozinkina I.A. Tsifrovaya kuhnya arkticheskoy pogody i gidrometeorologicheskaya bezopasnost'. *Arctic review*, 2018, no. 4, pp. 8-17.
6. Vil'fand R.M., Kirsanov A.A., Revokatova A.P., Rivin G.S., Surkova G.V. Forecasting the transport and transformation of atmospheric pollutants with the COSMO-ART model. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2017, vol. 42, no. 5, pp. 292-298. DOI: 10.3103/S106837391705003X.
7. Vil'fand R. M., Rivin G. S., Rozinkina I.A. Sovremennye operativnye sistemy chislennoogo prognoza pogody dlya ogranichennoy territorii. *Trudy SibNIGMI*, 2011, vol. 106, pp. 5-12 [in Russ.].
8. Vil'fand R.M., Rivin G.S., Rozinkina I.A. Mesoscale weather short-range forecasting at the Hydrometcenter of Russia, on the example of COSMO-RU. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2010, vol. 35, no. 1, pp. 1-9. DOI: 10.3103/S1068373910010012.
9. Vil'fand R.M., Rivin G.S., Rozinkina I.A. COSMO-RU system of nonhydrostatic mesoscale short-range weather forecast of the hydrometcenter of Russia: The first stage of realization and development. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2010, vol. 35, no. 8, pp. 503-514. DOI: 10.3103/S1068373910080017.

10. Kislov A.V., Rivin G.S., Platonov V.S., Varentsov M.I., Rozinkina I.A., Nikitin M.A., Chumakov M. Mesoscale Atmospheric Modeling of Extreme Velocities over the Sea of Okhotsk and Sakhalin. *Izv. Atmos. Oceanic Phys.*, 2018, vol. 54, no. 4, pp. 322–326. DOI: 10.1134/S0001433818040242.
11. *Klimat Moskvy v usloviyakh global'nogo potepeniya*. Moscow, Moscow State University publ., 2017, 288 p. [in Russ.].
12. Kuz'mina E.V., Ol'chev A.V., Rozinkina I.A., Rivin G.S., Nikitin M.A. Application of the COSMO-CLM mesoscale model to assess the effects of forest cover changes on regional weather conditions in the European part of Russia. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2017, vol. 42, no. 9, pp. 574–581. DOI: 10.3103/S1068373917090047.
13. Nikitin M.A., Rivin G.S., Rozinkina I.A., Chumakov M.M. Identification of polar cyclones above the Kara Sea waters using hydrodynamic modelling. *Vesti gazovoy nauki*, 2015, vol. 22, no. 2 pp. 106–112. [in Russ.].
14. Nikitin M.A., Rivin G.S., Rozinkina I.A., Chumakov M.M. Use of COSMO-Ru forecasting system for polar low's research: case study 25-27 March 2014. *Trudy Gidrometsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2016, vol. 361, pp. 128-145 [in Russ.].
15. Ol'chev A.V., Avilov V.K., Baybar A.S., Belotelov N.V., Bolondinskiy V.K., Ivanov D.G., Kuz'mina E.V., Kurbatova YU.A., Levashova N.T., Mamkin V.V., Mangura P.A., Molchanov A.G., Muhartova Yu.V., Nikitin M.A., Novenko E.Yu., Pridacha V.B., Rivin G.S., Rozinkina I.A., Sazonova T.A., Sandlerskiy R.B., Surkova G.V., Holoptseva E.S. Lesa Evropeyskoy territorii Rossii v usloviyakh izmenyayuschegosya klimata. Moscow, MKM Scientific Press Ltd., 2017, 275 p. [in Russ.].
16. Olchev A.V., Rozinkina I.A., Kuz'mina E.V., Nikitin M.A., Rivin G.S. Assessing the influence of forest cover changes on summer weather conditions in the central part of the East-European plain. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya [Fundamental and Applied Climatology]*, 2017, vol. 4, pp. 79-101, DOI: 10.21513/2410-8758-2017-4-83-105 [in Russ.].
17. Onischenko D.A., Chumakov M.M., Novikov A.I., TSvetsinskiy A.S., Rivin G.S., Dianskiy N.A. Metodologiya rascheta ekstremal'nykh znacheniy parametrov ledyanogo pokrova i karakteristik opasnykh prirodnykh yavleniy, osnovannaya na detalizirovannom reanalize i rezul'tatah naturnykh nablyudeniy, v tselyakh podgotovki iskhodnykh dannykh dlya proektirovaniya ob'ektov obustroystva morskikh mestorozhdeniy (na primere Ohotskogo morya). Sbornik rabot laureatov Mezhdunarodnogo konkursa 2017 g. nauchnykh, nauchno-tekhnicheskikh i innovatsionnykh razrabotok, napravlennykh na razvitie i osvoenie Arktiki i kontinental'nogo shel'fa (pri podderzhke Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii) 2017. Moscow, Ministerstvo energetiki Rossiyskoy Federatsii, OOO "Tekhnologii razvitiya", 2017, pp. 75-80. [in Russ.].
18. Polukhov A.A., Chubarova N.Y., Rivin G.S., Shatunova M.V., Tarasova T.A. Assessment of the clear sky radiation simulated using COSMO model based on precise calculation and observation in Moscow. *Trudy Gidrometsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 364, pp. 38-52 [in Russ.].
19. Revokatova A.P., Surkova G.V., Kirsanov A.A., Rivin G.S. Forecast of the atmosphere pollution in the Moscow region using the COSMO-ART model. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya [Moscow University Bulletin. Series 5. Geography]*, 2012, no. 4, pp. 25-32 [in Russ.].
20. Rivin G.S. Sovremennyye sistemy mezomasshtabnogo prognoza pogody: sostoyanie i perspektivy. 80 let Gidrometsentru Rossii. Moscow, Triada LTD publ., 2010, pp. 82-93 [in Russ.].
21. Blinov D.V., Rivin G.S., Rozinkina I.A. The mesoscale weather forecast COSMO-RU system: the technological aspects of the visualization and mailing of the forecasts. *Trudy Gidrometsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2011, vol. 346, pp. 47-54 [in Russ.].
22. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Blinov D.V. The technological line of the short-term mesoscale operational weather forecast system COSMO-RU with 7 km grid step. *Trudy Gidrometsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2012, vol. 347, pp. 61-80 [in Russ.].
23. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Bagrov A.N., Blinov D.V. Mezomasshtabnaya model' COSMO-Ru7 i rezul'taty ee operativnykh ispytaniy. Rezul'taty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov. Informatsionnyy sbornik, 2012, vol. 39, pp. 15-48 [in Russ.].
24. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Bagrov A.N., Blinov D.V., Kirsanov A.A., Kuz'mina E.V., Shatunova M.V., Chumakov M.M., Alferov D.Yu., Bundel' A.Yu., Zaychenko M.Yu., Nikitin M.A. Mezomasshtabnaya model' COSMO-Ru2 i rezul'taty ee operativnykh ispytaniy. Rezul'taty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov. Informatsionnyy sbornik, 2017, vol. 44, pp. 25-55 [in Russ.].
25. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Vil'fand R.M., Alferov D.Yu., Astakhova E.D., Blinov D.V., Bundel' A.Yu., Kazakova E.V., Kirsanov A.A., Nikitin M.A., Perov V.L., Surkova G.V., Revokatova A.P., Shatunova M.V., Chumakov M.M. The COSMO-Ru system of nonhydrostatic mesoscale short-range weather forecasting of the Hydrometcenter of the Russia: The second stage of implementation and development. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2015, vol. 40, no. 6, pp. 400-410. DOI: 10.3103/S1068373915060060.

26. Rivin G.S., Vil'fand R. M., Kiktev D. B., Rozinkina I.A., Tudrii K. O., Blinov D. V., Varentsov M. I., Samsonov T. E., Bundel' A. Yu., Kirsanov A. A., and Zakharchenko D. I. The System for Numerical Prediction of Weather Events (Including Severe Ones) for Moscow Megacity: The Prototype Development. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2019, Vol. 44, No. 11, pp. 729-738. DOI: 10.3103/S1068373919110025.
27. Rozinkina I.A., Kiktev D. B., Rivin G.S., Murav'ev A.V., Zhabina I.I., Purina I.E., Shatunova M.V., Blinov D.V., Smirnov A.V., Varentsov M.I. Informatsionnye tekhnologii Gidromettsentra Rossii dlya sverhkratkosrochnogo i kratkosrochnogo prognozov pogody. *Meteospekt*, 2017, no. 4, pp. 17-33. [in Russ.].
28. Shatunova M.V., Bundel A.Yu., Blinov D.V., Kirsanov A.A., Rivin G.S. Evaluation of the NWP High-Resolution COSMO Model Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2020, vol. 375, no. 1 [in Russ.] (in print).
29. Shatunova M.V., Rivin G.S., Rozinkina I.A. Visibility forecasting for February 16–18, 2014 for the region of the Sochi-2014 Olympic Games using the high-resolution COSMO-Ru1 model. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2015, vol. 40, no. 8, pp. 523–530. DOI: 10.3103/S106837391508004X.
30. Bundel A., Gofa F., Alferov D., Astakhova E., Baumann P., Boucouvala D., Damrath U., Eckert P., Kirsanov A., Lapillonne X., Linkowska J., Marsigli C., Montani A., Muraviev A., Obero E., Tesini M.S., Vela N., Wyszogrodzki A., Zaichenko M., Walser A. COSMO Priority Project INSPECT Final Report. COSMO technical report 37, 2019. DOI: 10.5676/DWD_pub/nwv/cosmo-tr_37.
31. Doms G., Baldauf M.A. Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model. Part I: Dynamics and Numerics. 2018, 161 p. Available at: <http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/cosmoDyncsNumcs.pdf>
32. Giorgetta M.A., Brokopf R., Crueger T., Esch M., Fiedler S., Helmert J., Hohenegger C., Kornbluh L., Köhler M., Manzini E., Mauritsen T., Nam C., Raddatz T., Rast S., Reinert D., Sakradzija M., Schmidt H., Schneek R., Schnur R., Silvers L., Wan H., Zängl G., Stevens B. ICON-A, the Atmosphere Component of the ICON Earth System Model: I. Model Description. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 2018, vol. 10, no. 7, pp. 1613-1637.
33. Kiktev D., Joe P., Isaac G., Montani A., I-L Frogner, Nurmi P., Bica B., Milbrandt J., Tsyrlunikov M., Astakhova E., Bundel A., Belair S., Pyle M., Muravyev A., Rivin G., Rozinkina I., Paccagnella T., Wang Y., Reid J., Nipen T., K-D Ahn. FROST-2014: the Sochi Winter Olympics International Project. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 2017, no. 9, pp. 1908-1929.
34. Platonov V., Kislov A., Rivin G., Varentsov M., Rozinkina I., Nikitin M., Chumakov M. Mesoscale atmospheric modelling technology as a tool for creating a long-term meteorological dataset. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 96, 012004, pp. 1-9, DOI: 10.1088/1755-1315/96/1/012004.
35. Poliukhov A., Chubarova N., Kinne S., Rivin G., Shatunova M., Tarasova T. Comparison Between Calculations Of Shortwave Radiation With Different Aerosol Datasets And Measured Data At the MSU MO (Russia). AIP Conference Proceedings, 2017, vol. 1810, pp. 100006.1-100006.4.
36. Revokatova A.P., Kislov A.V., Surkova G.V., Kirsanov A.A., Rivin G.S., Vogel B., Vogel H. Short-Term Forecast of the Carbon Monoxide Concentration Over the Moscow Region by COSMO-ART. *Pure and Applied Geophysics*, 2019, vol. 176, no. 2, pp. 885-899.
37. Rivin G., I. Rozinkina, Astakhova E., Montani A., Bettems J-M., Alferov D., Blinov D., Eckert P., Euripides A., Helmert J., Shatunova M. The COSMO Priority Project CORSO-A Final Report. COSMO Technical Report, 2019, no. 38, P. 65. DOI: 10.5676/DWD pub/nwv/cosmo-tr_38.
38. Rivin G., Rozinkina I., Astakhova E., Montani A., Alferov D., Arpagaus M., Helmert J., Kazakova E., Kirsanov A., Kopeikin V., Kukanova E., Majewski D., Marsigli C., de Morsier G., Muravev A., Paccagnella T., Schatler U., Schra C., Shatunova M., Shcherbakov A., Steiner P., Zaichenko M. The COSMO Priority Project CORSO Final Report. COSMO Technical Report, 2018, no. 35, 65 p.
39. Zängl G., Reinert D., Ripodas P., Baldauf M. The ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2015, vol. 141, no. 687, pp. 563-579.

Поступила в редакцию 05.11.2019 г.

Received by the editor 05.11.2019.