

# МОДЕЛЬ С ВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ COSMO-RU1: ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ПАРАМЕТРОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

*М.В. Шатунова, Г.С. Ривин*

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации  
gbert@yandex.ru, Gdaly.Rivin@mail.ru*

## **Введение**

Согласно приоритетному проекту CORSO [5], для метеорологического обеспечения численными прогнозами Зимней Олимпиады Сочи-2014 предполагалось подготовить, исходя из вычислительных возможностей Росгидромета, оперативную версию модели COSMO-Ru2SFO [1–4] с шагом сетки 2,2 км и, в целях развития моделирования атмосферных процессов в регионах со сложной орографией, исследовательскую версию COSMO-Ru1SFO с шагом сетки 1,1 км с заблаговременностью не менее 24 часов.

Для реализации этого плана была создана система усвоения на основе метода подталкивания (nudging) и COSMO-Ru2SFO для подготовки боковых и начальных данных для работы как оперативной COSMO-Ru2SFO, так и исследовательской COSMO-Ru1SFO.

Для создания исследовательской версии COSMO-Ru1SFO необходимо было ознакомиться с опытом работы с однокилометровой версией модели COSMO, имеющимся в консорциуме, выбрать область интегрирования, подготовить для этой области файлы с описанием подстилающей поверхности (орографии, шероховатости, растительности, типов почвы), выяснить прогностические свойства модели для шага сетки 1 км с помощью вычислительных экспериментов.

Этот план удалось не только выполнить, но и перевыполнить, подготовив оперативный вариант версии COSMO-Ru1SFO с шагом сетки 1,1 км.

Это удалось сделать в сжатые сроки благодаря активному участию сотрудников Немецкой метеослужбы (D. Majewski, J. Helmert) в подготовке файлов с необходимыми внешними данными и сотрудников Швейцарской метеослужбы (P.Steiner, M.Arpagaus, G. de Morsier), поделившихся опытом подготовки версии COSMO с шагом 1,1 км для территории Швейцарии.

Модель COSMO-Ru1 как версия модели COSMO-Ru представляет собой негидростатическую модель атмосферы для ограниченной территории, основанную на системе термогидродинамических уравнений, описывающих сжимаемый поток во влажной атмосфере. Ряд физических процессов, учитываемых в модели, представлен в виде параметризаций. Уравнения модели записаны в сферической системе координат со смещенным полюсом и орографической вертикальной координаты. Подробное описание системы приведено в документации модели COSMO [6]. В качестве начальных и граничных условий используются данные из версии модели с шагом 2,2 км для Южного федерального округа COSMO-Ru2SFO.

Модель была установлена на суперкомпьютере РСК «Торнадо» в Главном вычислительном центре Росгидромета с пиковой производительностью 35 Тфлопс. Общее количество ядер, выделенное для задачи, составляет 288.

На период проведения Олимпийских игр Сочи-2014 для оперативного обеспечения прогнозами модель COSMO-Ru1 была также установлена на суперкомпьютере ICE-X в Главном вычислительном центре Росгидромета. Расчеты производились с использованием 660 ядер. Время счета прогноза с заблаговременностью до 36 часов составляло 22–25 минут.

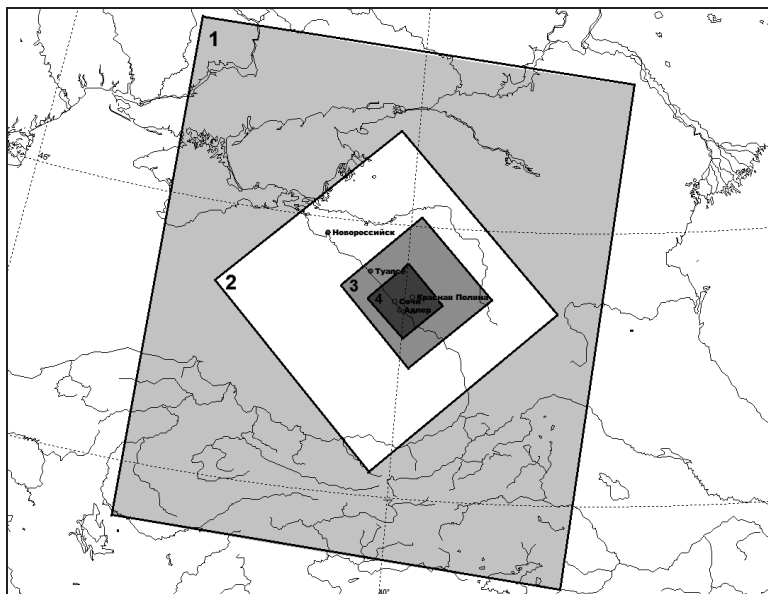
### **Определение расчетной области модели COSMO-Ru1**

Выбор оптимальной области интегрирования делался, исходя из соотношения качества прогноза и времени счета.

Первоначально было выбрано три варианта области со следующими параметрами сетки:

- а)  $100 \times 100$  узлов, шаг сетки  $0,01^\circ$ , 50 уровней по вертикали;
- б)  $200 \times 200$  узлов, шаг сетки  $0,01^\circ$ , 50 уровней по вертикали;
- в)  $450 \times 450$  узлов, шаг сетки  $0,01^\circ$ , 50 уровней по вертикали.

Положение расчетных областей модели COSMO-Ru1 и модели COSMO-Ru2 для Южного федерального округа приведено на рис. 1.



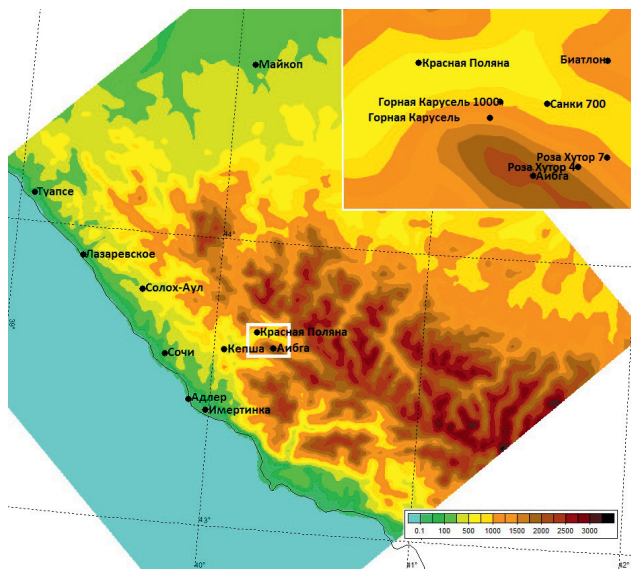
**Рис. 1. Расчетные области моделей COSMO-Ru2 (1) и COSMO-Ru1: область  $450 \times 450$  (2), область  $200 \times 200$  (3), область  $100 \times 100$  (4).**

В представленных ниже результатах приняты следующие обозначения: COSMO-Ru1 (200) – модель COSMO-Ru1, реализованная на расчетной области  $200 \times 200$  узлов, COSMO-Ru1 (450) – модель COSMO-Ru1, реализованная на расчетной области  $450 \times 450$  узлов.

Эксперименты проводились на РСК «Торнадо» с использованием 288 ядер. Время счета прогноза с заблаговременностью до 24 ч, при шаге по времени 10 с, составило для области  $100 \times 100$  узлов около 7,5 мин; для области  $200 \times 200$  узлов – 15,5 мин; для области  $450 \times 450$  узлов – 54 мин.

Результаты расчетов на сетке  $100 \times 100$  не приводятся, так как в ходе экспериментов стало очевидно, что соотношение затрат машинного времени и размеров области интегрирования оказывается в пользу варианта с сеткой  $200 \times 200$ , т.к. при увеличении области интегрирования в 4 раза время счета увеличивается вдвое.

Для удобства понимания нижеследующего изложения на рис. 2 показана модельная орография для расчетной области  $200 \times 200$  и расположение гидрометеорологических станций (ГМС) и автоматических метеостанциях (АМС), данные которых были использованы для оценок качества прогноза.

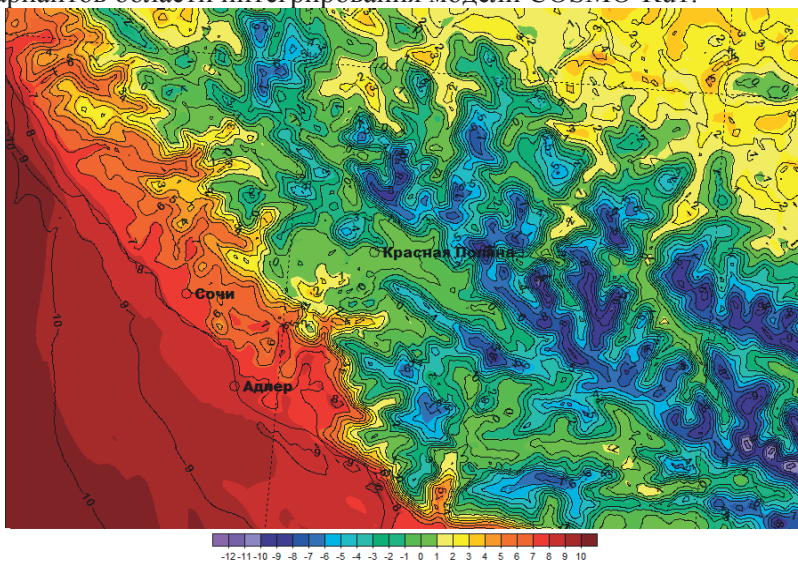


**Рис. 2. Орография и расположение ГМС и АМС в пределах области интегрирования модели COSMO-Ru1.**

Как видно из рис. 2, часть станций находится в прибрежной зоне (Туапсе, Лазаревское, Солох-Аул, Сочи, Адлер, Имертинка), часть в пределах долины реки Мзымта (Кепша, Красная Поляна, Санки-700), в том числе на склонах (Горная Карусель-1000, Горная Карусель-1500, Роза Хутор-7, Роза Хутор-4). ГМС Аибга расположена у вершины одноименной горы. ГМС Майкоп находится на Прикубанской наклонной равнине.

Для оценки влияния размера области интегрирования на результаты было проведено сравнение прогнозов приземной температуры и количества осадков, полученных для двух вариантов области, как между собой, так и с данными наблюдений и с результатами расчетов по модели COSMO-Ru2 для Южного федерального округа.

На рис. 3 представлены поля приземной температуры воздуха в прогнозе на 12 ч от 13.01.2013, 00 ВСВ, полученные для двух вариантов области интегрирования модели COSMO-Ru1.



**Рис. 3. Прогноз приземной температуры воздуха на 12 ч (по данным 13.01.2013, 00 ВСВ) для двух областей интегрирования 450×450 (изолинии, проведенные через 1°) и 200×200 (цветная заливка).**

Разница в пределах  $0,5-1^\circ$  отмечаются в прибрежной зоне, над акваторией Черного моря, а также в предгорьях Большого Кавказа (правый верхний угол на рис. 3). В остальных районах разность между прогнозами для двух вариантов не превышает  $0,5^\circ$ .

Детальный анализ температуры воздуха на уровне 2 м и на изобарических поверхностях (925, 850, 700 и 500 гПа) в прогнозах с различной заблаговременностью, показал, что разность в прогнозируемых величинах не превышает  $1^\circ$  для двух вариантов расчетной области. В качестве примера на рис. 4 приводится сравнение прогнозов приземной температуры воздуха от 13.01.2013, 00 ВСВ, полученных для двух вариантов области модели COSMO-Ru1 и модели COSMO-Ru2, с данными наблюдений для 4 станций. Результаты прогнозов приводятся для узла сетки, ближайшего к станции, без поправки на различие между высотой станции и ближайшим узлом модельной сетки.

Как видно из рис. 4, разность между величинами приземной температуры, полученными для двух вариантов расчетной области, не превышает  $0,5^\circ$ , за исключением прогноза на 18 ч для ГМС Красная Поляна ( $0,9^\circ$ ). Сравнивая результаты COSMO-Ru1 и COSMO-Ru2 с данными наблюдений, видим, что прогнозы по модели COSMO-Ru1 оказываются несколько лучше.

Перейдем к рассмотрению влияния изменения размера расчетной области на прогноз осадков. Были проведены численные эксперименты для двух случаев интенсивных осадков – 13.01.2013 г. и 24.09.2013 года.

В обоих случаях имели место фронтальные осадки, которые усиливались за счет вынужденной конвекции, так как перенос воздушных масс происходил в направлении с запада-юго-запада на северо-восток, т. е. с акватории Черного моря воздух натекал на Большой Кавказский хребет. Количество осадков 13.01.2013 г. составило от 21 мм (ГМС Сочи) до 42 мм (ГМС Солох-Аул) за 12 часов, а 24.09.2013 г. суточная сумма осадков, зафиксированных на ГМС и АМС региона, превысила 100 мм.

В табл. 1 приводится сравнение результатов расчетов по моделям COSMO-Ru1 и COSMO-Ru2 для отдельных пунктов с имеющимися данными наблюдений.

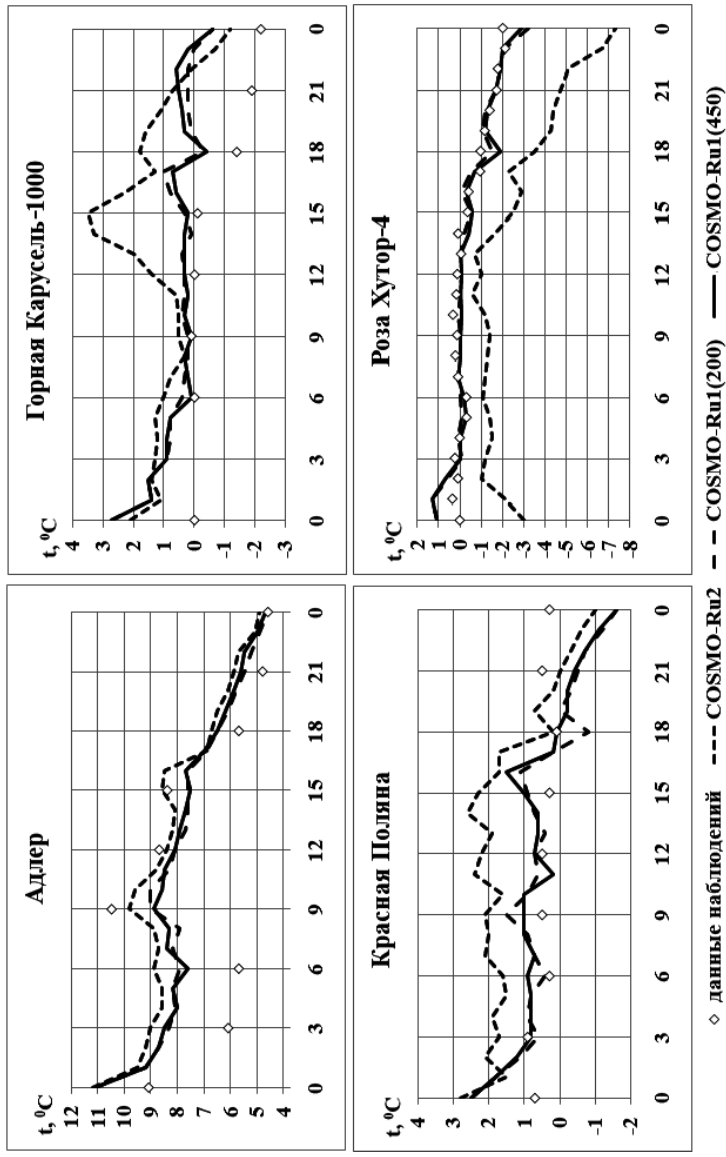


Рис. 4. Приземная температура воздуха по наблюдениям и прогнозам от 13.01.2013, 00 ВСВ.

Таблица 1

Сравнение с наблюдениями прогностических полусуточных и суточных сумм осадков (мм), полученных для двух вариантов расчетной области

Пункт наблюдений	Наблюдения	COSMO-Ru2	COSMO-Ru1 (450)	COSMO-Ru1 (200)
<b>13.01.2014 г.</b>				
Солох-Аул	42,0*	34,7*	52,0*	44,7*
Сочи	21,0*	19,0*	17,4*	20,5*
Красная Поляна	33,0*	21,9*	35,0*	37,8*
Горная Карусель-1000	37,0*	19,8*	22,9*	27,9*
Горная Карусель-1500	н.д.	18,9	22,9	27,3
Роза Хутор-4	39,8	40,6	38,8	44,7
Роза Хутор-7	38,7	28,7	35,6	40,7
<b>24.09.2014 г.</b>				
Солох-Аул	н.д.	80,8	73,5	65,8
Сочи	н.д.	61,7	86,3	53,9
Красная Поляна	114,8	138,1	129,5	131,5
Горная Карусель-1000	н.д.	122,3	126,7	103,0
Горная Карусель-1500	132,9	112,1	131,5	103,4
Роза Хутор-4	154,0	96,6	198,4	168,9
Роза Хутор-7	154,9	122,4	169,6	164,2

Примечание: \* сумма осадков за 12 часов;

н.д. – нет данных или данные наблюдений сомнительны.

Прогноз по модели COSMO-Ru1 оказался лучше, чем прогноз COSMO-Ru2. Однако ошибка прогноза суточных (полусуточных) сумм осадков по модели COSMO-Ru1 может быть значимой. Так, наибольшая разность между рассчитанными и наблюдаемыми значениями для случая 13.01.2013 г. равна 14 мм/12ч для АМС Горная Карусель-1000. Для случая 24.09.2013 г., когда наблюдались экстремальные осадки, наибольшая погрешность составляет



44,4 мм/24ч для ГМС Роза Хутор-4. При этом разность между результатами, полученными для двух вариантов расчетной области, изменяется от 2 до 32 мм.

На рис. 5 представлены результаты прогноза количества осадков в виде 3-часовых сумм, полученные для двух вариантов области интегрирования модели COSMO-Ru1, в сравнении с результатами COSMO-Ru2 и данными наблюдений для 24.09.2013 г. Приведены прогнозы для четырех станций, расположенных в горной долине, для которых имеются данные наблюдений по 3-часовым (или часовым) суммам осадков.

Как видно из рис. 5, количество осадков, рассчитанных по модели COSMO-Ru1 для двух вариантов расчетной области, сильно варьирует от срока к сроку и от станции к станции.

Разность в количестве осадков за 3 часа между прогнозами для двух областей может достигать 14 мм (ГМС Роза Хутор-4). Из сравнения с результатами COSMO-Ru2 и данными наблюдений можно сделать следующие выводы:

- качество прогнозов количества осадков по модели COSMO-Ru1 сравнимо с качеством прогнозов по модели COSMO-Ru2;
- результаты для COSMO-Ru1 (450) оказываются несколько лучше остальных прогнозов;
- время начала выпадения осадков в прогнозе оказывается сдвинутым вперед по сравнению с наблюдениями.

Анализ табл. 1 и рис. 5 позволяет сделать заключение, что ни один из вариантов расчетной области модели COSMO-Ru1 не имеет очевидного преимущества в прогнозе сильных осадков.

Анализ пространственного распределения количества осадков за 3 часа в прогнозе на 12 ч от 24.09.2013, 00 ВСВ для двух вариантов расчетной области модели COSMO-Ru1 и для модели COSMO-Ru2 (рис. 6) выявил следующие особенности. При сохранении структуры пространственного распределения осадков результаты по модели COSMO-Ru1 отличаются большей детализацией и ростом значений количества осадков по сравнению с результатами COSMO-Ru2.

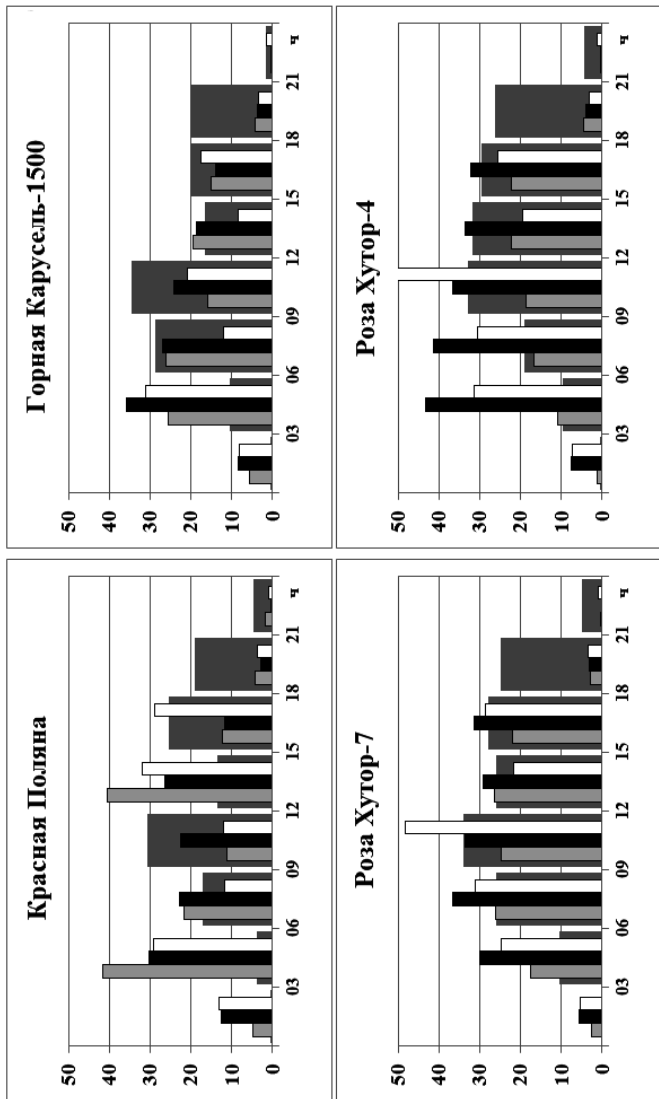


Рис. 5. Суммы осадков, мм/3ч, в прогнозе от 24.09.2013, 00 UTC, полученные для двух вариантов области интегрирования модели COSMO-Ru1, в сравнении с результатами по модели COSMO-Ru2 и данными наблюдений (более широкий прямоугольник, расположенный позади узких прямоугольников для прогнозов).



## **Определение внешних параметров модели COSMO-Ru1 – роль модельной орографии**

Для работы модели COSMO-Ru требуется информация о подстилающей поверхности, а также фоновые поля ряда характеристик. Вся необходимая информация обеспечивается набором внешних параметров, подготавливаемого для каждой области интегрирования модели. Внешние параметры могут быть как величинами постоянными (высота над уровнем моря, доля суши в ячейки сетки модели, тип почвы, шероховатость, излучательная способность подстилающей поверхности и пр.), так и меняться во времени (характеристики растительного покрова, содержания озона, содержание фоновых атмосферных аэрозолей).

Исходные данные для создания массивов внешних параметров модели имеют разное пространственное разрешение. Оно варьируется от  $4 \times 5^\circ$  для оптических параметров аэрозоля до  $30''$  для характеристик растительного покрова.

В настоящее время наиболее подробная информация имеется для орографии. Данные ASTER GDEM [7], являющиеся совместным продуктом Министерства экономики, торговли и промышленности Японии (METI, Ministry of Economy, Trade and Industry) и Национальной администрации по авиации и космосу США (NASA, National Aeronautics and Space Administration), имеют пространственное разрешение  $1''$  (примерно 30 м между двумя соседними точками, расположенными на одном меридиане).

Исходная орография модели COSMO-Ru1 строилась по данным GLOBE [8], имеющим разрешение  $30''$ , т.е. почти такое же, как разрешение собственно модели. Кроме того, было обнаружено, что разность между высотой пунктов наблюдений (ГМС, АМС) и высотой поверхности, заданной в ближайших узлах модельной сетки в некоторых случаях достигала 600 м. В результате была поставлена задача корректировки модельного рельефа с учетом имеющейся, более точной, информации об орографии. Новый вариант модельного рельефа, построенного по данным ASTER, был использован в последующих экспериментах.

В табл. 2 приводятся высоты пунктов наблюдения и высоты поверхности в узлах модельной сетки, расчеты для которых

использовались для оценки прогнозов COSMO-Ru1, которые приводятся в настоящей статье.

Таблица 2

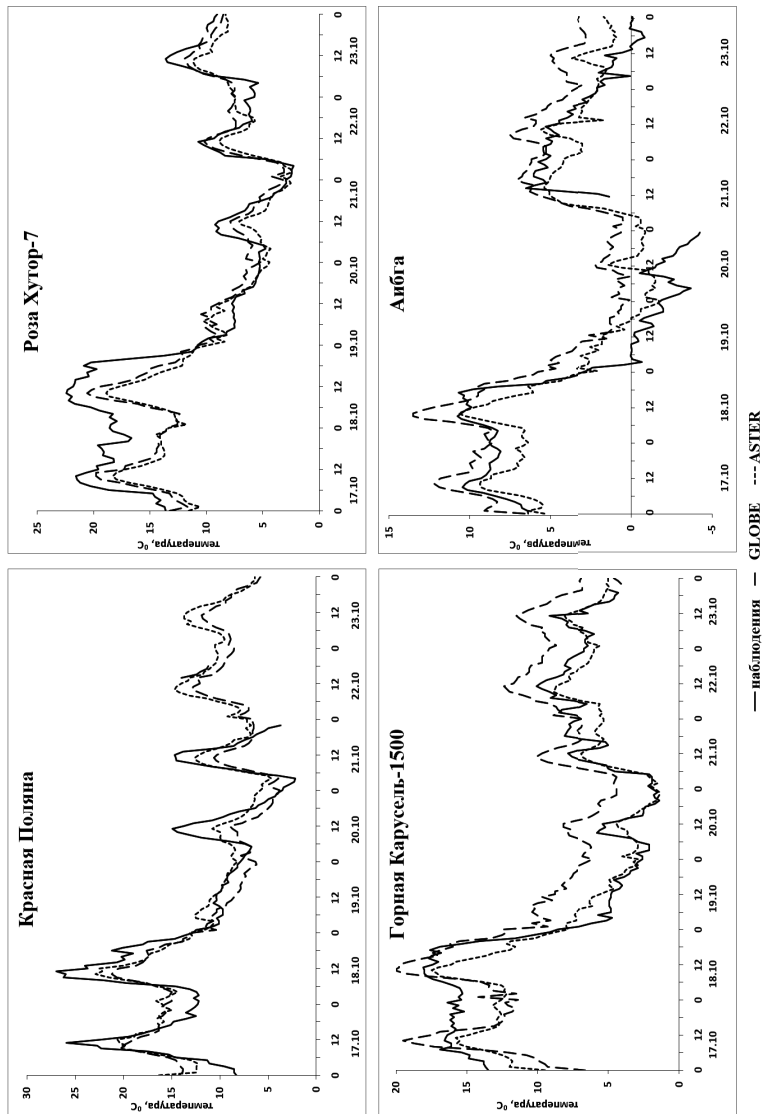
**Высоты пунктов наблюдения и поверхности в узлах модельной сетки COSMO-Ru1 для двух вариантов задания орографии**

Пункт наблюдений	Высота пункта наблюдений, м	Высота поверхности в узле, м	
		GLOBE	ASTER
ГМС Красная Поляна	564	812	571
АМС Горная Карусель-1000	978	688	1040
АМС Горная Карусель-1500	1434	864	1401
ГМС Аибга	2225	1542	2025
АМС Роза Хутор-4	1580	1201	1535
АМС Роза Хутор-7	980	949	1122

На рис. 7 представлены результаты прогноза приземной температуры воздуха по модели COSMO-Ru1 с двумя вариантами задания орографии в сравнении с наблюдениями для четырех пунктов. Приводится серия прогнозов на 24 ч по сроку 00 ВСУ для периода с 17 по 23 октября 2013 года.

Из рис. 7 видно, что корректировка модельной орографии привела к улучшению прогноза температуры. Наиболее четко изменения прогностических значений температуры проявились для АМС Горная Карусель-1500, где расхождение в высоте поверхности в узле и высоте станции уменьшилось с 570 до 33 м, а также для ГМС Аибга, где изменение высоты составило 483 м. Средняя за рассматриваемый период погрешность прогноза составила  $0,8^\circ$  для АМС Горная Карусель-1500, против  $1,7^\circ$  при расчетах с использованием орографии GLOBE. Для ГМС Аибга средняя ошибка также уменьшилась, с  $2,3^\circ$  до  $0,2^\circ$ .

В случае ГМС Красная Поляна высота поверхности в узле уменьшилась и превышает значение на самой станции всего на 6 м. Средняя ошибка прогноза для рассматриваемого периода составила  $0,2^\circ$ , против  $-0,8^\circ$  при расчетах с использованием орографии GLOBE.

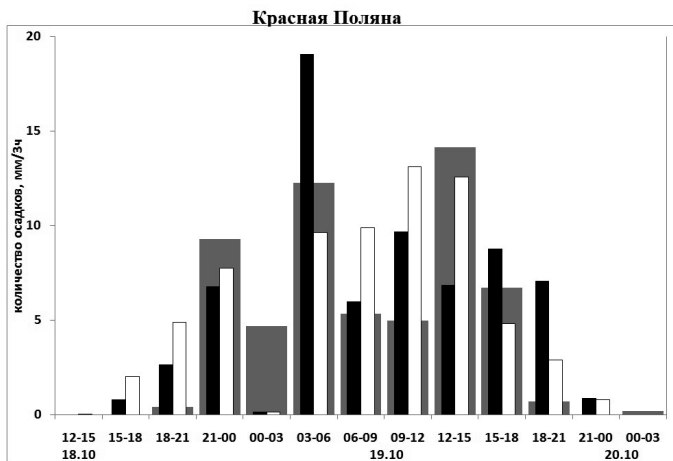


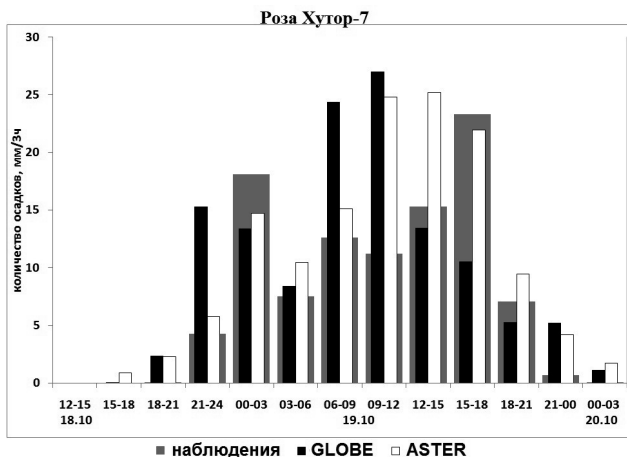
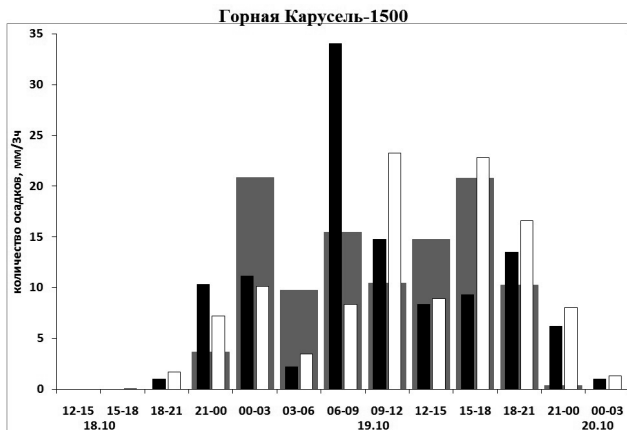
**Рис. 7. Приземная температура воздуха. Наблюдения и прогнозы по модели COSMO-Ru1 с двумя вариантами модельной орографии.**

С другой стороны, для АМС Роза Хутор-7 средняя ошибка прогноза увеличилась с  $-0,8^\circ$  до  $-1,7^\circ$ , так как после замены модельной орографии узел сетки «оказался» выше, и разность в высоте по сравнению со станцией увеличилась с 31 до 142 м.

Преимущественно положительные изменения в качестве прогноза температуры подтверждают целесообразность использования новой модельной орографии, основанной на данных ASTER. Для осадков однозначный вывод об изменении качества прогноза при смене модельной орографии сделать сложно, хотя в целом можно сделать заключение, что качество прогноза осадков улучшилось с заменой модельной орографии. Это следует из анализа рис. 8, на котором приведены прогнозы на 24 ч от 18, 19, 20 октября 2013, 00 ВСВ.

Сравнение прогноза количества осадков с данными наблюдений для случая интенсивных осадков 18–19 октября 2013 г. показало, что при переходе на орографию, основанную на данных ASTER, во-первых, пространственное распределение осадков воспроизводится более подробно, но, во-вторых, имеет место смещение зон наибольших осадков.





**Рис. 8. Количество осадков за 3 часа. Наблюдения и прогнозы по модели COSMO-Ru2 и COSMO-Ru1 с двумя вариантами модельной орографии.**

Из рис. 8 видно, что количество осадков за 3-часовые интервалы изменяется в зависимости от варианта модельной орографии, причем разность может составлять более 20 мм/3ч (АМС Горная Карусель-1500). Таким образом, можно сделать



заключение, что и качество прогноза осадков улучшилось с заменой модельной орографии.

### **Заклучение**

Проведенные с моделью с высоким пространственным разрешением COSMO-Ru1 численные эксперименты по изменению ряда внешних параметров позволили оценить степень влияния этих параметров на качество прогноза.

Объективным критерием выбора параметров является качество прогноза. Поэтому было проведено сравнение результатов, полученных для двух областей интегрирования и для двух вариантов модельной орографии как между собой, так и результатами наблюдений. В сравнениях использовались результаты расчетов по модели с меньшим пространственным разрешением COSMO-Ru2.

Сравнение с результатами модели COSMO-Ru2 позволило сделать вывод, что модель COSMO-Ru1 воспроизводит или результаты, сравнимые по точности с COSMO-Ru2, или прогноз по COSMO-Ru1 оказывается лучше прогноза по COSMO-Ru2.

Анализ результатов расчетов для двух вариантов области интегрирования модели не дал существенного преимущества какого-либо из вариантов. Таким образом, показана возможность проведения расчетов по модели COSMO-Ru1 на сетке  $200 \times 200$  узлов. Так как время счета на сетке  $200 \times 200$  узлов составляет 15,5 мин, то модель COSMO-Ru1 была включена в оперативную технологию прогноза для метеорологического обеспечения Олимпийских игр Сочи-2014.

Использование модельной орографии, построенной на данных о рельефе с высоким пространственным разрешением, определяет изменения в пространственном распределении прогнозируемых величин, что, в свою очередь, отражается на качестве прогноза. Новая модельная орография, основанная на данных ASTER, оказалась более реалистичной, что следует из сопоставления высоты станций и высоты поверхности в ближайших к ним узлах модельной сетки. Для большинства станций нет необходимости проводить корректировку по высоте

значений приземной температуры воздуха, полученных в прогнозе по модели COSMO-Ru1, как это требовалось в случае расчетов с использованием орографии, основанной на данных GLOBE.

Анализ прогнозов приземной температуры и осадков, полученных с использованием новой модельной орографии, показал улучшение качества расчета указанных величин.

Работа была частично поддержана грантом РГО ДОГОВОР №12/2013/РГО-РФФИ.

### Список использованных источников

1. *Блинов Д.В., Ривин Г.С., Розинкина И.А.* Система краткосрочного прогноза погоды COSMO-RU: технологические аспекты визуализации и распространения прогнозов // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 346. – С. 53–61.

2. *Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.* Мезомасштабный краткосрочный прогноз погоды в Гидрометцентре России на примере COSMO-Ru // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 1. – С. 5–17.

3. *Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А.* Система COSMO-Ru негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: первый этап реализации и развития // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 8. – С. 5–20.

4. *Baldauf M., Seifert A., Foerstner J., Majewski D., Raschendorfer M.* Operational Convective-Scale Numerical Weather Prediction with the COSMO Model: Description and Sensitivities. MWR. – 2011. – Vol. 139. – P. 3887–3905.

5. Сайт описания приоритетного проекта CORSO <http://cosmo-model.org/content/tasks/priorityProjects/corso/default.htm>

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

7. <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>

8. <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/globe.html>

*Поступила в редакцию 18.08.2014 г.*