

*Г.С. Ривин, И.А. Розинкина, А.Н. Багров, Д.В. Блинов,
А.А. Кирсанов, Е.В. Кузьмина, М.В. Шатунова, М.М. Чумаков,
Д.Ю. Алферов, А.Ю. Бундель, М.Ю. Зайченко, М.А. Никитин*

МЕЗОМАСШТАБНАЯ МОДЕЛЬ COSMO-RU2 И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕЕ ОПЕРАТИВНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Введение

Начиная с сентября 2009 г. в Гидрометцентре России функционирует система COSMO-Ru [8] численного краткосрочного прогноза погоды на базе негидростатической модели COSMO атмосферы и деятельного слоя почвы [13] одноименного европейского метеорологического консорциума COSMO [11].

Метеорологические службы, входящие в состав консорциума COSMO, развивают и поддерживают модель COSMO. По правилам консорциума к названию модели при ее использовании в оперативной практике добавляют название своей страны, чтобы более или менее однозначно понимать территорию для численного прогноза и выбранные опции модели COSMO (параметризации, метод решения, область использованного гало для граничных условий и т. д.).

По этой причине оперативная версия модели COSMO, используемая в России, имеет имя COSMO-Ru. Заметим, что имя COSMO-Ru имеет и оперативная система краткосрочного прогноза погоды ФГБУ «Гидрометцентр России» для ограниченной территории, включающая в себя в качестве одной из компонент модель COSMO-Ru. Остальные компоненты системы COSMO-Ru связаны с разработанной технологической линией приема, циклической архивации и хранения начальных и граничных данных, организацией автоматической визуализации прогностической продукции (в сутки ежедневно подготавливается около 8000 метеорологических карт и 1000 метеограмм), автоматической

рассылкой многочисленным пользователям как визуализированной продукции, так и файлов в коде GRIB1 (в дальнейшем запланирован переход на код GRIB2).

Для стран, входящих в консорциум, и для стран, не входящих в состав консорциума COSMO, но имеющих лицензию (бесплатную для развивающихся стран и платную для остальных), Немецкая служба погоды (DWD) предоставляет в оперативном режиме в коде GRIB2 начальные и боковые условия из своей оперативной системы – результаты прогноза негидростатической (первой в мире!) глобальной модели ICON [15] с шагом сетки 6,5 км для пяти регионов, в том числе для всей Европы, и 13 км – для остальной части Земли. Модель ICON 20 января 2015 г. заменила квазистатическую глобальную модель GME.

Метеослужбы стран, входящих в консорциум COSMO, в едином согласованном формате обмениваются данными об успешности прогнозирования на основе модели COSMO в рамках своих национальных технологий. Сходство климатических условий России и стран европейского консорциума позволяет с доверием относиться к новым версиям модели, прошедшим тестирование в рамках консорциума, при их реализации для прогнозирования по территории России.

Различия в национальных технологиях, реализуемых на базе модели COSMO странами-членами консорциума, заключаются в особенностях использования начальной информации. В настоящее время это осуществляется только на базе глобальной системы усвоения с учетом дополнительного регионального усвоения данных, главным образом синоптических и радарных.

Для понимания качества прогнозирования начиная с 2008 г. проводились авторские испытания версии COSMO-Ru для различных территорий и шагов сетки, показавшие достаточно высокий уровень успешности и информативности прогнозирования, особенно элементов приземной погоды. На основе совместного анализа с синоптиками Гидрометцентра России был выявлен ряд особенностей продукции мезомасштабного моделирования, ее интерпретации, представления результатов и оценок успешности. Отметим, что ранее прогнозисты Росгидромета не имели опыта работы с продукцией мезомасштабного моделирования.

Оперативные испытания технологии COSMO-Ru проводились в Гидрометцентре России по существующим в настоящее время нормативам оценок численных и общего назначения прогнозов погоды для теплого и холодного периодов.

13 апреля 2011 г. Центральная методическая комиссия по гидрологическим и метеорологическим прогнозам Росгидромета (ЦМКП), 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 решила [6] рекомендовать ФГБУ «Гидрометцентр 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.

В данной статье приводятся результаты оперативных испытаний прогнозов системы COSMO-Ru для Центрального федерального округа (ЦФО) и Северного Кавказа с шагом сетки 2,2 км.

1. Система моделирования COSMO-Ru

1.1. Краткие сведения о консорциуме COSMO

Международный консорциум COSMO (the Consortium for Small-scale Modelling) [11] был основан в 1998 году метеослужбами Германии, Греции, Италии и Швейцарии. Позднее к COSMO присоединились метеослужбы Польши (2002 г.), Румынии (2009 г.), России (2009 г.) и Израиля (с 1 января 2017 г.).

Основная цель консорциума COSMO – развивать и поддерживать оперативную негидростатическую модель атмосферы для прогноза погоды для ограниченной территории. В основу негидростатической мезомасштабной модели, развиваемой этим консорциумом, легла разработанная в Метеослужбе Германии первая в мире оперативная негидростатическая мезомасштабная модель LM (Lokal Modell) с шагом

сетки 7 км [14] (оперативное использование для выпуска прогнозов по Европе с 1999 г.). Впоследствии вместо названия LM по решению консорциума стало употребляться название модели COSMO, одноименное с названием консорциума.

В настоящее время выпуск оперативных прогнозов на основе модели COSMO в части стран-членов (Германии, Польши, России и Румынии) консорциума базируется на применении данных для начальных и боковых граничных условий, полученных с помощью глобальной модели атмосферы ICON [15], в остальных – на прогнозах спектральной квазистатической глобальной модели IFS ЕЦСПП (Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды), имеющей шаг сетки 9 км.

Обязательным условием участия национальных метеослужб в составе консорциума является непосредственное участие специалистов этих метеослужб в разработке алгоритмов и технологий моделирования COSMO. Это условие является большим стимулом для специалистов из стран-участниц консорциума для работы над усовершенствованием модели на основе глубокого понимания алгоритмов, программного обеспечения самой модели и сопутствующих технологий (верификации, регионального усвоения данных, управления выполнением задач, диагностических расчетов и т. д.). Это открывает возможность активного применения самых последних результатов мирового метеорологического сообщества в данной области с быстрейшей его реализацией в национальных прогностических технологиях.

1.2. Общая характеристика модели COSMO

Негидростатическая атмосферная модель COSMO основана на системе термогидродинамических уравнений, описывающих сжимаемый поток воздуха во влажной атмосфере. На сайте консорциума COSMO [12] приведена подробная документация математического описания модели, конечно-разностного метода решения, физического и химического блоков, системы усвоения данных наблюдений, блока подготовки начальной информации, а также руководство по применению модели COSMO.

Уравнения модели COSMO-Ru записываются в системе координат, образованной сферической системой координат со смещенным

северным полюсом по задаваемому меридиану и орографической («terrain-following») вертикальной координатой, связанной с высотой. В консорциуме в настоящее время используются версии модели с шагами сетки по пространству от 1,1 до 13 км.

1.2.1. Основные уравнения модели COSMO

Основные уравнения модели COSMO приведены в [8, 9]. Метод решения конечно-разностного аналога этой системы уравнений является вариантом Викера–Скамарока метода расщепления по физическим процессам Г.И. Марчука. Этот вариант Викера–Скамарока связан с расщеплением системы уравнений на две системы: одна связана с быстрыми акустическими и гравитационными волнами и силой плавуности, а 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 членов – метод Кранка–Николсона.

Подробное изложение дано в [10, 14] и приведенных в них ссылках.

1.2.2. Начальные и граничные условия

При моделировании на ограниченной территории лишь нижняя граница является физической. Верхняя и боковая границы области моделирования обычно задаются искусственно, и условия на них могут быть заданы в зависимости от нужд конкретного приложения.

Начальные и граничные условия в технологиях регионального моделирования COSMO задаются интерполяцией данных, полученных из глобальной модели или варианта модели COSMO с большим шагом сетки. В настоящее время возможно использование данных четырех глобальных моделей, а именно:

- 1) Немецкой службы погоды (конечно-разностная негидростатическая модель ICON с неравномерной сеткой с шагами 6,5 и 13 км);
- 2) ЕЦСПП (спектральная квазистатическая модель IFS, шаг сетки 9 км);
- 3) Национальных центров прогноза окружающей среды США (спектральная квазистатическая модель GFS, шаг сетки 13 км);
- 4) Метеорологической администрации Японии (спектральная квазистатическая модель GSM, шаг сетки примерно 18 км).

1.2.3. Основные работы по развитию системы COSMO-Ru

В последние годы в Гидрометцентре России проведены следующие работы по развитию системы COSMO-Ru (ссылки на соответствующие статьи приведены в [8]):

- разработана технологическая линия, включая препроцессинг и постпроцессинг (циклическая архивация, визуализация, подготовка и распространение результатов);

- разработаны новые и предложены модификации ряда параметризаций физических процессов, используемых в модели в атмосфере и деятельном слое суши;

- проведена работа по адаптации химического блока COSMO-ART к системе COSMO-Ru, организации ежедневных прогнозов COSMO-Ru7-ART в квазиоперативном режиме;

- проведена разработка варианта усвоения данных на основе метода подталкивания;

- разработана система ансамблевых прогнозов высокого разрешения для региона проведения зимних Олимпийских игр;

- проводилась непрерывная верификация прогнозов и исследование прогноза опасных метеорологических явлений для отдельных эпизодов;

- подготовка и проведение оперативного метеорологического обслуживания прогнозами системы COASMO-Ru важнейших мероприятий в стране, например Универсиады Казань-2013, зимней Олимпиады Сочи-2014, включая подготовку новой версии COSMO-Ru с шагом сетки 1,1 км;

- 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.

За период 2014–2016 гг. работа членов консорциума COSMO, включая и перечисленную выше, по развитию одноименной модели и системы COSMO-Ru привела к значимому повышению качества прогнозов COSMO-Ru7 и COSMO-Ru2. В прогнозах температуры, как для прогнозов с шагом 7 км, так и в прогнозах с шагом 2 км, это проявилось довольно заметно (рис. 1–3).

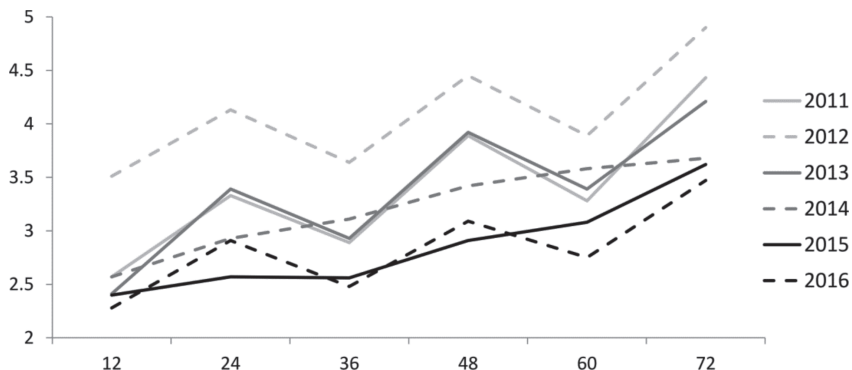


Рис. 1. Эволюция среднеквадратических ошибок прогнозов COSMO-Ru значений температуры на высоте 2 м для января 2011–2016 гг. для Европейской территории России.

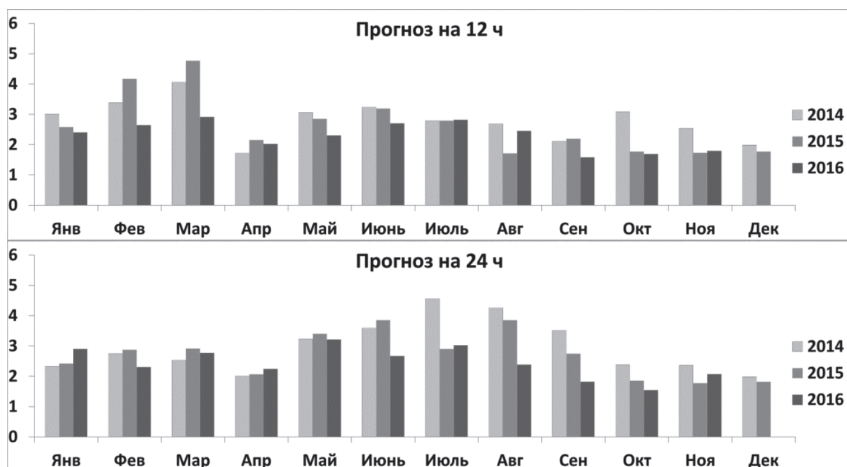


Рис. 2. Эволюция среднеквадратических ошибок прогнозов COSMO-Ru2 значений температуры на высоте 2 м для января 2014–2016 гг. для Центрального федерального округа.

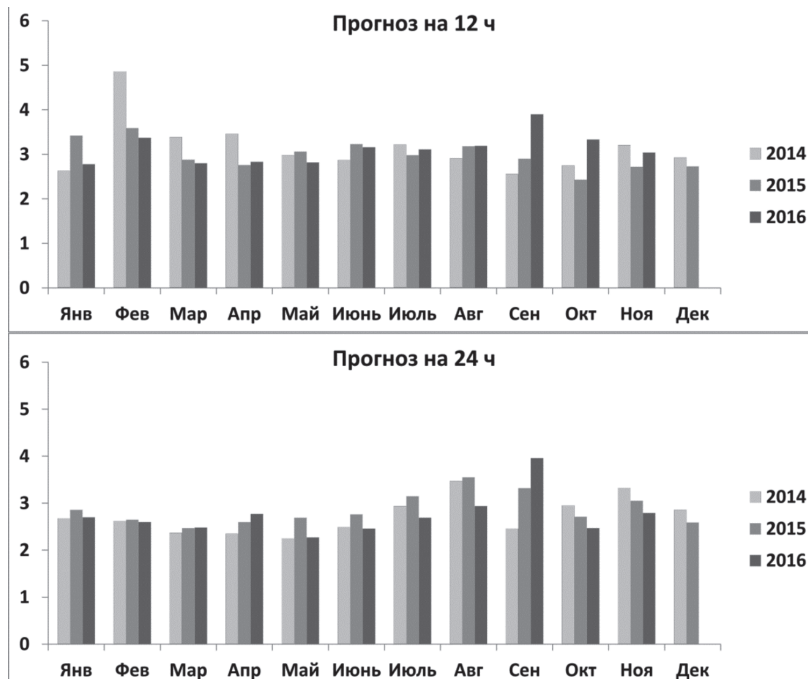


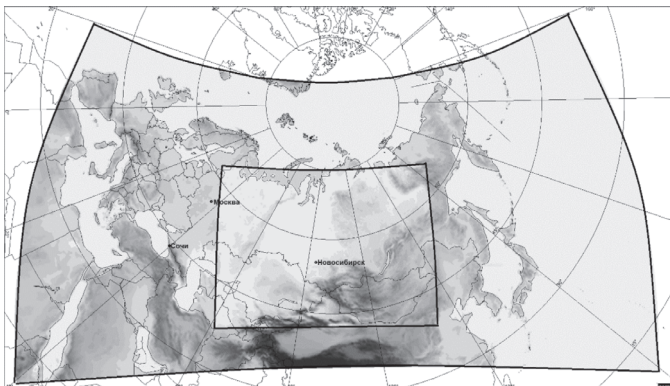
Рис. 3. Эволюция среднеквадратических ошибок прогнозов COSMO-Ru2 значений температуры на высоте 2 м для января 2014–2016 гг. для Северного Кавказа.

В настоящее время продолжается работа по совершенствованию модели COSMO, начата работа по подготовке к применению нового мощного суперкомпьютера.

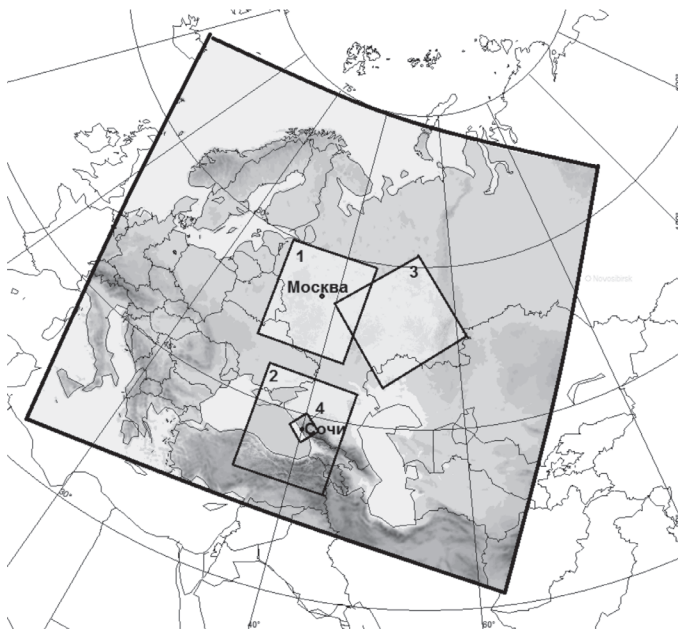
1.3. Технология негидростатической системы краткосрочного прогноза погоды COSMO-Ru Гидрометцентра России

К настоящему времени на 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. 4):

– Центральной и Восточной Европы, Уралу и части Западной Сибири (с запада на восток от Франции до Новосибирской области и с севера на юг от Новой Земли до Ливана), COSMO-Ru7;



а)



б)

Рис. 4. Области интегрирования системы прогноза погоды COSMO-Ru, функционирующей в Гидрометцентре России и СибНИГМИ: версии COSMO-Ru13ENA и COSMO-Ru14Sib (а); COSMO-Ru7, COSMO-Ru2 (б) (1 – для ЦФО, 2 – для ЮВО, 3 – для ВФО) и COSMO-Ru1 (4).

- Сибири, Урала и восточной части ЕТР (прогноз проводится только в Новосибирске), COSMO-Ru14Sib;
- часть Южного ФО (Федерального округа), прилегающая к Черному и Азовскому морям, COSMO-Ru2SFO;
- Центрального ФО, COSMO-RuCF02;
- Европы и Северной части Азии, COSMO-Ru13ENA.

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, COSMO-Ru2VFO;
- региона Сочи, COSMO-Ru1.

В табл. 1 указаны параметры вышеупомянутых версий модели COSMO-Ru.

Таблица 1

Параметры оперативных версий модели COSMO-Ru

Версия модели	Размер области счета, км	Параметры сетки	Шаг сетки, км	Шаг по времени, с	Заблаговременность прогноза, ч	Время счета, мин	Источник граничных и начальных условий
COSMO-Ru13ENA	13200×6100	1000×500×40	13,2	120	99	70	ICON
COSMO-Ru7	4900×4340	700×620×40	7	66	78	50	ICON
COSMO-Ru2	900×1000	420×470×50	2,2	18	42	50	COSMO-Ru7
COSMO-Ru1	210×210	190×190×50	1,1	6	36	25	COSMO-Ru2
COSMO-Ru14Sib	5000×3500	380×270×40	13,2	120	78	50	ICON

В настоящее время система краткосрочного прогноза погоды COSMO-Ru использует версию 5.00 модели COSMO (от 08.11.2013 г.) и версию 2.00 препроцессинга (от 01.11.2013 г.). Для нахождения начальных и боковых граничных условий используются прогнозы негидростатической глобальной модели ICON. Изменения в более поздних версиях незначительны и просто связаны с исправлением ошибок,

т. к. основное внимание было направлено на развитие версии модели COSMO для графических процессоров и модели ICON-LAM.

Результаты численного прогноза погоды с помощью системы COSMO-Ru ежедневно четыре раза в сутки по начальным данным 00, 06, 12 и 18 ч ВСВ подготавливаются и пересылаются пользователям на серверы в виде файлов в коде GRIB (в различных системах вертикальных координат и различного состава в зависимости от запросов пользователей), в виде метеорологических карт (порядка 8000 карт в сутки) и метеограмм (примерно 1000 в сутки) пересылаются по электронной почте и частично выкладываются на сайтах Росгидромета, ФГБУ «Гидрометцентр России» и ФГБУ «СибНИГМИ».

Численные прогнозы COSMO-Ru проводятся параллельно прогнозам по модели ICON в Немецкой метеослужбе со сдвигом примерно 10 мин и заканчиваются менее чем через 4 часа 50 мин после соответствующего срока наблюдения, включая автоматическую подготовку карт и метеограмм и их рассылку пользователям, что свидетельствует о выполнении требований к времени выполнения оперативных численных прогнозов.

На рис. 5 приведены основные характеристики технологии COSMO-Ru Гидрометцентра России в 2016 г., а на рис. 6 – расчетные уровни модели COSMO-Ru с шагами сетки 1,1 и 2,2 км.

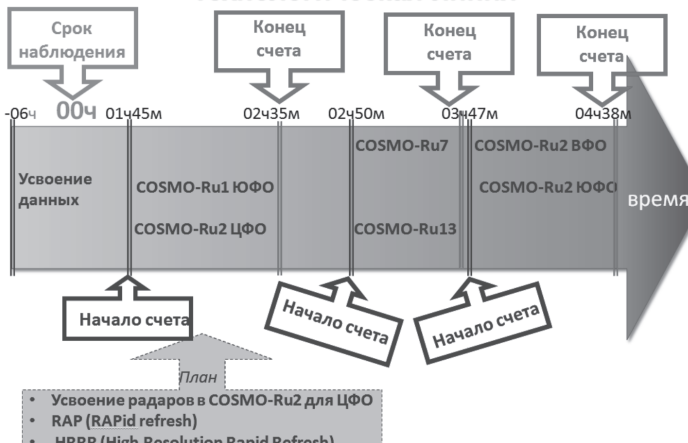


Рис. 5. Технологическая линия системы прогноза COSMO-Ru.

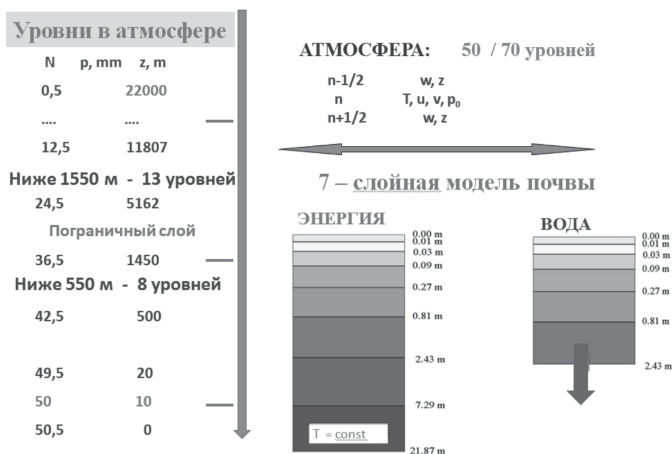


Рис. 6. Расчетные уровни модели COSMO-Ru с шагами сетки 1,1 и 2,2 км.

1.4. Основные виды продукции COSMO-Ru для распространения потребителям

С момента начала функционирования технологии COSMO-Ru одним из актуальных вопросов стал вопрос об оптимальности предоставления потребителям продукции вычислений. Дело в том, что продукция мезомасштабного моделирования имеет на порядки большие объемы выходных данных (в силу высокого пространственно-временного разрешения), чем используемая традиционно продукция глобального моделирования.

Для доведения до потребителя-прогнозиста продукции моделирования высокого разрешения (передачи ее по каналам связи, визуализации системами, рассчитанными на предварительное размещение информации в пользовательских базах данных), использование стандартных традиционных подходов оперативного информационного обеспечения Росгидромета оказалось либо недостаточно эффективным, либо невозможным.

Для быстрого доведения продукции до потребителя разработчиками COSMO-Ru были предложены решения, основанные, во-первых, на использовании интернет-возможностей (ftp или электронной почты), во-вторых, распространении готовых файлов в графических форматах,

наряду с возможностями предоставления комплектов GRIB-файлов по согласованию с пользователями. Надо сказать, что подавляющее большинство пользователей – прогностических центров Росгидромета – остановили свой выбор на варианте готовой графической продукции.

Графическая продукция формируется в виде наборов карт для районов и различных комплектов прогностических полей: давления на уровне моря + осадков + облачности, высоты H500 + давления на уровне моря + приземной температуры, линий тока + модуля скорости ветра + порывов ветра и т. д. Карты формируются для прогнозов через каждые три часа для шагов сетки 7 и 13,2 км и через каждый час для шагов сетки 1,1 и 2,2 км.

Помимо карт, для пунктов производится формирование метеограмм в виде текстовых файлов и графиков временного хода метеорологических величин: скорости ветра и температуры воздуха на нескольких уровнях до высоты 5 км, высоты свежевывающего снега, приземной точки росы, сумм осадков за час с учетом фазы, высоты условий конвекции. Кроме того, выдается информация о вертикальных профилях, различные метеорологические индексы, используемые в оперативной и исследовательской практике.

Дизайн всех видов карт и метеограмм детально обсуждался с синоптическими подразделениями Гидрометцентра России: Отдела краткосрочных прогнозов погоды и опасных явлений, Лаборатории методического сопровождения прогнозов погоды и Отдела морских гидрологических прогнозов. В ходе этих обсуждений одновременно проводился анализ информативности продукции COSMO-Ru с методической точки зрения, выявлялись основные особенности интерпретации нового вида прогнозов.

Все перечисленные виды графической продукции распространяются по FTP или электронной почте в течение десяти минут после окончания счета.

Помимо графических файлов, формируемых средствами GrADS, непосредственно после вычислений из выходных файлов модели средствами удаленного доступа производится перенос, раскодирование и запись информации в форме GRIB-файлов в пользовательские базы Гидрометцентра России, после чего продукция становится доступной всем технологиям Гидрометцентра России, сопряженным с этими базами данных.

Программы расчета оценок, по результатам которых были выполнены оперативные испытания, использовали продукцию моделирования, размещенную в пользовательских базах данных Гидрометцентра России.

Испытания технологии численного прогноза погоды (ЧПП) очень высокого пространственного разрешения (шаг сетки 2,2 км) в оперативном режиме проводились в практике Росгидромета впервые. Они делались в период с октября 2014 по сентябрь 2016 года, итоги подведены отдельно для холодного (октябрь-апрель) и теплого (май-сентябрь) периодов отдельно для территории Центральной России и Северного Кавказа. Исходный срок всех прогнозов – 00 ч ВСВ.

2. Сравнение успешности численных краткосрочных прогнозов погоды по территории Центральной России

Оценка прогнозов приземной температуры и «среднего» ветра нами проводилась для заблаговременности 12 и 24 ч; осадков – для заблаговременности 18 ч. Дополнительно оценивались прогнозы сильных и очень сильных осадков и порывов ветра на текущий день. Для сравнения привлекались прогнозы четырех иностранных (UKMO – Великобритания, NCEP – США, DWD – Германия, JAPA – Япония) глобальных моделей и трех отечественных (PLAV, PLAV20 и T339) глобальных моделей, прогнозы региональной модели (REGI) и прогнозы по мезомоделям WRF-18 км и WRF-20 км (кураторы – К.Г. Рубинштейн и Л.В. Беркович), COSMO-Ru 7 км и COSMO-Ru 13 км. Приведены оценки и по «комплексному» прогнозу метеоэлементов (aUNJ) [2, 12], который основан на статистическом «комплексировании» прогнозов UKMO, NCEP, DWD и JAPA и показывает неплохие результаты. Прогностические поля UKMO, NCEP, DWD и JAPA поступают в ФГБУ «Гидрометцентр России» в широтно-долготных сетках с шагом 1, 0,5, 0,25 и 1,25°, поля PLAV – в сетке 0,9°×0,72°, поля PLAV20 с шагом ~20 км и REGI ~75 км. Заметим, что при вычислениях в зарубежных глобальных моделях используется шаг сетки 14–20 км. В них усваивается большое количество наблюдений, в том числе и недоступных в ФГБУ «Гидрометцентр России».

Во все численные модели включены совершенные системы учета разнообразных притоков тепла и неадиабатических факторов, что позволяет достаточно успешно давать прогноз различных приземных метеоэлементов. Прогностические значения приземных температуры и «среднего» ветра, осадков на проверочных станциях для каждой

модели вычислялись путем билинейной интерполяции и затем сопоставлялись с наблюдениями на этой станции.

Оценка проводилась по данным синоптических станций, расположенных на территории Центрального федерального округа (51–59° с. ш., 31–43° в. д.). Использовались ~175 станций с наблюдениями температуры и ветра и ~160 станций с наблюдениями количества осадков (часть наблюдений автоматических станций об осадках была отсеяна как недостоверные).

В табл. 2–5 представлены оценки прогнозов приземной температуры воздуха на 12 и 24 ч для холодного и теплого сезонов 2014–2016 гг. В таблицах BIAS, RMS, ABS и OTNO – арифметическая (систематическая), среднеквадратическая, абсолютная и относительная ошибки соответственно; %≤1, %≤2, %≤3, %>3 – процент прогнозов с ошибкой ≤ 1, 2, 3 °C и >3 °C; N – число станций, по которым проводилось осреднение. Несколько различное количество привлеченных станций для разных моделей объясняется отсутствием прогнозов за ту или иную дату по техническим причинам.

Таблица 2

Оценки прогнозов приземной температуры (°C) на 12 ч по территории ЦФО за период октябрь – апрель 2014–2016 гг.

Модель	BIAS	RMS	ABS	OTNO	%≤1	%≤2	%≤3	%>3	N
UKMO	–0,20	1,75	1,33	0,31	50	78	91	9	68415
NCEP	–0,82	2,19	1,59	0,38	45	72	86	14	68138
DWD	–0,92	2,27	1,66	0,39	42	71	86	14	68085
JAPA	–0,73	2,02	1,52	0,36	45	73	88	12	68556
T339	–1,58	3,30	2,44	0,57	30	54	71	29	54267
PLAV	–1,11	2,42	1,83	0,43	37	66	83	17	68423
PLAV20	–1,48	2,59	1,93	0,45	37	64	80	20	67875
Regi	–0,66	2,15	1,64	0,39	43	69	84	16	68554
WRF-Ryb	–0,78	2,18	1,60	0,37	44	72	86	14	49410
WRF-Ber	–0,95	2,47	1,81	0,41	40	67	83	17	49844
COSMO-Ru13	–1,22	2,58	1,87	0,44	40	66	82	18	65548
COSMO-Ru7	–1,16	2,61	1,90	0,45	38	66	81	19	68183
COSMO-Ru2,2	–1,15	2,75	1,97	0,46	38	65	81	19	64904
aUNJ	0,02	1,55	1,19	0,28	53	82	94	6	68456

Таблица 3

Оценки прогнозов приземной температуры (°C) на 24 ч
по территории ЦФО за период октябрь–апрель 2014–2016 гг.

Модель	BIAS	RMS	ABS	OTNO	%≤1	%≤2	%≤3	%>3	N
UKMO	1,05	2,51	1,71	0,57	48	72	83	17	68225
NCEP	-0,21	2,11	1,57	0,52	44	72	86	14	67948
DWD	-0,39	2,08	1,57	0,52	43	72	87	13	67799
JAPA	-0,60	2,14	1,59	0,53	43	72	87	13	68350
T339	-1,28	3,00	2,30	0,75	30	55	72	28	53876
PLAV	-1,69	2,87	2,42	0,80	20	44	69	31	68222
PLAV20	-0,44	2,65	2,03	0,67	32	60	79	21	67669
Regi	0,90	2,54	1,79	0,59	44	69	82	18	68352
WRF-Ryb	-0,32	2,44	1,73	0,58	43	70	84	16	48924
WRF-Ber	-0,43	2,70	1,92	0,67	41	66	80	20	48001
COSMO-Ru13	-0,26	2,24	1,69	0,56	42	69	84	16	65511
COSMO-Ru7	-0,41	2,25	1,71	0,56	40	68	84	16	67982
COSMO-Ru2,2	-0,32	2,37	1,78	0,59	40	67	83	17	64582
aUNJ	0,05	1,81	1,33	0,44	51	79	91	9	68211

Таблица 4

Оценки прогнозов приземной температуры (°C) на 12 ч по территории ЦФО
за период май–сентябрь 2015–2016 гг.

Модель	BIAS	RMS	ABS	OTNO	%≤1	%≤2	%≤3	%>3	N
UKMO	-0,66	1,77	1,38	0,16	45	78	93	7	54371
NCEP	-0,26	1,76	1,33	0,15	50	79	93	7	54371
DWD	0,29	1,77	1,29	0,15	53	81	92	8	54552
JAPA	-0,47	1,99	1,57	0,18	41	71	88	12	53822
T339	-1,57	2,91	2,39	0,28	25	48	69	31	51372
PLAV	0,97	2,30	1,77	0,20	38	66	84	16	54552
PLAV20	-1,87	2,97	2,49	0,29	22	43	65	35	54552
Regi	0,90	2,54	1,79	0,59	44	69	82	18	54552
WRF-Ryb	-0,14	1,91	1,46	0,17	44	76	91	9	47377
WRF-Ber	-0,66	1,97	1,58	0,18	38	71	90	10	47704
COSMO-Ru13	-0,81	2,02	1,57	0,18	42	71	87	13	53540
COSMO-Ru7	-0,44	1,97	1,50	0,17	45	74	89	11	54208
COSMO-Ru2,2	1,10	2,48	1,86	0,21	38	66	83	17	52476
aUNJ	0,02	1,55	1,14	0,13	57	85	95	5	54106

**Оценки прогнозов приземной температуры (°C) на 24 ч по территории ЦФО
за период май–сентябрь 2015–2016 гг.**

Модель	BIAS	RMS	ABS	OTNO	%≤1	%≤2	%≤3	%>3	N
UKMO	1,08	2,00	1,52	0,58	45	72	88	12	54225
NCEP	-0,24	1,92	1,48	0,57	45	74	89	11	54225
DWD	1,75	2,61	2,05	0,78	33	58	76	24	54401
JAPA	0,56	1,88	1,46	0,55	45	74	89	11	53676
T339	0,57	2,22	1,76	0,68	37	65	83	17	51234
PLAV	1,18	2,78	2,09	0,80	35	61	77	23	54401
PLAV20	1,48	3,13	2,35	0,90	32	56	72	28	54401
Regi	1,00	2,22	1,70	0,65	40	67	84	16	54401
WRF-Ryb	0,04	1,87	1,46	0,57	45	74	89	11	47069
WRF-Ber	-0,08	1,97	1,55	0,58	42	71	88	12	46694
COSMO-Ru13	1,54	2,53	1,95	0,75	36	61	79	21	53221
COSMO-Ru7	1,25	2,34	1,80	0,69	39	66	82	18	54060
COSMO-Ru2,2	2,05	3,02	2,40	0,92	28	51	69	31	52330
aUNJ	0,03	1,52	1,19	0,45	53	83	95	5	53934

Испытания показали (см. табл. 2–5), что прогнозы приземной температуры воздуха по модели COSMO-Ru 2,2 км уступают по качеству прогнозам глобальных иностранных моделей, а также модели COSMO-Ru 7 км и другим мезомоделям, хотя в 2016 г. было некоторое улучшение оценок.

Для оценки прогнозов сильных осадков необходимо построить таблицу сопряженности и вычислить характеристики точности прогнозов [5].

Таблица сопряженности

Прогноз	Наблюдалось		Сумма
	с явлением	без явления	
с явлением	N11	N12	N10
без явления	N21	N22	N20
Сумма	N01	N02	N00

В таблице использованы следующие обозначения:

N11 – явление прогнозировалось и наблюдалось;

N_{12} – явление прогнозировалось, но не наблюдалось («ложные тревоги»);

$N_{10}=N_{11}+N_{12}$ – число случаев с прогнозом явления;

N_{21} – прогнозировалось отсутствие явления, но оно наблюдалось («пропуск цели»);

N_{22} – прогнозировалось отсутствие явления и его не наблюдалось;

$N_{20}=N_{21}+N_{22}$ – число случаев с прогнозом отсутствия явления;

$N_{01}=N_{11}+N_{21}$ – число случаев с явлением;

$N_{02}=N_{12}+N_{22}$ – число случаев с отсутствием явления;

N_{00} – общее число случаев.

Показатели успешности прогноза осадков:

– оправдываемость редкого явления: $U=N_{11}/(N_{21}+N_{10})$;

– предупрежденность явления: $Pred=N_{11}/N_{01}$;

– критерий Пирси–Обухова: $PIR=N_{11}/N_{01} - N_{12}/N_{02}$;

– коэффициент «ложных тревог»: $k_{LT}=N_{12}/N_{01}$;

– критерий ETS: $ETS=(N_{11}-ar)/(N_{11}-ar+N_{12}+N_{21})$, где $ar = ((N_{11}+N_{12}) \cdot (N_{11}+N_{21}))/N_{00}$;

– критерий Н.А. Багрова–Хайдке (для редких явлений): $BX=(v-v_0)/(1-v_0)$, где $v=(N_{11}+N_{22})/N_{00}$, $v_0=(m_1+m_2)/N_{00}$, $m_1=(N_{10} \times N_{02})/N_{00}$, $m_2=(N_{20} \times N_{02})/N_{00}$.

В табл. 6 и 7 представлены оценки прогнозов 12-часовых сумм осадков на 18 ч вперед, т. е. на текущий день (в 18 ч ВСВ делается измерение количества осадков, выпавших за 12 ч на станциях территории оценки).

Обозначения в таблицах: U_n (%) – оправдываемость количества осадков, рассчитанная по Наставлению [4], где учитывается и факт выпадения осадков, и их количество по грубым градациям, которые, в свою очередь, зависят от фазы осадков. Фаза осадков определялась по температуре в срок наблюдения (выше -1 °С – дождь или смешанные осадки, ниже -1 °С – снег). Критерии ETS и PIR относятся только к прогнозу факта осадков. Чем величина критерия больше, тем выше качество прогнозов; BIAS и ABS – арифметическая и абсолютная ошибки количества осадков в мм/12ч; GORD – некая безразмерная, эмпирически подобранная величина, предложенная В.А. Гординым для оценки осадков. Она включает оценку факта и количества осадков и оказалась достаточно репрезентативной.

Пусть x – фактическое количество выпавших осадков, измеренных на станции (в мм), а y – прогностическое количество для той же станции. Тогда:

$$GORD(x, y) = \frac{(x - y)^2}{(x + y)^{3/2}} (1 \text{ мм})^{-1/2}$$

Чем меньше значение критерия GORD, тем лучше прогноз.

Как видно из табл. 6 и 7, успешность прогнозов осадков в холодный сезон несколько выше, чем в теплый. Прогнозы осадков модели COSMO-Ru 2.2 км оказались несколько лучше или той же успешности, что и прогнозы глобальных моделей, и прогнозы COSMO-Ru 7 км.

При оценке прогноза сильных осадков прогноз считается оправдавшимся, если фактическое и прогностическое количество осадков ≥ 6 мм/12ч (снег) или ≥ 15 мм/12ч (дождь и смешанные осадки) соответствует этим критериям. Для очень сильных осадков (≥ 20 мм/12ч для снега или ≥ 50 мм/12ч для дождя и смешанных осадков) прогноз оправдывается, если прогнозировалось ≥ 20 мм/12ч или ≥ 50 мм/12ч, а фактически наблюдалось 16 мм/12ч и 40 мм/12ч (т. е. с учетом допуска) соответственно [4].

Таблица 6

Оценки прогнозов осадков на 18 ч ВСВ (мм/12ч) по территории ЦФО за период октябрь–апрель 2014–2016 гг.

Модель	Un	ETS	PIR	BIAS	ABS	GORD	N
UKMO	82	0,35	0,54	0,27	0,58	0,263	60915
NCEP	80	0,28	0,45	0,25	0,61	0,302	60445
DWD	82	0,33	0,51	0,11	0,54	0,256	60311
JAPA	84	0,42	0,60	0,20	0,57	0,258	60827
T339	82	0,34	0,50	0,40	0,86	0,300	47922
PLAV	84	0,36	0,53	-0,09	0,48	0,226	61014
PLAV20	79	0,24	0,40	-0,02	0,61	0,323	60386
Regi	81	0,27	0,42	0,03	0,63	0,290	60994
WRF-Ryb	85	0,42	0,59	0,13	0,56	0,233	43174
WRF-Ber	79	0,30	0,47	0,86	1,14	0,372	42634
COSMO-Ru13	84	0,39	0,57	0,07	0,53	0,230	57726
COSMO-Ru7	84	0,38	0,56	0,06	0,52	0,234	60513
COSMO-Ru2,2	84	0,39	0,57	0,05	0,57	0,243	57476
aUNJ	87	0,45	0,62	-0,08	0,43	0,183	61298

**Оценки прогнозов осадков на 18 ч ВСВ (мм/12ч) по территории ЦФО
за период май–сентябрь 2015–2016 гг.**

Модель	Un	ETS	PIR	BIAS	ABS	GORD	N
UKMO	76	0,30	0,55	0,77	1,61	0,521	47373
NCEP	74	0,24	0,47	0,38	1,45	0,531	47329
DWD	78	0,30	0,53	0,17	1,31	0,443	47373
JAPA	78	0,35	0,57	0,43	1,44	0,474	46703
T339	82	0,34	0,50	0,06	1,47	0,421	44500
PLAV	81	0,36	0,56	-0,26	1,16	0,400	47329
PLAV20	80	0,33	0,54	-0,14	1,21	0,418	47329
Regi	82	0,24	0,34	-0,73	1,14	0,404	47016
WRF-Ryb	77	0,32	0,55	0,49	1,49	0,495	41005
WRF-Ber	78	0,35	0,59	0,60	1,56	0,490	41277
COSMO-Ru13	82	0,37	0,56	-0,04	1,28	0,398	46278
COSMO-Ru7	83	0,37	0,56	-0,21	1,18	0,377	47025
COSMO-Ru2,2	82	0,33	0,47	-0,18	1,35	0,409	45410
aUNJ	83	0,44	0,63	0,18	1,26	0,368	47329

Соответствующие матрицы и оценки для холодного полугодия представлены в табл. 8 и 9.

Отметим, что за эти два сезона некоторая небольшая часть сильных осадков выпадала в виде дождя и смешанных осадков, и это учитывалось в оценке; очень сильных дождевых осадков в эти сезоны на этой территории не наблюдалось.

Из матриц сопряженности видно, что сильные осадки – довольно редкое явление, и они наблюдались менее, чем в 1,5 % случаев; очень сильный снег на рассматриваемой территории – сверхредкое явление для этой выборки и наблюдался лишь в 0,05 % всех случаев. В оценке сильных и очень сильных осадков представлена модель UKMO, которая показала лучшие результаты, и две модели COSMO-Ru. Остальные модели оказались хуже и не представлены из-за экономии места в статье.

Прогнозы осадков для моделей COSMO-Ru 7 км и COSMO-Ru 2,2 км оценивались дополнительно с использованием следующей предварительной процедуры: взята некоторая окрестность вокруг каждой станции в $0,2^\circ$ (~22 км), и из этой окрестности выбирался узел модели с максимальным количеством осадков, затем сравнивали со значением на станции (варианты А в табл. 8, 9 и далее). В этом случае заметно возрастает число «ложных тревог», но увеличивается и предупреденность явления. Как видно из табл. 8 и 9, модели COSMO-Ru в холодный сезон показали вполне удовлетворительную оправдываемость сильных и даже очень сильных осадков. Напомним, впрочем, что в этот сезон выпадают главным образом обложные осадки, для которых характерна обширная территория выпадения и гораздо большая равномерность, чем для ливневых конвективных осадков.

Таблица 8

Оценки прогноза сильных осадков на 18 ч ВСВ (факт и прогноз $R \geq 6$ мм/12ч в случаях выпадения снега или $R \geq 15$ мм/12ч в случаях выпадения дождя) по территории ЦФО в период январь–апрель 2015г., октябрь 2015 – апрель 2016 г.

Модель	Матрица сопряженности			U	Pred	kLT	BX	ETS
UKMO	313	209	522	38	53	0,4	0,55	0,38
	283	48714	48997					
	596	48923	49519					
COSMO-Ru7	303	250	553	36	51	0,4	0,50	0,34
	289	48166	48455					
	592	48416	49008					
COSMO-Ru7 (А, окрест. 22 км)	387	498	885	35	64	0,8	0,50	0,34
	213	48885	49098					
	600	49383	49983					
COSMO-Ru2,2	287	312	599	32	49	0,5	0,46	0,30
	294	46255	46549					
	581	46567	47148					
COSMO-Ru2,2 (А, окрест. 22 км)	394	818	1212	28	68	1,4	0,42	0,27
	187	45749	45936					
	581	46567	47148					

**Оценки прогноза очень сильных осадков на 18 ч ВСВ
(факт и прогноз $R \geq 20$ мм/12ч в случаях выпадения снега,
с учетом допуска [4] факт $R \geq 16$ мм/12ч) по территории ЦФО
в период январь–апрель 2015 г., октябрь 2015 – апрель 2016 г.**

Модель	Матрица сопряженности			U	Pred	kLT
	3	3	6			
UKMO	22			10	12	0,1
	25					
	8	10	18			
COSMO-Ru7	17			23	32	0,4
	25					
	14	22	36			
COSMO-Ru7 (А, окрест. 22 км)	11			30	56	0,9
	25					
	7	6	13			
COSMO-Ru2,2	18			23	28	0,2
	25					
	12	27	39			
COSMO-Ru2,2 (А, окрест. 22 км)	13			23	48	1,1
	25					

В табл. 10 представлены матрицы и оценки прогнозов сильных осадков для теплого полугодия. Кроме моделей COSMO-Ru здесь также представлена только английская модель UKMO, которая показала лучшие оценки. Результаты оценок таких осадков у всех моделей оказались гораздо скромнее, и их только с некоторой натяжкой можно признать удовлетворительными. Важные для практики очень сильные летние осадки (с учетом допуска ≥ 40 мм/12ч, их в выборке за два сезона оказалось 45, т. е. всего $\sim 0,1$ % всех случаев) ни одна модель (из 13) практически не предсказала, и соответствующая таблица не приводится. К сожалению, такие же результаты для очень сильных осадков были и в сезоны 2012–2013 гг. [1].

Отметим, что прогнозы сильных осадков по модели COSMO-Ru 2,2 км по полученным оценкам несколько уступают прогнозам COSMO-Ru 7 км (табл. 8–10).

**Оценки прогноза сильных осадков на 18 ч ВСВ ($R \geq 15$ мм/12, дождь)
по территории ЦФО май – сентябрь 2015–2016 гг.**

Модель	Матрица сопряженности			U	Pred	kLT	BX	ETS
UKMO	262	671	933	18	34	0,9	0,30	0,17
	502	45938	46440					
	764	46609	47373					
COSMO-Ru7	137	324	461	13	18	0,4	0,21	0,12
	625	45939	46564					
	762	46263	47025					
COSMO-Ru7 (А, окрест. 22 км)	282	1030	1312	16	37	1,4	0,26	0,15
	480	45553	46034					
	762	46584	47346					
COSMO-Ru2,2	106	569	675	8	15	0,8	0,14	0,07
	614	44121	44735					
	720	44690	45410					
COSMO-Ru2,2 (А, окрест. 22 км)	357	3371	3728	8	50	4,7	0,14	0,08
	358	41015	41373					
	715	44386	45101					

Проводилась оценка прогнозов приземного, так называемого «среднего» ветра, т. е. ветра, измеряемого на станциях анемометром с осреднением 10 мин. Однако анемометр измеряет и порывы ветра как в срок наблюдения, так и между сроками. Оценка прогноза «среднего» ветра численных моделей имеет небольшой практический интерес, так как синоптики дают прогноз ветра в очень грубых градациях и практически любой численный прогноз будет точнее синоптического. Поэтому эти оценки здесь не приводятся. Осредненные векторные ошибки полей приземного ветра всех версий модели COSMO-Ru оказались несколько меньше, чем по английской и американской глобальным моделям, но несколько больше, чем по японской (порядок величин всех этих ошибок ~ 2 м/с).

Однако прогноз сильных порывов ветра (шквалов в летний период) представляет несомненный практический интерес, т. к. они могут нанести значительный ущерб различным отраслям экономики. В холодный сезон сильные порывы ветра наблюдаются, как правило, на фоне сильного «среднего» ветра на обширной территории и обусловлены большими барическими градиентами и турбулентностью в пограничном слое атмосферы. Сильные порывы ветра в летний период вызваны главным образом конвекцией (шквалы) и обычно имеют очень локальный характер.

Для оценки порывов ветра вся область оценки была разбита на отдельные «квадратики» со стороной 1° по широте и долготе (т. е. область оценки прогнозов состоит из $13 \times 9 = 117$ «квадратиков»). В каждом таком «квадратике» выбиралось максимальное значение порыва ветра из прогностического поля в период с 12 до 18 ч ВСВ; затем также выбиралось максимальное значение порыва ветра на всех станциях за этот же период времени, попавших в «квадратик», и проводилось сравнение. Обычно в оценке участвовало 103–104 «квадратика» с данными о порывах ветра.

В табл. 11 приведены матрицы и оценки прогнозов порывов ветра моделей COSMO-Ru 7 км и COSMO-Ru 2,2 км за холодный период 2015–2016 гг. для скоростей ветра ≥ 18 м/с и ≥ 22 м/с. По нашему мнению, представленные оценки вполне удовлетворительные, однако при лучшей предсказуемости явления прогнозы по модели COSMO-Ru 2,2 км имеют заметно больше «ложных тревог», чем COSMO-Ru 7 км.

В летний период кроме зафиксированных на станциях порывов ветра были дополнительно включены и данные так называемых «донесений», т. е. данные о шквалах, нанесших заметный ущерб и не отмеченных станциями. Местоположение таких шквалов и скорость ветра в них в этих случаях определялась довольно приблизительно. Они составляли $\sim 10\%$ всех случаев шквалов. В летний период в оценку шквалов были включены и физико-статистические прогнозы по методам А.А. Алексеевой, Е.В. Васильева и Э.В. Переходцевой [3], рассчитываемые с шагом сетки 75 км. Эти результаты представлены в табл. 12 и 13. Из анализа этих таблиц можно сделать вывод, что все эти методы прогнозируют летние порывы ветра, включая шквалы, согласно имеющимся фактическим данным, малоудовлетворительно.

Таблица 11

Оценки прогноза порывов ветра по площадям $1^\circ \times 1^\circ$ на 12 ч по территории ЦФО
в период январь – апрель 2015 г., октябрь 2015 – апрель 2016 г.

Модель	Матрица сопряженности			U	Pred	kLT	BX	ETS
Порывы $V \geq 18$ м/с								
COSMO-Ru7	356	1063	1419	23	72	2,2	0,36	0,21
	135	32846	32951					
	491	33909	34400					
COSMO-Ru2,2	437	2794	3231	13	88	5,6	0,21	0,12
	58	30901	30959					
	495	33695	34190					
Порывы $V \geq 22$ м/с								
COSMO-Ru7	29	169	198	13	63	3,7	0,25	0,13
	17	34185	34202					
	46	34354	34400					
COSMO-Ru2,2	35	564	599	6	74	12,0	0,16	0,09
	12	33579	33591					
	47	34143	34190					

Таблица 12

Оценки прогноза порывов ветра $V \geq 18$ м/с по площадям $1^\circ \times 1^\circ$ на 12 ч
по территории ЦФО в период 16 мая – 15 сентября 2015–2016 гг.

Модель	Матрица сопряженности			U	Pred	kLT	BX	ETS
Е.В. Васильев (crit ≥ 3)	20	634	654	2	7	2,3	0,02	0,01
	258	24633	24891					
	278	25267	25545					
COSMO-Ru7	115	1168	1283	7	41	4,1	0,14	0,08
	172	24562	24737					
	279	25371	25650					
COSMO-Ru2,2	152	2366	3518	4	62	9,6	0,07	0,04
	92	21625	21717					
	244	24991	25235					

Таблица 13

Оценки прогноза порывов ветра $V \geq 22$ м/с, включая шквалы, по площадям $1^\circ \times 1^\circ$ на 12 ч по территории ЦФО в период 16 мая – 15 сентября 2015–2016 гг.

Модель	Матрица сопряженности			U	Pred	kLT	BX	ETS
А.А. Алексеева (crit ≥ 1)	29	2872	2901	1	57	56,3	0,01	0,01
	22	22622	22644					
	51	25494	25545					
Е.В. Васильев (crit ≥ 5)	5	649	654	1	9	12,7	0,01	0,01
	46	24845	24891					
	51	25494	25545					
Э.В. Переходцева (crit ≥ 60)	25	3927	3952	1	49	77,0	0,01	0
	26	21777	21803					
	51	25494	25545					
COSMO-Ru7	0	45	45	0	0	0.9	0	0
	51	25554	25605					
	51	25599	25650					
COSMO-Ru2,2	16	1351	1367	1	34	28,7	0,02	0,01
	31	23837	23868					
	47	25188	25235					

Отметим, что проблема определения местоположения шквалов и силы ветра в них еще далека от разрешения (может быть, в этом вопросе помогут данные ДМРЛ-С после получения результатов их валидации). Это серьезно затрудняет адекватную оценку этого явления.

3. Успешность прогнозирования по территории Северного Кавказа

Вариант модели COSMO-Ru 2,2 км для Северного Кавказа оценивался по области $42\text{--}45^\circ$ с. ш. и $37\text{--}45^\circ$ в. д. Для оценки использовались данные ~53 синоптических станций, расположенных на этой территории.

В холодный период прогнозы приземной температуры воздуха на 12 и 24 ч по модели COSMO-Ru 2,2 км оказались лучшими среди всех других моделей. В теплый период это же можно сказать о прогнозах на 12 ч, прогнозы на 24 ч незначительно уступают прогнозам ряда моделей (табл. 14–17).

Таблица 14

Оценки прогнозов приземной температуры (°C) на 12 ч
по территории Северного Кавказа за период октябрь – апрель 2014–2016 гг.

Модель	BIAS	RMS	ABS	OTNO	%≤1	%≤2	%≤3	%>3	N
UKMO	-1,75	4,02	3,02	0,49	24	45	63	37	22418
NCEP	-1,33	3,50	2,64	0,42	29	50	66	34	22329
DWD	-1,36	3,47	2,55	0,41	30	54	70	30	22234
JAPA	-2,63	4,42	3,57	0,58	18	34	49	51	22392
T339	-4,80	6,70	5,40	0,86	12	23	33	67	17518
PLAV	-1,86	4,24	3,32	0,54	21	40	55	45	22347
PLAV20	-1,71	4,64	3,58	0,58	19	37	52	48	22180
Regi	-1,82	4,84	3,78	0,61	18	35	50	50	22392
WRF-Ryb	-1,56	3,78	2,81	0,45	27	49	66	34	15011
WRF-Ber	-1,26	3,92	2,90	0,48	26	48	65	35	14574
COSMO-Ru13	-1,74	3,72	2,73	0,44	28	51	67	33	21424
COSMO-Ru7	-1,42	3,48	2,54	0,41	31	55	70	30	22280
COSMO-Ru2,2Y	-0,88	2,92	2,19	0,34	33	58	75	25	20406
aUNJ	-0,02	2,24	1,73	0,28	39	66	84	16	22440

Таблица 15

Оценки прогнозов приземной температуры (°C) на 24 ч
по территории Северного Кавказа за период октябрь–апрель 2014–2016 гг.

Модель	BIAS	RMS	ABS	OTNO	%≤1	%≤2	%≤3	%>3	N
UKMO	-0,58	3,45	2,51	0,88	31	54	71	29	22349
NCEP	-0,71	3,27	2,42	0,85	31	55	71	29	22265
DWD	-0,06	2,86	2,15	0,75	34	59	75	25	22138
JAPA	-1,31	3,40	2,69	0,94	24	46	64	36	22326
T339	-4,16	6,00	4,72	1,64	14	27	39	61	17399
PLAV	-0,36	3,24	2,55	0,89	26	49	67	33	22282
PLAV20	0,05	4,27	3,19	1,11	24	44	60	40	22116
Regi	0,57	4,33	3,38	1,18	21	39	54	46	22326
WRF-Ryb	-0,14	3,13	2,36	0,82	30	55	71	29	14873
WRF-Ber	0,20	3,23	2,44	0,84	30	53	70	30	14041
COSMO-Ru13	0,05	3,19	2,41	0,84	31	54	70	30	21420
COSMO-Ru7	0,21	3,03	2,27	0,79	32	56	73	27	22216
COSMO-Ru2,2Y	0,84	2,73	2,09	0,73	34	59	76	24	20208
aUNJ	0,04	2,21	1,70	0,60	39	67	85	15	22370

Таблица 16

Оценки прогнозов приземной температуры (°C) на 12 ч
по территории Северного Кавказа за период май–сентябрь 2015–2016 гг.

Модель	BIAS	RMS	ABS	OTNO	%≤1	%≤2	%≤3	%>3	N
UKMO	-1,68	3,93	3,02	0,36	21	41	61	39	17578
NCEP	-1,28	3,56	2,71	0,33	26	48	65	35	17578
DWD	-1,37	3,58	2,59	0,31	30	54	69	31	17584
JAPA	-2,50	4,60	3,78	0,45	14	28	43	57	17362
T339	-4,33	6,23	5,10	0,62	11	21	33	67	16474
PLAV	-0,90	3,75	2,84	0,34	25	46	63	37	17584
PLAV20	-1,76	4,90	3,78	0,45	17	33	49	51	17584
Regi	-1,21	5,06	3,88	0,47	18	35	51	49	17584
WRF-Ryb	-1,99	3,91	2,95	0,36	23	44	63	37	14131
WRF-Ber	-2,23	4,03	3,07	0,37	20	41	61	39	13828
COSMO-Ru13	-1,65	3,82	2,77	0,33	28	51	67	33	17235
COSMO-Ru7	-1,28	3,61	2,56	0,31	30	55	71	29	17471
COSMO-Ru2,2Y	0,48	3,16	2,29	0,27	30	56	74	26	16221
aUNJ	0,02	2,03	1,42	0,17	49	77	91	9	17541

Таблица 17

Оценки прогнозов приземной температуры (°C) на 24 ч
по территории Северного Кавказа за период май–сентябрь 2015–2016 гг.

Модель	BIAS	RMS	ABS	OTNO	%≤1	%≤2	%≤3	%>3	N
UKMO	-0,23	3,01	2,15	1,21	34	59	76	24	17580
NCEP	-1,90	3,43	2,60	1,46	27	49	66	34	17580
DWD	0,32	2,69	2,00	1,12	34	60	78	22	17586
JAPA	-1,19	3,15	2,46	1,39	26	48	67	33	17364
T339	-3,16	5,07	3,90	2,18	18	34	48	52	16477
PLAV	0,66	3,02	2,26	1,27	31	55	72	28	17586
PLAV20	0,79	4,35	3,19	1,79	25	45	60	40	17586
Regi	1,30	4,71	3,70	2,07	18	34	49	51	17586
WRF-Ryb	-0,65	2,73	1,95	1,13	36	63	80	20	14086
WRF-Ber	-0,41	2,71	1,93	1,10	36	63	80	20	13583
COSMO-Ru13	0,04	2,96	2,21	1,24	32	56	74	26	17183
COSMO-Ru7	0,24	2,88	2,11	1,18	33	58	76	24	17472
COSMO-Ru2,2Y	1,45	3,02	2,28	1,28	30	53	72	28	16231
aUNJ	0,02	1,77	1,22	0,68	53	83	94	6	17552

Прогноз осадков на 18 ч для Северного Кавказа по модели COSMO-Ru 2,2 км оказался лучше всех других прогнозов как в холодный, так и в теплый периоды (табл. 18, 19). Оценка прогнозов сильных осадков и порывов ветра для этой территории не проводилась.

Таблица 18

**Оценки прогнозов осадков на 18 ч ВСВ (мм/12ч)
по территории Северного Кавказа за период октябрь–апрель 2014–2016 гг.**

Модель	Un	ETS	PIR	BIAS	ABS	GORD	N
UKMO	76	0,28	0,53	0,58	1,61	0,477	22466
NCEP	78	0,31	0,54	0,03	1,48	0,440	22320
DWD	79	0,31	0,55	0,12	1,40	0,419	22252
JAPA	78	0,31	0,54	−0,24	1,46	0,456	22452
T339	69	0,20	0,37	3,82	5,04	0,934	17613
PLAV	79	0,31	0,52	−0,23	1,40	0,426	22522
PLAV20	75	0,24	0,45	−0,13	1,56	0,506	22294
Regi	74	0,20	0,38	−0,25	1,79	0,569	22510
WRF-Ryb	81	0,36	0,56	−0,18	1,41	0,396	14823
WRF-Ber	78	0,33	0,54	0,78	2,10	0,504	14015
COSMO-Ru13	82	0,38	0,59	0,06	1,37	0,373	21304
COSMO-Ru7	83	0,40	0,60	−0,05	1,32	0,352	22339
COSMO-Ru2,2	84	0,40	0,59	−0,16	1,27	0,341	20207
aUNJ	84	0,41	0,62	−0,37	1,14	0,311	22624

Таблица 19

**Оценки прогнозов осадков на 18 ч ВСВ (мм/12ч)
по территории Северного Кавказа за период май–сентябрь 2015–2016 гг.**

Модель	Un	ETS	PIR	BIAS	ABS	GORD	N
UKMO	61	0,15	0,38	2,14	3,48	0,955	17572
NCEP	64	0,17	0,39	1,47	3,23	0,912	17566
DWD	72	0,23	0,49	0,20	2,12	0,633	17572
JAPA	61	0,13	0,34	1,02	2,87	0,932	17341
T339	69	0,19	0,35	5,78	7,76	1,173	16477
PLAV	62	0,15	0,36	0,47	2,48	0,848	17566
PLAV20	61	0,13	0,34	0,65	2,73	0,897	17566
Regi	78	0,21	0,35	−0,96	1,90	0,544	17451

Таблица 19 (окончание)

Модель	Un	ETS	PIR	BIAS	ABS	GORD	N
WRF-Ryb	65	0,19	0,42	1,04	2,95	0,855	13870
WRF-Ber	66	0,19	0,44	1,20	2,93	0,835	13510
COSMO-Ru13	73	0,24	0,47	0,44	2,41	0,655	17164
COSMO-Ru7	77	0,28	0,51	0,06	2,15	0,578	17452
COSMO-Ru2,2	81	0,32	0,46	-0,41	2,13	0,515	15969
aUNJ	72	0,28	0,54	1,13	2,77	0.701	17566

4. Решение ЦМКП

ЦМКП Росгидромета в своем решении от 15.12.2016 г. [7] рекомендовала следующее:

– внедрить в оперативную практику по территории Московской области и ЦФО прогнозы осадков и скорости ветра по модели COSMO-Ru 2,2 км как дополняющие и детализирующие основной метод прогноза по модели COSMO-Ru 7 км;

– использовать прогнозы COSMO-Ru 2,2 км (температура, ветер, осадки) по территории Северного Кавказа в оперативной практике в качестве основного численного метода краткосрочного прогноза погоды;

– разработчикам продолжить работу по развитию модели COSMO-Ru 2,2 км с учетом возможностей нового высокопроизводительного вычислительного комплекса.

Благодарности

Работа выполнена благодаря неоценимой помощи большого количества сотрудников ФГБУ «Гидрометцентр России», Главного вычислительного центра Росгидромета, СибНИГМИ, кафедры метеорологии и гидрологии географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова и коллегам из консорциума COSMO. Всем им выражаем нашу искреннюю благодарность и признательность.

Список литературы

1. *Багров А.Н.* Сравнительная оценка прогнозов сильных летних осадков моделей атмосферы различного масштаба // Информационный сборник № 41. Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2014. – С. 63–73.

2. *Багров А.Н., Быков Ф.Л., Гордин В.А.* Комплексный прогноз приземных метеорологических величин // Метеорология и гидрология. – 2014. – № 5. – С. 5–16.

3. *Переходцева Э.В.* О гидродинамико-статистическом прогнозе до двух суток явлений сильного ветра и сильных осадков на территории Северного Кавказа // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 347. – С. 113–125.

4. РД 52.27.724-2009. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. – М.; Обнинск: «ИГ–СОЦИН», 2009. – 50 с.

5. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 150 с.

6. Решение Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета от 13 апреля 2011 г. Раздел «Решения ЦМКП» сайта Методического кабинета Гидрометцентра России. – <http://method.hydromet.ru/>.

7. Решение Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам от 15 декабря 2016 г. Раздел «Решения ЦМКП» сайта Методического кабинета Гидрометцентра России. – <http://method.hydromet.ru/>.

8. *Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд П.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.

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

10. Сайт консорциума COSMO с документацией модели COSMO: <http://cosmo-model.org/content/model/documentation/core/default.htm>.

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

12. Сайт Методического кабинета ФГБУ «Гидрометцентр России»: <http://method.meteorf.ru/>.

13. *Baldauf M., Seifert A., Forstner J., Majewski D., Raschendorfer M., Reinhardt T.* Operational convective-scale numerical weather prediction with the COSMO model: description and sensitivities // Mon. Wea. Rev. – 2011. – Vol. 139. – P. 3887–3905.

14. *Stappeler J., Doms G., Schaettler U., Bitzer H.-W., Gassmann A., Damrath U., Gregoric G.* Meso-gamma scale forecasts using the nonhydrostatic model LM // Meteorol. Atmos. Phys. – 2003. – Vol. 82. – P. 75–96.

15. *Zangl G., Reinert D., Ripodas P., Baldauf M.* The ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) modeling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core // Q. J. R. Meteorol. Soc. – 2015. – Vol. 14. – P. 563–579.