

УДК 551.509.5

СИСТЕМА КРАТКОСРОЧНОГО НЕГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА ПОГОДЫ COSMO-RU: ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЛИНИЯ

Д.В. Блинов, Г.С. Ривин

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва
denisblinov@ya.ru, gdaly.rivin@mail.ru*

Изложены технологические аспекты функционирования оперативной системы краткосрочного прогноза погоды COSMO-Ru в Гидрометцентре России на основе мезомасштабной негидростатической модели COSMO. Описаны необходимые ресурсы и инструменты (вычислительные кластеры, программное обеспечение, входные данные). Рассматриваются используемые конфигурации модели COSMO, схема оперативной работы, отдельно описаны процедуры программного комплекса: подготовка входных данных (препроцессинг), вычисления по модели, подготовка результатов счета для пользователей (постпроцессинг), доставка продукции, архивирование.

Ключевые слова: краткосрочный численный прогноз погоды, технология оперативного прогноза, подготовка начальных данных, постпроцессинг, COSMO, мезомасштабное моделирование.

Введение

Необходимость в большей детализации гидродинамических прогнозов по-прежнему остается актуальнейшей задачей для метеослужб. В последние десятилетия такая потребность привела к активному внедрению в оперативную и исследовательскую практику мезомасштабных моделей атмосферы. Этот процесс развивается в двух направлениях. Во-первых, в глобальных моделях постепенно уменьшается горизонтальный шаг сетки, что приводит к возможности предсказания большего количества мезомасштабных явлений. Во-вторых, все больше метеослужб используют модели атмосферы для ограниченной территории (региональные модели).

Глобальная модель атмосферы требует наличия глобальной системы усвоения данных и проведения расчетов по всему земному шару, что расходует большое количество ресурсов. Такой высокий порог требований привел к тому, что только ведущие центры прогноза погоды способны оперативно выпускать прогнозы глобального моделирования. Таких центров сейчас насчитывается не более двух десятков.

Региональная гидродинамическая модель в отличие от глобальной воспроизводит метеорологические процессы только на ограниченной

области Земли. Необходимые боковые граничные условия при таком подходе можно получить из прогнозов по более «грубой» вычислительной сетке, например по данным глобальной модели. Использование мелкой сетки приводит к количественным и качественным изменениям при моделировании описываемых процессов. Во-первых, мелкая сетка детальнее описывает моделируемые процессы, т. е. поля становятся менее гладкими. Во-вторых, при уменьшении сетки начинают воспроизводиться мелкомасштабные явления, которые «проваливаются» при более грубой вычислительной сетке. Таким образом, назначение региональных моделей не только в большей детализации, но и в предсказании опасных явлений и различных экстремумов, локализованных во времени и пространстве, которые можно воспроизвести только с помощью мелкой сетки.

Поэтому при наличии данных глобального моделирования большинство метеослужб предпочитают использовать региональную модель, которая позволяет сфокусировать вычислительные и людские ресурсы на необходимых участках пространства и времени. Эти достоинства привели к широкому использованию региональных моделей во многих службах погоды и исследовательских центрах.

Развитие гидродинамических моделей и сопутствующих технологий является сложнейшей и трудоемкой задачей. Но количество пользователей региональных моделей превышает количество пользователей глобальных моделей на порядок, поэтому разработка, эксплуатация и поддержка ведется объединениями метеослужб и исследовательских центров. В Европе сложилось несколько консорциумов по мезомасштабному моделированию, которые объединяют разработчиков и пользователей со всего мира [9].

В 2009 году Росгидромет стал полноправным участником европейского метеорологического консорциума по мезомасштабному моделированию COSMO (<http://www.cosmo-model.org>). Одной из целей этого объединения является развитие одноименной модели численного прогноза погоды высокого разрешения [13]. Членство в консорциуме дает права, возможности и обязанности. Во-первых, предоставляется лицензия COSMO на право пользования кодами модели COSMO и сопутствующего программного обеспечения. Во-вторых, участникам консорциума предоставляются данные глобальной модели Немецкой службы погоды (DWD), необходимые для начальных и граничных условий. В-третьих, ко всем предоставляемым ресурсам предоставляется пользовательская поддержка. В свою очередь от членов консорциума требуется вклад в разработку и совершенствование методов мезомасштабного моделирования, которое выражается в участии в рабочих группах и проектах консорциума.

С 2009 года в лаборатории численных прогнозов погоды по ограниченной территории (ЧППОТ) ФГБУ «Гидрометцентра России»

и активном участии других подразделений Росгидромета проводится разработка и внедрение системы краткосрочного прогноза погоды на основе негидростатической мезомасштабной модели COSMO, получившей название COSMO-Ru. Конфигурация модели COSMO для территории России также носит название COSMO-Ru.

Технологическая линия (ТЛ) системы прогноза погоды состоит из следующих частей: процедуры подготовки начальных и граничных данных для модели (препроцессинг), счет прогноза погоды по модели (моделирование), обработка модельной продукции (постпроцессинг), распространение и архивирование продукции.

В статье описывается процесс построения и функционирования отдельных компонент программного комплекса технологической линии системы COSMO-Ru. В первой части сообщается о необходимых ресурсах, инструментах (входных данных, программном обеспечении), а затем освещается процесс настройки системы и схема ежедневной работы.

1. Ресурсы и инструментарий

Для построения системы прогноза погоды на основе региональной гидродинамической модели необходимы следующие ресурсы: вычислительный кластер с соответствующей инфраструктурой и каналами связи, прогнозы глобальной модели атмосферы для задания начальных и боковых граничных условий, исходные коды региональной модели с вспомогательными данными и программным обеспечением. Кроме того, для функционирования такой системы необходимы специалисты, в первую очередь по вычислительной технике и численному моделированию.

Для оперативного использования COSMO необходимо иметь лицензию пользователя или быть участником консорциума. Наличие лицензии подразумевает предоставление программного обеспечения (коды модели и сопутствующих продуктов), данных глобальной модели для начальных и граничных условий и поддержку пользователя.

Модель COSMO для исследовательских задач распространяется свободно, как климатическая версия, так и версия для численного прогноза погоды. Данные глобальной модели в этом случае поставляются с задержкой в 24 часа.

1.1. Вычислительные системы

Вычислительные средства, каналы связи и место хранения предоставляет Главный вычислительный центр Росгидромета (ГВЦ Росгидромета). В 2009 году в Росгидромете появился вычислительный кластер SGI ALTIX 4700, что позволило проводить регулярный счет модели COSMO. За прошедшие семь лет система COSMO-Ru была установлена

на трех различных вычислительных кластерах (см. табл. 1) (<http://www.mcc.meteorf.ru/>).

Серверы и кластеры работают под управлением операционной системы Linux Suse, а для управления системой очередей используется пакет PBS Pro. Характеристики вычислительных систем представлены в табл. 1.

Таблица 1. Конфигурация вычислительных систем ГВЦ Росгидромета

Характеристики	SGI ALTIX 4700	RSC Tornado	SGI ICE-X
Количество ядер / узлов	1664 / 14	1536 / 96	720 / 36
Пиковая производительность	11 Tflops	35 Tflops	14 Tflops
Оперативная память	4 ГБ на ядро	4 ГБ на ядро	3,2 ГБ на ядро
Дисковая система	55 TB		
Планировщик задач	PBS Pro		
Компиляторы C, Fortran	Intel	Intel, GNU	
Пакет MPI	SGI	Intel, openMPI	Intel, SGI
Оперативный счет COSMO	с сентября 2009 по октябрь 2013	с января 2012 по апрель 2014	с января 2014 по настоящее время

1.2. Программное обеспечение

Каждый этап ТЛ требует использования соответствующего программного обеспечения (ПО). Характер решаемых задач и список сопутствующих бинарных файлов перечислены в табл. 2.

Исходные коды приложений `int2lm`, `cmrparbin`, `fieldextra` и библиотеки `libgrib1` получены от консорциума, т. е. требуют лицензии COSMO. Остальные пакеты распространяются свободно.

Часть этих пакетов собрана ГВЦ Росгидромета, часть из них доступна в виде готовых сборок в интернете (`GrADS`, `NCL` и `WGRIB`), но большую часть пришлось собирать самостоятельно. Одна из причин необходимости самостоятельной сборки связана с тем, что программы, использующие модули языка FORTRAN, жалуются на несовместимость компиляторов, если соответствующий модуль собран другим компилятором. Другая причина заключается в необходимости использования более новых версий программного обеспечения или требуется комплект ПО с дополнительными опциями и возможностями.

Самостоятельная сборка программного обеспечения требует понимания принципов автоматической сборки приложений через `Makefile` и `autoconfig`. При сборке приложений использовался рекомендуемый ГВЦ компилятор Intel.

Таблица 2. Список программного обеспечения для технологической линии COSMO-Ru

Категории программного обеспечения	Пакет	Описание
Библиотеки для сжатия	jasper, zlib	Пакет jasper используется для сжатия в коде GRIB2. Необходим для сборки GRIB_API.
Кодирование и декодирование метеорологических форматов	netcdf	Пакет для работы с данными в коде NetCDF.
	libgrib1	Библиотека Немецкой службы погоды для чтения и записи полей в формате GRIB1. Сейчас большая часть функций этой библиотеки продублирована функциями записи и чтения библиотеки grib_api, за исключением функций записи в grib1. Поставляется совместно с COSMO.
	grib_api	Пакет Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды для работы с файлами в коде GRIB. Зависимости: jasper.
	hdf5	Пакет HDF-Group. Зависимости: zlib
	bufrlib	Библиотека для записи данных в формат BUFR
Утилита препроцессинга	int2lm	Программа подготовки начальных и граничных данных для COSMO. Интерполирует данные с материнской сетки на повернутую сетку COSMO. Зависимости: netcdf, grib1, grib_api, mpi.
Гидродинамическая модель атмосферы	cmpabin	Модель COSMO. Зависимости: netcdf, grib1, grib_api, mpi.
Утилиты постпроцессинга и визуализации	fieldextra	Официальная утилита консорциума COSMO для постпроцессинга модельных данных. Разработана Швейцарской службой погоды (MeteoSwiss), распространяется свободно для членов консорциума. Зависимости: Netcdf, grib1, grib_api, jasper.
	wgrib, wgrib2	Простые утилиты для работы с данными в коде GRIB. По возможностям существенно уступает набору утилит из GRIB_API.
	GrADS	Графический пакет для визуализации данных в формате GRIB, NetCDF, HDF5, binary.
	NCL	Универсальный инструмент для визуализации и обработки данных.
Утилиты для конвертации данных	remdb2data	Утилита для чтения и записи данных из БД Гидрометцентра России [11]. Создано в лаборатории ЧППОТ. Зависимости: remdb, NetCDF, bufrlib.
	txt2netcdf	Утилита для записи наблюдений в формат NetCDF из текстовых файлов. Создано в лаборатории ЧППОТ. Зависимости: NetCDF.
	data2grib	Утилита для записи различных данных в формат GRIB. Используется для конвертации радарных данных из hdf5 в grib. Создано в лаборатории ЧППОТ. Зависимости: NetCDF, hdf5, grib_api.

Метеорологические данные принято записывать в специальных форматах (GRIB, NetCDF, HDF5, BUFR). Поэтому большинство программных пакетов требуют наличия соответствующих библиотек и заголовочных файлов для кодирования и декодирования данных. По этой причине сборка этих библиотек осуществляется в первую очередь. В табл. 2 перечислены пакеты, позволяющие работать с этими данными. Большинство из них включает в себя библиотеки, заголовочные файлы, готовые утилиты для декодирования/кодирования, а также примеры исходных кодов для разработки приложений на языках Fortran, C и Python.

Сборка приложений `smrparbin` и `int2lm` осуществляется через утилиту `make`. Для этого необходимо адаптировать `Makefile` под соответствующую архитектуру кластера. Адаптация состоит в настройке файла `Forpts`, который является частью `Makefile`. В файле `Forpts` необходимо прописать используемые компиляторы, ключи, директивы компиляции, пути к используемым библиотекам. В поставляемом пакете ПО для COSMO содержатся примеры файлов `Forpts` для разных платформ (CRAY, IBM, NEC) и компиляторов (GNU, Intel, IBM, Cray, PGI, NEC). Для распараллеливания в модели COSMO используется технология MPI, что требует связывания с соответствующей библиотекой.

В дистрибутивах `int2lm` и `smrparbin` содержится документация, список изменений, а также примеры скриптов запуска для различных конфигураций (в первую очередь по входным данным и шагу сетки). Обновления – несколько раз в год. В консорциуме существует специальная рабочая группа WG6, участники которой осуществляют внесение изменений в коды модели, внедрение и тестирование новых версий, обучение и поддержку пользователей. Вследствие этого разработчики оперативно выходят на связь, а при необходимости выпускают «заплатки».

Для конвертации данных в требуемые форматы для оперативных задач в лаборатории ЧППОТ дополнительно подготовлены утилиты `remdb2data` [12], `txt2netcdf`, `data2grib`.

1.3. Входные данные

Необходимые входные данные по правилам консорциума предоставляет Немецкая служба погоды (DWD). Эти данные условно делятся по изменчивости во времени на «климатические» (неизменяемые, внешние) и «моделируемые» параметры.

Под «климатическими» (внешними) параметрами понимаются характеристики, которые изменяются только в зависимости от времени года или вообще остаются константами во времени. Такими полями являются данные об орографии, береговой линии, растительности, характеристики аэрозолей и почвы, типы подстилающей поверхности. Источником такой информации являются различные архивы данных [16].

Внешние параметры подготавливаются одновременно в DWD по запросу пользователя для выбранной области счета COSMO. Заметим, что для проведения корректной интерполяции внешние параметры также необходимы и о материнской модели. Для исследовательских задач можно воспользоваться сервисом web-pep (<http://www.clm-community.eu>), который позволяет самостоятельно выбрать необходимую область счета и сгенерировать внешние параметры для выбранной территории.

Под «моделируемыми» понимаются характеристики атмосферы, деятельного слоя почвы и подстилающей поверхности, которые изменяются со временем. Такими характеристиками служат данные из прогнозов материнской модели, необходимые для граничных и начальных условий.

Немецкая служба погоды ежедневно четыре раза в сутки присылает данные прогнозов глобальной модели ICON [18] заблаговременностью до 174 часов для сроков 00 и 12 часов, 78 часов – для сроков наблюдения 06 и 18 ч ВСВ. Для экономии трафика DWD предоставляет данные не по всему земному шару, а только для той территории, для которой планируется моделирование, под которую заранее были выбраны внешние параметры. Эти данные поступают с дискретностью 3 часа по мере готовности каждой заблаговременности (т. е. не дожидаясь окончания счета модели ICON) на ftp-сервер ГВЦ Росгидромета. По мере поступления каждого файла ГВЦ копирует эти данные на файловую систему вычислителя. В штатном режиме процесс поступления файлов занимает 70–100 минут для сроков 00 и 12 ч, 30–40 минут для сроков 06 и 18 ч ВСВ.

Ежедневно (по состоянию на июнь 2017 г.) поступает около 70 ГБ информации за 4 срока. В случае сбоев или задержек в поступлении данных на стороне DWD, на специальный адрес электронной почты приходят оповещения. За 7 лет горизонтальный шаг предоставляемых данных глобальной модели уменьшился с 40 до 13 км, а заблаговременность прогнозов увеличилась с 78 (48) до 174 (78) часов.

2. Цикл оперативной работы

После того как получены все необходимые данные, собраны приложения и настроен вычислитель, задача может считаться регулярно. Для этого настраиваются управляющие скрипты (сценарии запуска) в оболочке *bash*, которые в свою очередь запускаются по расписанию службой *cron*. Управляющие скрипты запускают необходимые приложения и задают настройки, которые передаются через аргументы командной строки и неймлисты языка Fortran. Такими настройками в первую очередь являются даты и каталоги. Предполагается, что конфигурация сеток была настроена на этапе подготовки внешних пара-

метров. Все часто используемые и повторяемые операции, разработанные для системы COSMO-Ru, собраны в виде функций оболочки `bash` в файле `func4cosmo.sh`.

Технологическая линия COSMO-Ru запускается службой `cron` ежедневно 4 раза в сутки. Время старта связано со временем начала поступления данных глобальной модели из DWD. В свою очередь, DWD начинает присылать данные спустя 2 часа 35 минут после момента наблюдений.

Поскольку процесс поступления растянут по времени, к тому же иногда происходят сбои в трансфере данных, также используется система ожидания файлов. Она состоит из проверки на наличие файла средствами `bash`, а из встроенной системы ожидания файлов – в программах `int2lm` и `ctmparbin`. В результате при наличии доступных вычислительных ресурсов все вычислительные задачи могут выполняться параллельно и одновременно.

В процессе своей работы система выполняет следующие задачи:

- получение данных глобальной модели ICON (получение, распаковка прогнозов глобальной модели);
- интерполяция данных глобальной (материнской) модели на необходимую сетку модели COSMO;
- счет по модели;
- обработка результатов счета для последующего использования (визуализация, переформатирование, вырезка и т. д.);
- рассылка продукции пользователям;
- архивация/удаление данных.

На рис. 1 представлена схема полной цепочки технологической линии COSMO для 7 км. Для остальных конфигураций модели COSMO схема аналогична, различия могут быть только в начальных данных или в отсутствии некоторых блоков.

Стоит заметить, что технологическая линия распределена между двумя пользователями. Задача подготовки данных и моделирование осуществляется пользователем `oregcosmo`, а последующие операции обработка данных, рассылки, хранения осуществляются пользователем `grivin`.

2.1. Подготовка входных данных (препроцессинг)

Препроцессингом называют совокупность процедур, которые подготавливают входные данные для модели. Для подготовки граничных и начальных условий в конфигурации COSMO-Ru7 и COSMO-Ru13ENA используются данные глобальной модели атмосферы ICON (GME до 2015 г.), а для остальных конфигураций начальные данные подготавливаются из данных COSMO с более грубой сеткой: для конфигураций COSMO-Ru2 – данные COSMO-Ru7, для конфигурации COSMO-Ru1 –

данные для COSMO-Ru2 (рис.2). С конца 2014 г. для конфигурации COSMO-Ru7 начальные данные подготавливаются в системе усвоения данных DAS07 (см. ниже).

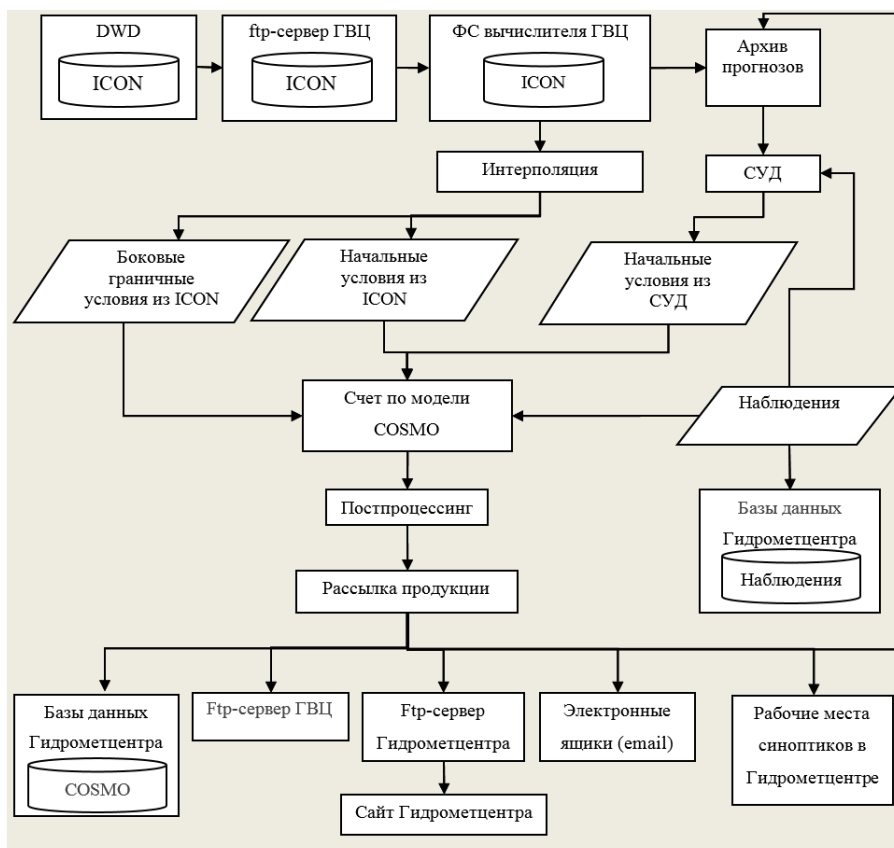
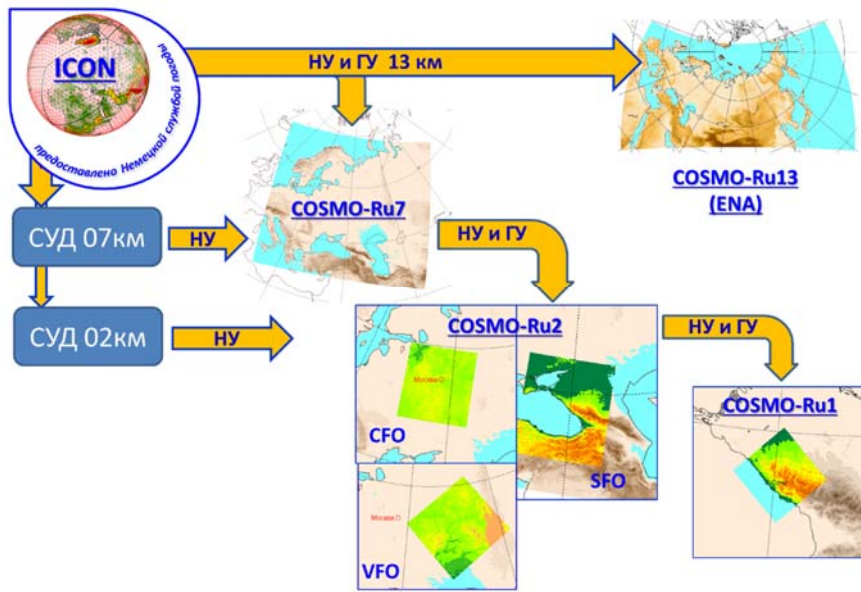


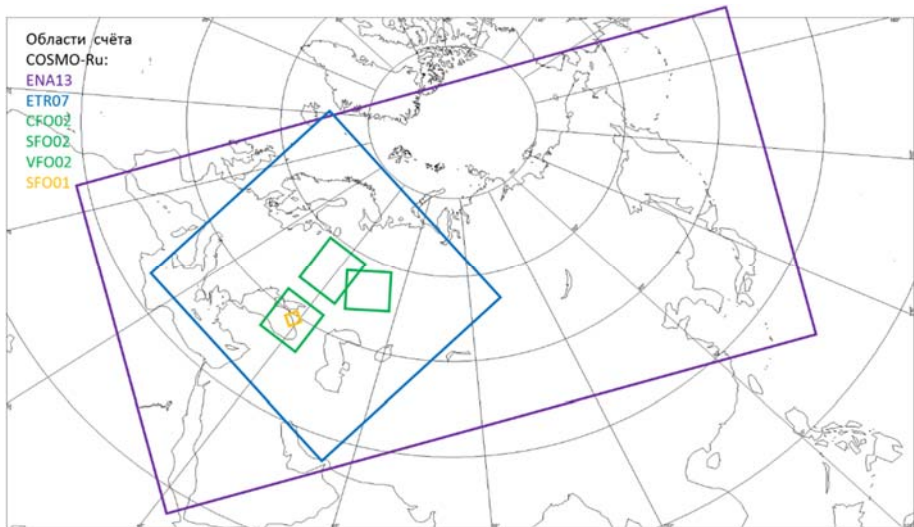
Рис. 1. Схема технологической цепочки выпуска численных прогнозов по системе COSMO-Ru7 (по состоянию на июнь 2017 г.).

Интерполяция

Приложение *int2lm* позволяет подготавливать начальные и граничные условия из выходных данных материнской модели (глобальной или региональной с более грубой сеткой). Для целей оперативного счета использовались выходные данные моделей GME [15], ICON [18], COSMO. Для исследований использовались данные реанализа ERA-Interim [6]. Настройки интерполяции прописываются в нейм-листе INPUT [16].



а)



б)

Рис. 2. Схема получения начальных и граничных условий для COSMO-Ru (а) и области счёта (б) по состоянию на июнь 2017 г. Фиолетовым изображены границы счёта ENA13, синим – ETR07, зеленым – области счёта с шагом 2 км, оранжевым – 1 км.

Работа системы усвоения

С 2015 г. начальные данные подготавливаются в системе усвоения данных DAS07. Для их подготовки необходимо поле первого приближения и данные наблюдений. В качестве поля первого приближения используются поля прогнозов COSMO на 3 или 6 часов. Для системы усвоения данные наблюдений предварительно конвертируются в требуемый формат NetCDF [17] (наблюдения из баз данных Гидрометцентра России с помощью утилиты `remdb2data`, текстовые данные профиломеров и автоматических метеорологических станций (АМС) с помощью утилиты `txt2netcdf`) и в формат GRIB1 (сеточные данные радаров об интенсивности осадков, получаемые из Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО), с помощью утилиты `data2grib`).

При наличии начальных данных, подготовленных двумя различными способами, для каждой группы данных необходимо выбирать требуемый источник. Например, поле льда для водной поверхности получается объединением интерполированных данных глобальной модели (для морей и океанов) и данных по озерам из системы усвоения DAS07.

Подробное описание работы системы усвоения будет дано в специальной статье.

2.2. Моделирование (этап численного моделирования)

В этой части ТЛ запускается программа `strparbin`, которая содержит совместные модели атмосферы и деятельного слоя подстилающей поверхности. Этот блок требует наибольшего количества вычислительных ресурсов, от того он и самый продолжительный по времени. Так же, как и интерполяция, модель запускается через систему очередей PBS. В табл. 3 указано время выполнения разных задач на вычислителе. В настоящее время COSMO-Ru считается для различных областей с шагом примерно 13, 7, 2, 1 км.

Все настройки счета осуществляются через неймлисты. Для подготовки неймлистов используется функция `printTemplate`, которая подставляет нужные переменные в заранее подготовленные шаблоны:

- `INPUT_ORG` – базовый неймлист, который задает область счета, даты, продолжительность счета и включенные модули;
- `INPUT_IO` – настройка и задание списков входной и выходной продукции, их дискретность и формат;
- `INPUT_DYN` – настройка динамического ядра модели;
- `INPUT_PHY` – настройка физических параметризаций модели;
- `INPUT_ASS` – настройка усвоения, верификации и путей к наблюдениям.

Время счета модели линейно зависит от четырех параметров: количества узлов по оси X (NX), Y (NY), количества вертикальных уровней (NZ), шага по времени (Δt).

Таблица 3. Характеристики областей интегрирования системы COSMO-Ru в июне 2017 г.

	13ENA	07_ETR	02_CFO	02_SFO	02_VFO	01Sochi
Начальные условия	ICON	ICON, DAS07	07_ETR, DAS02	07_ETR	07_ETR	02_SFO
Граничные условия	ICON	ICON	07_ETR	07_ETR	07_ETR	02_SFO
Шаг по времени в секундах	120	66	20	20	20	6
Шаг сетки по горизонтали	0,012° ~13,2 км	0,0625° ~7 км	0,02° ~2,2 км	0,02° ~2,2 км	0,02° ~2,2 км	0,01° ~1,1 км
Количество узлов X, Y	1000×500	700×620	420×470	420×470	470×450	420×470
Количество уровней	40	40	50	50	50	50
Срок ВСВ	00, 06, 12, 18 ч					
Заблаговременность прогноза в часах	99(78)	78(48)	42	42	42	36
Кластер	SGI ICE- X	SGI ICE- X	SGI ICE- X	SGI ICE- X	SGI ICE- X	SGI ICE- X
Количество ядер	200	360	400	400	200	480
Время счета в минутах	90 (70)	52 (32)	50	51	95	26
Готовность резуль- татов после срока наблюдения чч:мм	3:55 (3:35)	4:20 (4:30)	2:50	4:41	6:10	1:50

Выпускаемая метеорологическая продукция

В системе COSMO-Ru можно получить множество различных прогностических метеорологических величин в формате GRIB1, GRIB2, NetCDF, как трехмерных, так и двумерных. Большинство прогностической продукции в настоящее время выдается в коде GRIB1, часть в коде GRIB2. В одном файле может содержаться множество полей и вертикальных уровней, но только для одного момента времени

(заблаговременности). Соглашение по наименованию файлов заключается в следующем: первые две цифры после lfff – количество суток, прошедших от начального момента прогноза; вторая пара цифр – количество прошедших часов; третья и четвертая пара цифр – это, соответственно, минуты и секунды [17]. Данные для радарных характеристик выдаются через 10 минут, остальные поля с дискретностью 1 час.

Для удобства модельные поля, помимо заблаговременностей, разбиты на группы (см. табл. 4 и 5). Частичную расшифровку полей можно получить в [17]. Помимо сеточных полей, в коде GRIB прогнозы выдаются в виде текстовых метеограмм (таблиц с эволюцией полей во времени), а также печатается диагностическая информация [17].

Таблица 4. Группы выходной продукции модели COSMO-Ru

Название, [суффикс файла]	Описание
Short [s]	Набор наиболее востребованных двумерных полей. Большая часть из них используются для верификации приземных характеристик: давление на поверхности (PS) и уровне моря (PMSL); приземный ветер на 10м (U_10M и V_10M); максимально возможный порыв (VMAX_10M); максимально прогнозируемое значение ветра между сроками (VABSMX_10M); температура воздуха на 2 м (T_2M), подстилающей поверхности (T_G), подстилающей поверхности без снега (T_S), минимальная (TMIN_2M) и максимальная (TMAX_2M) за 6 часов; точка росы (TD_2M) и относительная влажность (RELHUM_2M); влажность подстилающей поверхности (QV_S); суммарная облачность (CLCT) и отдельно по ярусам (CLCH, CLCM, CLCL); высота нижней (HBASE_CON) и верхней (HTOP_CON) конвективной облачности; суммарные осадки (TOT_PREC) и отдельно по фазе и происхождению (RAIN_GSP, SNOW_GSP, RAIN_CON, SNOW_CON); высота (H_SNOW), водный эквивалент (W_SNOW) и температура поверхности снега (T_SNOW); высота нулевой изотермы (HZEROCL).
P-levels [p]	Метеорологические поля, интерполированные с модельных уровней на заданные изобарические поверхности: U, V, W, T, FI (геопотенциал), RELHUM.
Z-levels [z]	Метеорологические поля, интерполированные с модельных уровней на заданные значения высот над уровнем моря: U, V, T, FI, RELHUM
Severe weather [sw]	Показатели суровой погоды или опасных явлений: высота планетарного пограничного слоя (HPBL); доступная конвективная потенциальная энергия (CAPE_CON); Surface Lifted Index (SLI); Showalter Index (SI); нижняя граница облачности над уровнем моря (CEILING); нормализованная толщина облачности (CLDEPTH).

Radar reflectivity [dbz]	Дискретность - 10 минут. Используется для валидации с радарными данными. Поля отражаемости (DBZ_CMAX, DBZ_850); индекса гроз (LPI); осадков (TOT_PREC).
flux [radfl]	Альbedo поверхности (ALB_RAD); коротковолновая прямая (SWDIR_S), рассеянная нисходящая (SWDIFD_S) и восходящая (SWDIFU_S) коротковолновая радиация; солнечная радиация на ВГА (SOD_T); нисходящая (LWD_S) и восходящая (LWU_S) длинноволновая радиация; баланс коротковолновой радиации на поверхности (SOBS_RAD) и ВГА (SOBT_RAD); баланс длинноволновой радиации на поверхности (THBS_RAD) и ВГА (THBT_RAD); потоки явного (SHFL_S) и скрытого (LHFL_S) тепла; коэффициенты аэродинамического сопротивления для векторов (TCM) и скаляров (TCH)

Таблица 5. Группы выходной продукции модели COSMO-Ru, необходимые для входных данных к вложенным сеткам

Название, [суффикс файла]	Описание
Model []	Эта группа содержит все переменные, необходимые для счета модели, поля используются в качестве входных данных для COSMO с мелкой сеткой. Характеристики атмосферы на модельных уровнях: скорость (U, V, W); температура (T); характеристики влажности (QV, QC, QI, QR, QS), давление (P). Температура (T_SO) и влажность (W_SO) почвы; Характеристики снежного покрова (W_I, W_SNOW, FRESHSNW, RHO_SNOW). Характеристики ледяного покрова (T_ICE, H_ICE).
Constant [c]	Поля констант. Большая часть этих полей рассчитывается из внешних параметров: высота границ модельных уровней (HHL) и подстилающей поверхности (HSURF) над уровнем моря; приземный геопотенциал (FIS); параметр Кориолиса (FC); географическая долгота (RLON) и широта (RLAT) узлов; % суши в узле (FR_LAND); типы почвы (SOILTYP); содержание озона (VIO3 и HMO3); характеристики растительности (PLCOV, LAI, ROOTDP) и лесистости (FOR_E, FOR_D); % покрытия (FR_LAKE) и глубина (DEPTH_LK) озер; характеристики подсеточной орографии (SSO_STDH, SSO_GAMMA, SSO_THETA, SSO_SIGMA). Замечание: высоту модельных уровней (HFL) можно получить как среднее между двумя соседними границами (HHL).

2.3. Постпроцессинг

Постпроцессинг необходим для подготовки данных в нужном для потребителей виде. Особенностью COSMO является использование «повернутой» сетки, поэтому в постпроцессинге постоянно возникает задача предоставить модельные данные на привычной географической сетке. Такое преобразование проводится по соответствующим формулам (1) и (2) [14]. В случае векторных переменных (скорость) следует повернуть горизонтальные векторные переменные (компоненты ветра) с повернутой сетки на географическую (3) и (4). При этом может понадобиться перевести компоненты вектора с сетки С классификации Аракавы (разнесенной) на А-сетку Аракавы. Значения повернутой сетки можно получить из метаинформации полей в коде GRIB или NetCDF.

$$\varphi_{geogr} = \sin^{-1}(\cos \varphi_{geogr}^{NP} \cdot \cos \varphi_{rot} \cdot \cos \lambda_{rot} + \sin \varphi_{geogr}^{NP} \cdot \sin \varphi_{rot}); \quad (1)$$

$$\lambda_{geogr} = \tan^{-1} \left(\frac{\cos \varphi_{rot} \cdot \sin \lambda_{rot}}{\sin \varphi_{geogr}^{NP} \cdot \cos \varphi_{rot} \cdot \cos \lambda_{rot} - \sin \varphi_{rot} \cdot \cos \varphi_{geogr}^{NP}} + \varphi_{geogr}^{NP} \right); \quad (2)$$

$$u_{geogr} = \frac{u_{rot} * z_2}{\sqrt{z_1^2 + z_2^2}} + \frac{v_{rot} * z_1}{\sqrt{z_1^2 + z_2^2}}; \quad (3)$$

$$v_{geogr} = -\frac{u_{rot} * z_1}{\sqrt{z_1^2 + z_2^2}} + \frac{v_{rot} * z_2}{\sqrt{z_1^2 + z_2^2}}; \quad (4)$$

где

$$z_1 = \cos \varphi_{geogr}^{NP} \cdot \sin(\lambda_{geogr}^{NP} - \lambda_{geogr});$$

$$z_2 = \sin \varphi_{geogr}^{NP} \cdot \cos \varphi_{geogr} - \cos \varphi_{geogr}^{NP} \cdot \sin \varphi_{geogr} \cdot \cos(\lambda_{geogr}^{NP} - \lambda_{geogr});$$

$\varphi_{geogr}, \lambda_{geogr}$ – широта и долгота в географической системе координат;

$\varphi_{rot}, \lambda_{rot}$ – широта и долгота в повернутой системе координат COSMO;

$\varphi_{geogr}^{NP}, \lambda_{geogr}^{NP}$ – широта и долгота северного полюса повернутой системы на географической сетке.

Кроме того, координаты узлов в географической системе можно получить в файлах констант (табл. 5), а соответствие между повернутыми и географическими координатами – на сайте (<http://www.clm-community.eu>).

Обработка выходной продукции

Выходная продукция модели, как правило, нуждается в обработке и адаптации под нужды пользователя. Выделяется несколько этапов по степени сложности.

1. Выборка и вырезка полей в коде GRIB. Осуществляется через утилиты `grib_ari` и *Fieldextra*.
2. Интерполяция данных из сетки повернутой на широтно-долготную (*Fieldextra*).
3. Конвертация данных в NetCDF для графического пакета DIANA [4].
4. Выборка продукции для определенных станций (*Fieldextra*) и печать в текстовом виде.
5. Расчет дополнительных переменных (*Fieldextra*). К примеру, расчет высоты свежевыпавшего снега [7].
6. Статистическая коррекция (*Fieldextra*).

Визуализация данных

Конечным потребителям часто необходимы данные не в цифровом, а в графическом виде. Для этого была подготовлена подсистема пакетной визуализации, которая представляет результаты расчетов в виде карт, графических метеограмм, вертикальных профилей и диаграмм.

В первую очередь для визуализации используется пакет GrADS. Специально для русскоязычной аудитории был создан кириллический шрифт. В GrADS для интерполяции данных с повернутой сетки на географическую достаточно добавить строчку с описанием повернутой сетки (PDEF) и адаптировать область отображения на географическую сетку (XDEF, YDEF) (<http://cola.gmu.edu/grads/gadoc/>). Также можно «повернуть» векторные переменные на географическую сетку, задав ROTLLR в секции PDEF и перечислить эти переменные в секции VECTORPAIRS. Вот как выглядят эти строки в файле описания для COSMO-Ru7:

```
PDEF 700 620 ROTLLR -145.0 35.0 0.0625 0.0625 -19.0 -19.0
XDEF 1000 linear -20.000 0.125
YDEF 400 linear 30.000 0.125
VECTORPAIRS u,v
```

Большая часть программ визуализации описана в [2]. С тех пор был значительно расширен спектр выдаваемых полей, регионов, а также добавлены новые типы продукции. В 2012 году в дополнение к картам

и метеограммам для выбранных станций стали подготавливаться вертикальные профили для пяти прогностических переменных. Часть прогностических карт и метеограмм можно ежедневно просматривать на сайте Гидрометцентра России, (<http://www.meteoinfo.ru/cosmo-maps>) и (<http://www.meteoinfo.ru/-cosmo-ru>) соответственно. Стоит отметить, что карты для моделей с горизонтальным шагом 7 и 13 км выдаются с интервалом в 3 часа, а карты с шагами 2,2 и 1,1 км выдаются через каждый час. Для одного срока прогноза подготавливается несколько сотен карт, которые включают разные заблаговременности, поля и районы отображения.

В последнее время для исследовательских задач в лаборатории все чаще используется пакет NCL, поскольку он имеет больше возможностей. Пример в виде аэрологических диаграмм для COSMO можно посмотреть на сайтах (<http://swfdp-ca.meteoinfo.ru>, <http://asia.meteorf.ru>).

Причина использования пакета GrADS в оперативных задачах для визуализации состоит в компактности создаваемого рисунка за счет использования малой битности (8 бит на пиксель). Это отрицательно влияет на качество графики, но значительно уменьшает размер картинки, время визуализации и нагрузку на CPU. В версии GrADS 2.1 разработчиками была кардинально улучшена графика выдаваемой продукции.

Во-первых, для отображения шрифтов теперь используется библиотека `cairo`, во-вторых, увеличена битность картинки с 8 до 24 битов на пиксель (<http://cola.gmu.edu/grads/gadoc/>). Это привело к улучшению качества картинки, но в то же время и к увеличению времени рисования и размера результирующего графического файла в 2–8 раз.

Таким образом, NCL и новые версии GrADS позволяют создавать рисунки более высокого качества, но при этом требуют значительного увеличения используемых ресурсов. Такая требовательность к ресурсам препятствует переходу на новую графику для оперативных задач, поскольку подготовка сотен карт становится затруднительной.

Несмотря на большое количество подготовленных карт, далеко не вся графическая продукция выкладывается для широкой аудитории пользователей. В настоящее время только малая часть продукции предоставляется в публичный доступ и тем более не все области счета (только COSMO-Ru7).

Помимо растровых карт современным инструментом отображения являются ГИС с векторными полями. Это требует соответствующего сервера для визуализации, широкого канала связи, специалистов по работе с web и ГИС. Коллегами в СИБНИГМИ проведена такая работа по визуализации для выходной продукции COSMO (<http://sibnigmi.ru>), а также в Гидрометцентре России для продукции наукастинга (<http://www.meteoinfo.ru/cosmo-maps>).

2.4. Рассылка продукции

Вся подготовленная продукция находится на файловой системе вычислителя. Часть пользователей забирает информацию оттуда самостоятельно, но для большинства этот вариант не подходит из-за отсутствия доступа или неудобства. Поэтому ТЛ включает подсистему доставки продукции, которая рассылает готовые результаты пользователям.

В рамках технологической линии организована доставка продукции по трем каналам:

- *по ftp-протоколу* данные передаются по локальной сети различным пользователям преимущественно на ftp-серверы ГВЦ Росгидромета и Гидрометцентра России. Внешним пользователям (ГАМЦ, Авиаметтелком Росгидромета, Северо-Западное УГМС, НПО «Тайфун», ЦАО) продукция передается через ftp-сервер ГВЦ Росгидромета. Данные с ftp-сервера Гидрометцентра далее попадают на сайт meteinfo.ru.

- *по протоколу электронной почты* графические и табличные данные в виде упакованного zip-архива рассылаются пользователям на персональные электронные адреса. В силу своей простоты и доступности этот канал оказался чрезвычайно востребованным. Но он имеет существенное ограничение – размер вложения не может превышать 14 МБ.

- *по протоколу ssh* организована пересылка данных с вычислителя через ssh-клиент по локальной сети Гидрометцентра России на рабочие места синоптиков.

2.5. Хранение продукции

Вся необходимые данные результатов моделирования и постпроцессинга собираются в каталоге COSMO/OUTPUT пользователя grivin. Там они хранятся в течение недели, после чего данные перемещаются в архив того же пользователя. В архиве данные каждого вида имеют свой срок хранения, после истечения которого они будут удалены.

Хранение данных предназначено в первую очередь для задач верификации и проведения исследований для интересных эпизодов (case study).

Выделяется четыре типа продукции для хранения:

- Начальные данные и граничные условия. В первую очередь это данные глобальной модели GME/ICON, которые могут понадобиться для проведения экспериментов. Их необходимо хранить, поскольку они получены извне, а потому их сложно восстановить. Также хранятся начальные данные из цикла усвоения, требующие долгого разгона – озерные характеристики из Flake (lake+ice).

- Карты и метеограммы по важнейшим характеристикам.

- Прогнозы полей в GRIB1, пригодных для проведения оценок и для аналитики (см. табл. 3, группа short).
- Спаренные значения модель – наблюдения и статистика ошибок помесячно.

В Гидрометцентре России большинство пользователей используют информацию из внутренних баз данных (БД) [8]. Существуют БД прогнозов COSMO-Ru для областей с шагами сетки 13 км (CM13), 7 км (LMW7), 2 км (CMC2 и CMS2). Запись полей в БД осуществляет отдел систем информационного обеспечения (ОСИО). В базу записываются наиболее востребованные поля для подстилающей поверхности и на изобарических поверхностях, в табл. 4 и 5 эти поля выделены жирным шрифтом. Данные записываются на исходной повернутой сетке COSMO, поэтому пользователям этой продукции необходимо переводить координаты на географическую сетку и рассчитывать компоненты вектора скорости относительно географической сетки самостоятельно.

Заключение

Разработана автоматизированная технологическая линия системы COSMO-Ru, которая позволила на вычислительной технике Росгидромета внедрить в оперативную практику учреждений Росгидромета современную систему мезомасштабного негидростатического прогноза погоды.

После прохождения испытаний решением ЦМКП 13 апреля 2011 г. система COSMO-Ru с горизонтальным шагом сетки 7 км стала оперативной [11]. 15 декабря 2016 г. решением ЦМКП система COSMO-Ru2 для Центрального и Южного федеральных округов рекомендована для использования в оперативной практике [11].

Прогнозы системы COSMO-Ru использовались в качестве базовой информации для метеообеспечения на тестовых зимних соревнованиях в Сочи в 2011–2013 гг., на летней Универсиаде в Казани в 2013 г., зимней олимпиаде и паралимпиаде в Сочи в 2014 году [5].

Также на основе данной системы или при совместном развитии подготовлены система расчета ансамблевых мезометеорологических прогнозов [1] и система расчета примесей COSMO-Ru7-ART [3]. Прогнозы системы COSMO-Ru7 используются для входных данных химической транспортной модели CHIMERE [10].

Технология COSMO-Ru перенесена на вычислитель SGI ALTIX в Новосибирске и носит название COSMO-SIB (<http://sibnigmi.ru>).

Благодарности. В разработке технологической линии COSMO-Ru принимали участие сотрудники Гидрометцентра России и ГВЦ Росгидромета. Особую благодарность авторы выражают С.В. Лубову,

А.Ю. Недачиной, И.О. Жабиной, И.А. Розинкиной, А.Н. Багрову, Киктеву Д.Б., Смирнову А. В., U. Shattler (DWD), D. Majewski (DWD).

Поступила в редакцию 18.07.2017 г.

Список использованных источников

1. Алферов Д.Ю., Астахова Е.Д., Ривин Г.С., Розинкина И.А. Разработка системы ансамблевых прогнозов высокого разрешения для региона проведения зимних Олимпийских игр Сочи-2014 // Труды Гидрометцентра России. 2014. Вып. 352. С. 5-20.
2. 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. 47-54.
3. Вильфанд Р.М., Кирсанов А.А., Ревоткова А.П., Ривин Г.С., Суркова Г.В. Прогноз перемещения и трансформации загрязняющих веществ в атмосфере с помощью модели COSMO-ART // Метеорология и гидрология. 2017. № 5. С. 31-40.
4. Зарипов Р.Б. Система визуализации метеорологической информации DIANA. // Труды Гидрометцентра России. – 2014. – Вып. 352. – С. 55-73.
5. Киктев Д.Б., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Муравьев А.В., Ривин Г.С., Розинкина И.А., Смирнов А.В., Цырульников М.Д. Развитие прогностических технологий для метеорологического обеспечения зимней Олимпиады «Сочи-2014» // Метеорология и гидрология. 2013. № 10. С. 5-15.
6. Кислов А.В., Ривин Г.С., Платонов В.С., Варенцов М.И., Розинкина И.А., Никитин М.А., Чумаков М.М. Мезомасштабное моделирование экстремальных скоростей ветра (для акватории Охотского моря и острова Сахалин) // Известия РАН. ФАО, 2017 (в печати).
7. Казакова Е.В., Чумаков М.М., Розинкина И.А. Расчет высоты свежеснежного покрова с помощью результатов атмосферного моделирования (на примере COSMO-Ru) // Труды Гидрометцентра России. № 352. 2014. С. 74-84.
8. Пурина И.Э., Жабина И.И., Недачина А.Ю., Дегтярева Н.В., Маковская И.В. Развитие информационного обеспечения Гидрометцентра России на базе технологического комплекса PROMETEI // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада ЛТД, 2010. С. 423-434.
9. Ривин Г.С. Современные системы мезомасштабного прогноза погоды: состояние и перспективы // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада ЛТД, 2010. С. 82-93.
10. Шалыгина И.Ю., Нахаев М.И., Кузнецова И.Н., Березин Е.В., Коновалов И.Б., Блинов Д.В., Кирсанов А.А. Сравнение рассчитанных с помощью химических транспортных моделей приземных концентраций загрязняющих веществ с данными измерений в московском регионе // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30, № 1. С. 53-59.
11. Решения Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам на сайте Методического кабинета Гидрометцентра России <http://method.hydromet.ru> в разделе «Решения ЦМКП».
12. Удаленный доступ к базам данных Xeon4A и Xeon4B из программ на языке Фортран в ОС «Linux» и «Windows». Руководство пользователя. Москва. Гидрометцентр России, 2009.
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. Doms G., Baldauf M. A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model Part I: Dynamics and Numerics, Offenbach, May 2015. <http://www.cosmo-model.org>

15. Majewski D., Liermann D., Prohl P., Ritter B., Buchhold M., Hanisch T., Paul G., Wergen W. The operational global icosahedral-hexagonal gridpoint model GME: Description and high-resolution tests // Mon. Wea. Rev. 2002. Vol. 130. P. 319-338.

16. Shattler U., Blahak U. A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model Part V: Preprocessing: Initial and Boundary Data for the COSMO-Model, Offenbach, May 2015. <http://www.cosmo-model.org>.

17. Shattler U., Doms G., Schraff C. A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model Part VII: User's Guide, Offenbach, 2016. <http://www.cosmo-model.org>

18. 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. P. 563-579.

SUMMARIES

The short-term non-hydrostatic mesoscale weather forecast system COSMO-Ru: The technological line / Blinov D.V., Rivin G.S. // Proceedings of the Hydrometcentre of Russia. 2017. Vol. 365. P. 141-162.

The article describes the technological line of operational short-term weather forecast system COSMO-Ru at the Hydrometeorological Centre of Russia based on non-hydrostatic mesoscale model COSMO. The necessary resources and tools (computing clusters, software, input data) are described. The article presents used configurations of the COSMO model and the operational scheme. Procedures of the operational configuration are outlined separately: input data preparation (preprocessing), computing models, making the computation results ready for users (postprocessing), products distribution, archiving.

Keywords: system of weather forecasting, technological line, preprocessing, postprocessing, COSMO, mesoscale modeling.