

# РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АНСАМБЛЕВЫХ ПРОГНОЗОВ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ РЕГИОНА ПРОВЕДЕНИЯ ЗИМНИХ ОЛИМПИЙСКИХ ИГР СОЧИ-2014

*Д.Ю. Алферов, Е.Д. Астахова, Г.С. Ривин, И.А. Розинкина*

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр*

*Российской Федерации*

*dmalferov@yandex.ru, elena\_ast\_hmc@mail.ru,*

*Gdaly.Rivin@mail.ru, rozin2004@mail.ru*

## **Введение**

Решение о проведении зимних Олимпийских игр 2014 года в Сочи потребовало от гидрометеорологической службы России активной работы по усовершенствованию наблюдательной сети в регионе и созданию новых методов и технологий для обеспечения Олимпийских игр прогнозами погоды на современном уровне. В области численного прогнозирования наиболее перспективным в настоящее время является применение ансамблевых методов, позволяющих дать вероятностный прогноз наряду с априорной оценкой его качества, а также использование моделей высокого пространственного разрешения. Поэтому была поставлена задача разработки мезомасштабных систем ансамблевого прогнозирования для региона Сочи.

Задача была решена в рамках приоритетного проекта CORSO [15] консорциума COSMO, рассматриваемого как вклад консорциума в международный проект Всемирной программы метеорологических исследований (ВПМИ) BMO FROST-2014 [2], посвященный организации метеообеспечения Олимпийских игр и исследованию методов прогнозирования погоды в горной местности. Работа выполнялась совместно российскими и

итальянскими учеными, представляющими такие прогностические организации, как Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации (Гидрометцентр России, Москва, Россия) и ARPA Emilia-Romagna, Servizio Idro-Meteo-Clima (ARPA-SIMC, Болонья, Италия). Были разработаны две системы ансамблевого прогноза (САП) для территории Сочинского региона, основанные на модели COSMO с разрешением 7 и 2,2 км.

Система с шагом 7 км по горизонтали, названная COSMO-S14-EPS (S14 – аббревиатура от Sochi2014), была создана в ARPA-SIMC [13, 14] и представляет собой версию системы COSMO-LEPS [11, 12], «смещенную» с территории Европы на регион Сочи. Работы по созданию системы с шагом 2,2 км, названной COSMO-Ru2-EPS, проводились в основном в Гидрометцентре России. Подробное описание технологии ансамблевого прогнозирования, разработанной для обеспечения прогнозами Олимпийских игр в Сочи представлено в настоящем сборнике в статье [1]. Ниже обсуждаются результаты работ по созданию системы COSMO-Ru2-EPS с разрешением 2,2 км.

Необходимость разработки системы ансамблевого прогнозирования такого высокого разрешения определяется тем фактом, что область проведения Олимпийских игр характеризуется сложным рельефом (достаточно высокие и крутые горы, близко расположенные к берегу моря), наблюдаемыми контрастами погоды, частыми опасными явлениями. Опыт проектов, инициированных ВПМИ перед Олимпиадами в Пекине в 2008 году и в Ванкувере в 2010 году (B08RDP и SNOW-10) [8, 10], а также проекта MAP D-PHASE [16] показал, что удовлетворительное описание метеорологических процессов и прогноз опасных явлений в таких областях возможны только с использованием моделей высокого разрешения (не грубее 2–3 км). При горизонтальном разрешении модели атмосферы около 1–3 км процессы конвекции описываются явным образом, без применения параметризаций, что может повлиять как на качество отдельного прогноза, так и на разброс прогнозов в ансамбле. Модели высокого разрешения используют более подробный рельеф, что позволяет

получить детализованный прогноз [14] и дает возможность описать мелкомасштабные локальные явления погоды (например, туман в долинах, эволюцию облачности нижнего яруса). Следует также отметить, что в мире в последнее время прослеживается тенденция к увеличению числа мезомасштабных САП с разрешением, позволяющим явным образом описать глубокую конвекцию, не только для горных областей.

### **Конфигурация системы COSMO-Ru2-EPS и элементы технологической линии**

В системе COSMO-Ru2-EPS использована модель COSMO-Ru2 [3], граничные и начальные условия генерируются на основе прогнозов COSMO-S14-EPS. В 2013–2014 гг. информация, необходимая для генерации граничных условий, регулярно поступала на сервер проекта FROST-2014 (подробнее см. [1]) с дискретностью 1 час. Основные характеристики ансамблевой системы высокого пространственного разрешения COSMO-Ru2-EPS и «материнской» системы COSMO-S14-EPS приведены в табл. 1. Рис. 1 графически демонстрирует способ формирования ансамбля в системе COSMO-Ru2-EPS и области интегрирования систем COSMO-S14-EPS и COSMO-Ru2-EPS.

Система COSMO-Ru2-EPS была реализована на компьютере SGI Altix 4700 Росгидромета. Граничные и начальные данные для системы поступали приблизительно в 08:30 и 20:30 ВСВ для сроков 00 и 12 ч ВСВ соответственно. Астрономическое время счета прогноза составляло в среднем 3–3,5 ч. Таким образом, ансамблевый прогноз по системе COSMO-Ru2-EPS был готов через 11,5–12 часов после срока наблюдения.

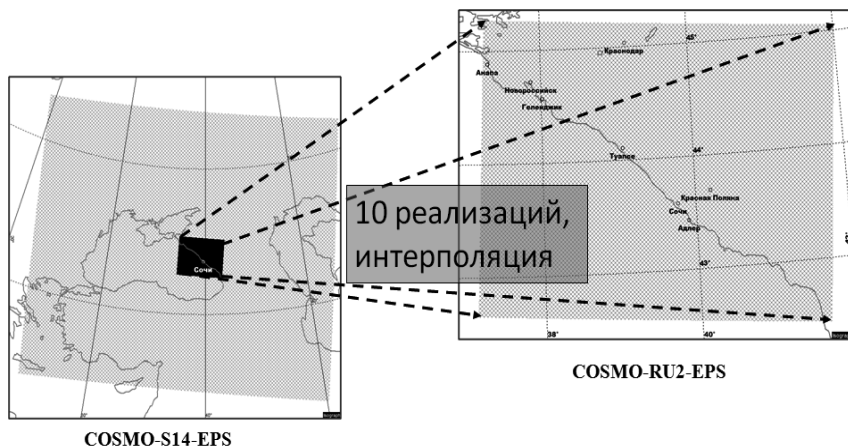
Для подготовки стандартной вероятностной продукции использовался пакет Fieldextra [17], разработанный консорциумом COSMO, а визуализация результатов выполнялась с использованием графического пакета GrADS. В январе-апреле 2013 года система функционировала в квазиоперативном режиме, ежедневно выпуская прогнозы по сроку 00 и 12 ч ВСВ. Предварительный анализ качества прогнозов показал их полезность, и было рекомендовано использовать систему зимой-

весной 2013–2014 гг. для выпуска оперативных прогнозов для региона Сочи.

Таблица 1

**Характеристика используемых ансамблевых систем**

	<b>COSMO-S14-EPS</b>	<b>COSMO-Ru2-EPS</b>
Разрешение по горизонтали, км	7	2,2
Разрешение по вертикали (основные уровни)	40	50
Количество узлов	365×307	172×132
Заблаговременность прогноза, ч	72	48
Количество ансамблевых реализаций	10	10
Начальный момент прогноза (ч ВСВ)	00, 12	00, 12
Начальные и боковые граничные условия	Интерполяция из отобранных специальным методом реализаций ансамбля Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды	Интерполяция из COSMO-S14-EPS
Возмущения модели	Схема стохастического возмущения параметризуемых физических тенденций и схема стохастического обратного рассеяния кинетической энергии	нет
Метод расчета конвекции	Параметризация	Вычисляется непосредственно



**Рис. 1. Схематическое представление способа формирования ансамбля в системе прогноза высокого разрешения. Области интегрирования COSMO-S14-EPS и COSMO-Ru2-EPS.**

С ноября 2013 г. по апрель 2014 г. ансамблевый прогноз с разрешением 2,2 км выпускался в оперативном режиме дважды в сутки, а его результаты представлялась на сайте проекта FROST-2014 (<http://frost2014.meteoinfo.ru/forecast>).

### **Продукция системы COSMO-Ru2-EPS**

Подготавливался набор стандартных продуктов вероятностного прогноза, включающий в себя поля в коде GRIB и ансамблевые метеограммы по 36 пунктам, расположенным в приморском и горном кластерах района проведения Олимпийских игр.

В виде полей были представлены: среднее по ансамблю (давление на уровне моря, температура на уровне 2 м над поверхностью земли и на уровне 850 гПа, 3-часовая сумма осадков), разброс (среднеквадратическое отклонение от среднего) прогнозов в ансамбле (давление на уровне моря, температура на уровне 2 м над поверхностью земли и на уровне 850 гПа), а также вероятности ряда событий (табл. 2).

Таблица 2

## Вероятностная продукция САП COSMO-Ru2-EPS

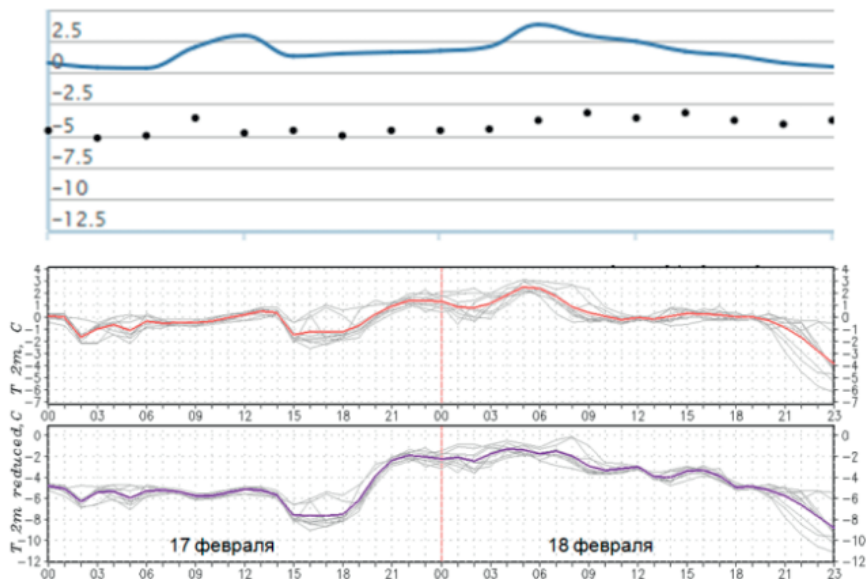
Метеоэлемент	Период, ч	Пороговые значения, используемые для определения событий
Порывы ветра	1	Более 4, 5, 10, 14, 15, 17 м/с
	3	
Модуль ветра (на уровне 10 м)	1	Более 3, 4, 5, 7, 11, 13, 15, 17 м/с
	3	
Суммарные осадки	3	Более 0,2, 1, 10, 15 мм
	6	Более 1, 5, 10, 15 мм
	12	Более 5, 10, 20, 50 мм
	24	Более 0,2, 10, 20, 50, 100 мм
Жидкие осадки	3	Более 0,2, 1, 5, 10, 15 мм
	6	Более 1, 5, 10, 15 мм
	12	Более 5, 10, 20, 50 мм
	24	Более 0,2, 10, 20, 50, 100 мм
Твердые осадки	3	Более 0,2, 1, 2 мм
	6	Более 2, 5, 15 мм
	12	Более 15, 30 мм
	24	Более 0,2, 15, 30 мм
Максимальная температура на уровне 2 м над поверхностью	1	Выше 0, 5 °С
	3	Ниже -5 °С
Минимальная температура на уровне 2 м над поверхностью	1	Выше 5 °С
	3	Ниже -20, -10, -5, 0 °С

Ансамблевые метеограммы по пунктам подготавливались для осадков (суммарные, дождь, снег), высоты нижней границы облачности, балла облачности по ярусам, ветра на уровнях 10 м и

850 гПа, температуры воздуха и точки росы на уровне 2 м, температуры на уровне 850 гПа.

Кроме стандартных ансамблевых метеограмм (на которые наносится медиана (50-й процентиль), 25, 75-й процентиля, максимальное и минимальное прогнозируемое значение), подготавливались также веерные диаграммы, на которых были представлены все прогнозы ансамбля в выбранной точке. С помощью веерных диаграмм можно не только дать априорную оценку точности прогноза, но и увидеть альтернативные сценарии возможного развития процессов, что не позволяют сделать ансамблевые метеограммы.

Для построения метеограмм в пункте использовались прогностические значения в ближайшем узле сетки модели. Но в регионах со сложным рельефом, каким является регион Сочи, высоты интересующей нас точки и соответствующих узлов сетки могут значительно различаться (кое-где в рассматриваемом регионе разница составляла свыше 900 м). Это может приводить к большим погрешностям прогноза в точке, в особенности для приземной температуры воздуха. Стандартная коррекция температуры, учитывающая разницу реальной и модельной высот с использованием среднего вертикального градиента температуры в тропосфере  $0,65 \text{ }^\circ/100\text{м}$ , может привести к ошибкам в случае инверсий. Поэтому температура на уровне 2 м корректировалась с учетом прогностического градиента температуры [3]. При этом применялась таблица поправок, подготовленная на основе результатов оперативного детерминистского прогноза по модели COSMO-Ru2, использующей ту же орографию, что и система COSMO-Ru2-EPS. Так как иногда синоптики предпочитают анализировать некорректированные прогнозы температуры, то метеограммы строились как для исходной, так и для скорректированной температуры на уровне 2 м. Положительный эффект коррекции демонстрирует рис. 2, где приведены метеограммы температуры на уровне 2 м по системе COSMO-Ru2-EPS в сравнении с результатами системы COSMO-S14-EPS и наблюдениями на станции Аибга (высота 2225 м, высота ближайшего узла COSMO-Ru2-EPS – 1868,2 м).



**Рис. 2. Сравнение среднего прогноза COSMO-S14-EPS (синяя линия), наблюдаемых значений температуры на уровне 2 м (черные точки) (по данным <http://frost2014.meteoinfo.ru/forecast>), исходного (среднее значение показано красной линией) и скорректированного (среднее значение показано фиолетовой линией) прогнозов COSMO-Ru2-EPS от 00 ч ВСВ 17 февраля 2014 года для станции Аибга.**

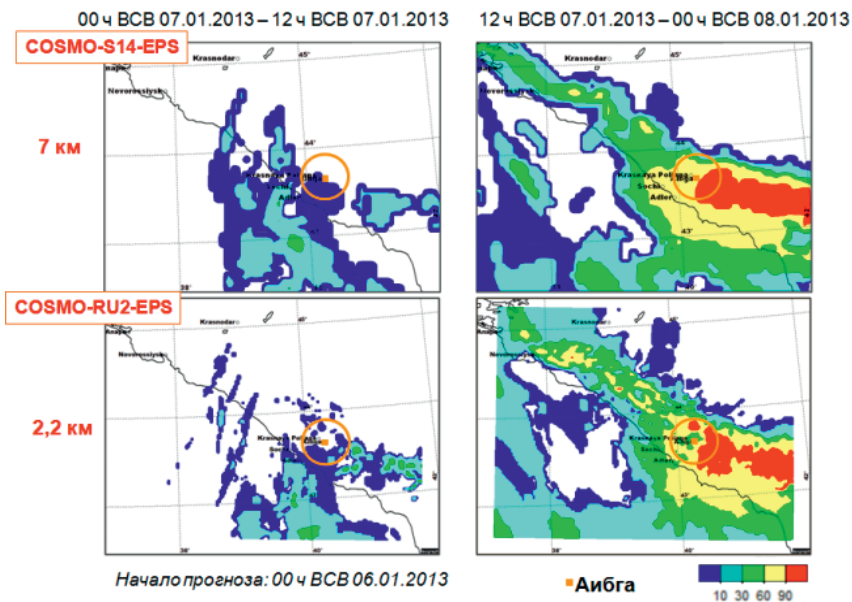
### Анализ отдельных случаев

В 2012–2014 гг. было проанализировано качество воспроизведения системой COSMO-Ru2-EPS ряда случаев примечательных погодных явлений – сильных осадков, фена с резким повышением температуры, сильных порывов ветра, при этом было проведено сравнение с результатами COSMO-S14-EPS и данными наблюдений.

Рассмотрим подробно случай сильных осадков 7 января 2013 года. В месте проведения соревнований в горах около 12 ч ВСВ начался сильный дождь. По данным метеостанции Аибга, за два последовательных 12-часовых периода, начиная с 15 ч ВСВ

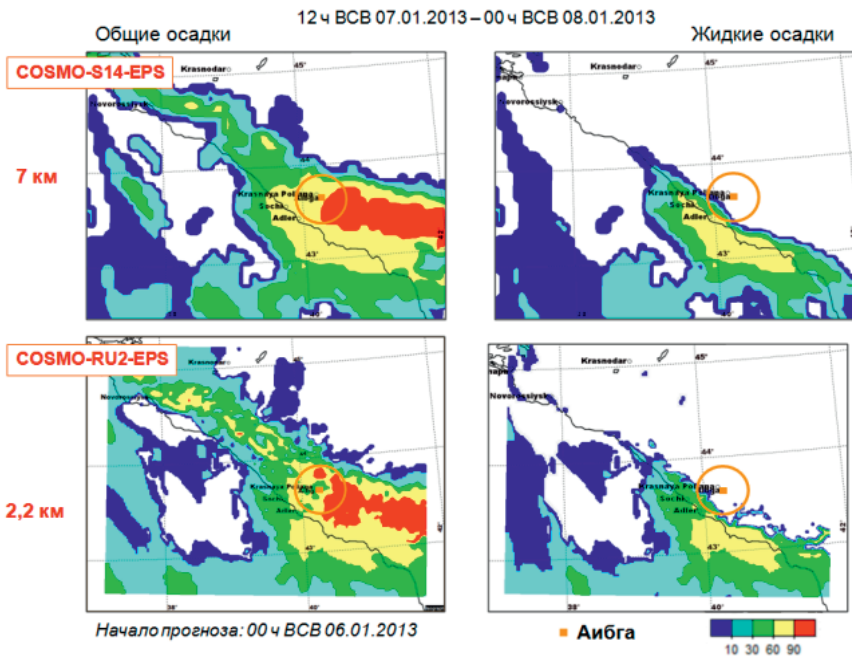


7 января и с 3 ч ВСВ 8 января, выпало 24 мм осадков (по 12 мм за каждые 12 часов). Были проанализированы поля вероятности выпадения более 10 мм осадков за 12 часов, полученные с помощью двух систем ансамблевого прогноза. На рис. 3 приведены такие поля, полученные в прогнозе от 6.01.2013, 00 ВСВ, для двух последовательных 12-часовых периодов. Видно, что обе системы верно спрогнозировали момент начала осадкообразования, при этом система высокого разрешения дала более детальный прогноз.



**Рис. 3.** Поля вероятности сумм осадков, превышающих 10 мм за 12 ч начиная с 00 ч ВСВ 7.01.2013 г. (слева) и с 12 ч ВСВ 7.01.2013 г. (справа), полученные по системам COSMO-S14-EPS (сверху) и COSMO-Ru2-EPS (снизу) в прогнозе от 00 ч ВСВ 6.01.2013 г.

Для ансамблевой системы важно, способна ли она верно моделировать фазу осадков. На рис. 4 представлены вероятности выпадения более 10 мм осадков во всех фазах и отдельно в жидкой фазе. Оказалось, что обе системы способны верно воспроизводить фазу осадков, прогнозируя дождь на побережье и снег в горах.



**Рис. 4. Поля вероятности сумм общих осадков (слева) и осадков в виде дождя (справа), превышающих 10 мм за 12 часов, начиная с 12 ч ВСВ 7.01.2013 г., полученные по системам COSMO-S14-EPS (сверху) и COSMO-Ru2-EPS (снизу) в прогнозе от 00 ч ВСВ 6.01.2013 г.**

Анализ еще одного случая сильных осадков 13 января 2013 года опубликован в [14]. Обе системы успешно спрогнозировали рассматриваемое явление, при этом ансамбль COSMO-Ru2-EPS показал более четкую локализацию районов, затронутых сильным снегопадом, отделяя их от прибрежных районов, где прогнозировался и наблюдался только дождь. Вместе с тем рассматриваемый ансамбль показал и большую, чем САП более грубого разрешения, склонность к категорической оценке вероятности осадков, т. е. меньший ансамблевый разброс.

В целом во всех рассмотренных случаях отмечено хорошее воспроизведение эволюции атмосферы (количество и фаза осадков,

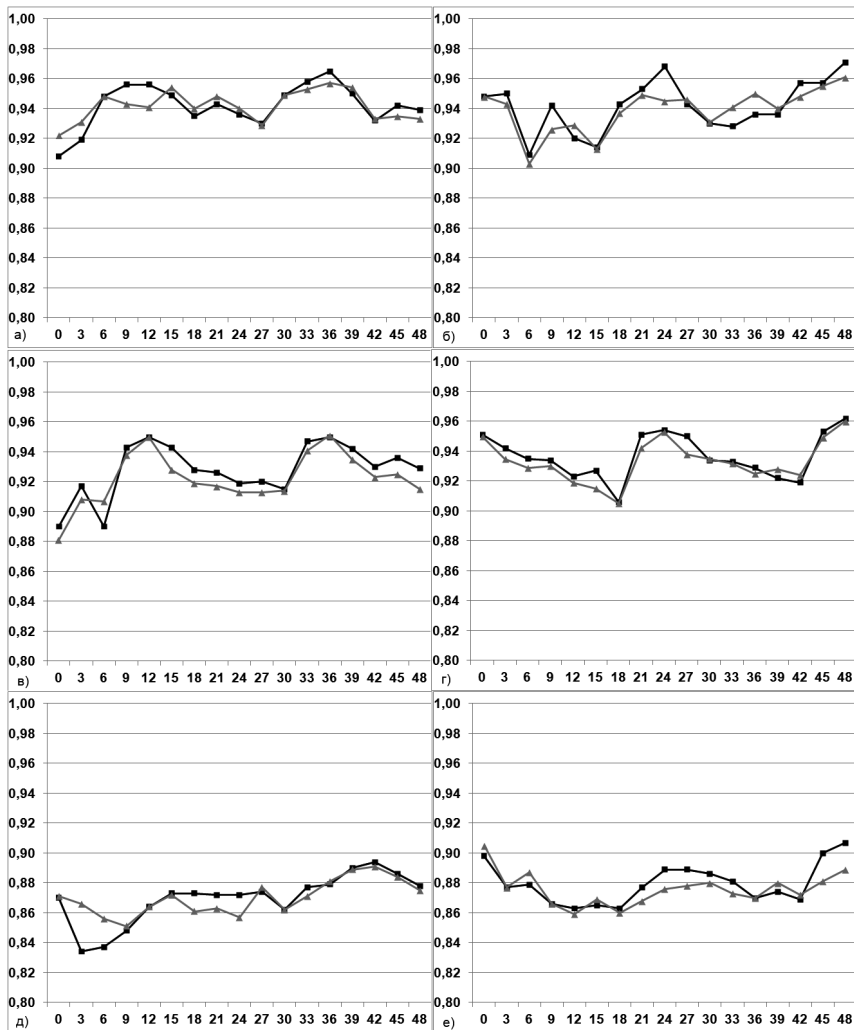
изменение температуры, время начала и окончания тех или иных явлений) и полезность выходной продукции систем для синоптиков. Система COSMO-Ru2-EPS дает более детальные прогнозы. Вместе с тем отмечены небольшие проблемы с точной локализацией явлений погоды и воспроизведением полей ветра в горном кластере (что объясняется сложным рельефом и большой детализацией воспроизводимых атмосферных процессов), а также не всегда достаточный ансамблевый разброс, что приводит к усилению категоричности прогнозов.

### **Вероятностные оценки качества ансамблевых прогнозов**

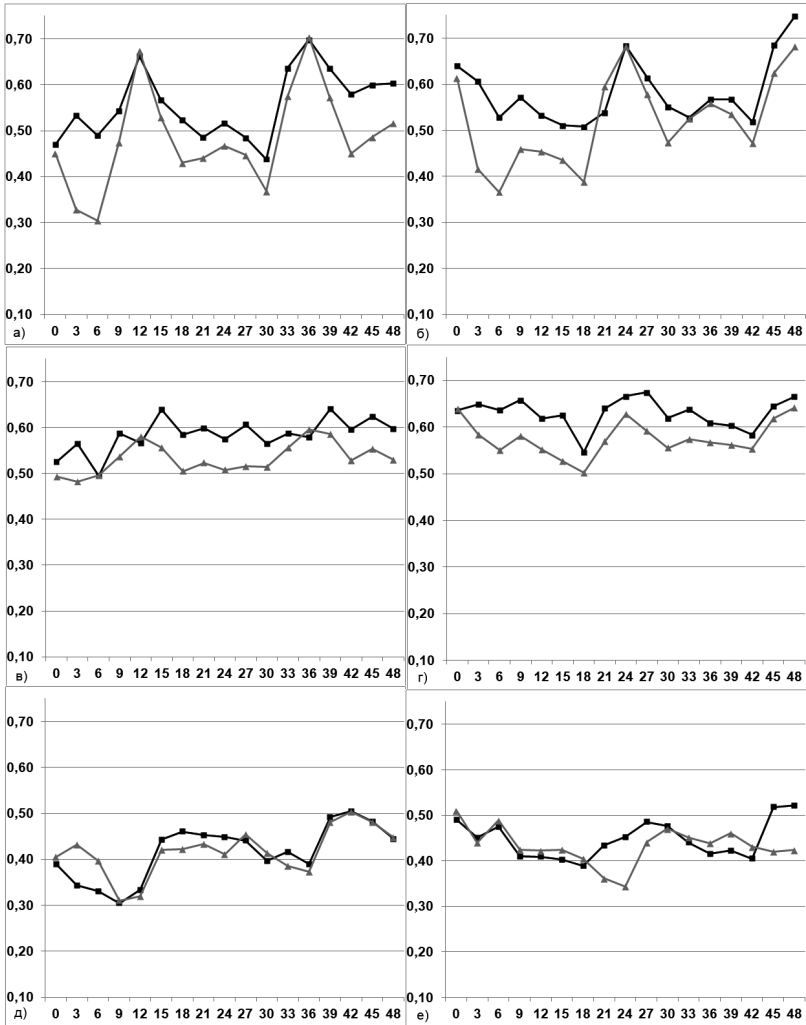
Для оценки полезности продукции ансамблевой системы прогнозов COSMO-Ru2-EPS по сравнению с результатами COSMO-S14-EPS были проанализированы стандартные вероятностные оценки качества прогнозов температуры на уровне 2 м за зиму 2013 г. (январь-февраль). Оценки проводились для области 42,5–45,0° с.ш., 37,5–41,5° в.д., где расположено 69 наблюдательных станций, включая автоматические станции, установленные в регионе Сочи. Для расчета оценок был применен пакет VERSUS, разрабатываемый консорциумом COSMO, с помощью которого рассчитывались стандартные оценки качества ансамблевых систем: сравнительная оперативная характеристика (relative operating characteristic, ROC), показатель качества Брайера (Brier Skill Score, BSS), диаграммы надежности и ранговые гистограммы [4, 5].

На рис. 5 представлена площадь под кривой ROC (ROC area, ROCA) в зависимости от заблаговременности прогноза, а на рис. 6 – аналогичный график для показателя качества Брайера BSS. Большие значения этих характеристик указывают на лучшее качество прогноза. Обычно считается, что прогноз можно использовать, если значения ROCA превышают 0,6.

Представленные на рис. 5 и 6 результаты показывают высокое качество прогнозов по обоим рассматриваемым ансамблевым системам.



**Рис. 5. Оценка ROCA для прогноза событий «температура воздуха на высоте 2 м ниже  $-5^{\circ}\text{C}$  (первая строка); выше  $0^{\circ}\text{C}$  (вторая строка); выше  $5^{\circ}\text{C}$  (третья строка)» по системам COSMO-Ru2-EPS (черная линия) и COSMO-S14-EPS (серая линия) за январь и февраль 2013 г. от 00 ч (слева) и 12 ч ВСУ (справа). По оси абсцисс отложена заблаговременность прогноза.**



**Рис. 6. Показатель качества Брайера (BSS) для прогноза событий «температура воздуха на высоте 2 м ниже  $-5^{\circ}\text{C}$  (первая строка); выше  $0^{\circ}\text{C}$  (вторая строка); выше  $5^{\circ}\text{C}$  (третья строка)» по системам COSMO-Ru2-EPS (черная линия) и COSMO-S14-EPS (серая линия) за январь и февраль 2013 г. от 00 ч (слева) и 12 ч ВСВ (справа). По оси абсцисс отложена заблаговременность прогноза.**

Видно небольшое преимущество системы COSMO-Ru2-EPS, проявляющееся в основном в более высоких значениях показателя качества Брайера. Напомним, что эта оценка показывает преимущество вероятностного прогноза над климатологией (которая определялась по всей рассматриваемой выборке) в точности предсказания факта события и ее не следует использовать для малых выборок.

Для окончательного заключения о качестве ансамблевых прогнозов, подготовленных по системам COSMO-Ru2-EPS и COSMO-S14-EPS, необходимо рассмотреть оценки для более длительных периодов времени и для различных метеоэлементов (температура, осадки, скорость ветра и т.д.), а также проанализировать отдельно успешность прогнозов в горном и прибрежном кластерах Олимпийских игр.

### **Выводы и планы дальнейшей работы**

Таким образом, в рамках проектов CORSO и FROST-2014 и на основе данных разработанной итальянскими коллегами системы COSMO-S14-EPS в Гидрометцентре России созданы и внедрены в прогностическую практику ансамблевая система высокого разрешения (2,2 км) COSMO-Ru2-EPS с явным учетом конвекции для территории, включающей район проведения Олимпийских игр Сочи-2014, и средства визуализации продукции ансамблевого прогноза. Полученные вероятностные прогнозы были востребованы синоптиками для метеорологического обеспечения Олимпийских игр в Сочи.

Разработанная ансамблевая система продемонстрировала возможности детализации и уточнения более грубых ансамблевых прогнозов с разрешением 7 км для различных рассмотренных случаев. Верификация прогнозов температуры на уровне 2 м, выполненная для систем COSMO-S14-EPS и COSMO-Ru2-EPS с помощью пакета VERSUS для января-февраля 2013 года, показала слабое преимущество последней.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что построенная нами САП COSMO-Ru2-EPS оказалась способной поставлять полезную информацию для краткосрочного прогноза

погоды. Тем не менее необходим более обширный анализ качества прогнозов температуры и других метеорологических величин, в особенности осадков. Кроме того, для улучшения представления неопределенности прогноза имеет смысл рассмотреть и другие методы генерации ансамбля, такие, к примеру, как развиваемые и активно тестируемые сейчас в консорциуме COSMO метод стохастического возмущения параметризуемых физических тенденций (SPPT, [7]) и методы возмущения параметров, связанных с влажностью почвы [6, 9]. Поиск новых методов генерации ансамбля важен еще и для того, чтобы в дальнейшем заменить использование данных COSMO-S14-EPS после завершения проекта CORSO.

### Список использованных источников

1. *Астахова Е.Д., Монтани А., Алферов Д.Ю.* Системы ансамблевых прогнозов по модели COSMO для региона Сочи: развитие методов и обеспечение вероятностными прогнозами XXII зимней Олимпиады // Труды Гидрометцентра России. – 2014. – Вып. 352. – см. настоящий выпуск.
2. *Киктев Д.Б., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Зарипов Р.Б., 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.
3. *Вильфанд Р.М., Ривин Г.С. и др.* Негидростатическая система Гидрометцентра России мезомасштабного краткосрочного прогнозирования погоды COSMO-Ru // Турбулентность, динамика атмосферы и климата: тезисы докладов Международной конференции, посвященной памяти академика А.М. Обухова. – М.: ГЕОС, 2013. – С. 58–60.
4. *Муравьев А.В., Вильфанд Р.М.* О стандартизации оценок качества среднесрочных и долгосрочных прогнозов погоды // Метеорология и гидрология. – 2000. – № 12. – С. 24–34.
5. *Atger F.* The skill of ensemble prediction systems // Mon. Wea. Rev. – 1999. – Vol. 127. – P. 1941–1953.
6. *Bonanno R., Loglisci N.* A sensitivity test to assess the impact of different soil moisture initializations on short range ensemble variability in COSMO model // COSMO Newsletter. – 2014. – P. 95–105. Available at <http://www.cosmo-model.org>.

7. Buizza R., Miller M., Palmer T. Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF ensemble prediction system // Q. J. R. Met. Soc. – 1999. – Vol. 125. – P. 2887–2908.

8. Duan Y., Gong J., Du J. et al. An Overview of the Beijing 2008 Olympics Research and Development Project (B08RDP) // Bull. Amer. Meteor. Soc. – Vol. 93, Iss. 3. – P. 381–404.

9. Duniec G., Mazur A. COTEKINO Priority Project – results of sensitivity tests // COSMO Newsletter. No. 14. — 2014. — P. 106–113. Available at <http://www.cosmo-model.org>.

10. Isaac G. A., Joe P., Mailhot J. et al. Science of Nowcasting Olympic Weather for Vancouver 2010 (SNOW-10): A World Weather Research Programme project // J. Pure and Applied Geophysics. — 2012. – DOI: 10.1007/s00024-012-0579-0.

11. Marsigli C., Diomede T., Montani A., Paccagnella T., Louka P., Gofa F., Corigliano A. The CONSENS Priority Project // COSMO Technical Report No. 22. – Deutscher Wetterdienst, 2013. – 45 p. Available at <http://www.cosmo-model.org>.

12. Montani A., Cesari D., Marsigli C., Paccagnella T. Seven years of activity in the field of mesoscale ensemble forecasting by the COSMO-LEPS system: main achievements and open challenges // Tellus A. – 2011. – Vol. 63. – P. 605–624. – doi: 10.1111/j.1600-0870.2010.00499.

13. Montani A., Marsigli C., Paccagnella T. Development of a COSMO-based limited-area ensemble system for the 2014 Winter Olympic Games // COSMO Newsletter No. 13. – 2013. – P. 93–99. Available at <http://www.cosmo-model.org>.

14. Montani A., Alferov D., Astakhova E., Marsigli C., Paccagnella T. Ensemble forecasting for Sochi-2014 Olympics: the COSMO-based ensemble prediction systems // COSMO Newsletter No. 14. – 2014. – P. 88–94. Available at <http://www.cosmo-model.org>.

15. Rivin G.S., Rozinkina I.A. Priority project "CORSO": consolidation of operation and research results for the Sochi Olympic Games. Available at <http://cosmo-model.org/content/tasks/priorityProjects/corso/default.htm>

16. Rotach M.W., Ambrosetti P., Appenzeller C. et al. MAP D-PHASE: Real-Time Demonstration of Weather Forecast Quality in the Alpine Region // Bull. Amer. Meteor. Soc. – 2009. – Vol. 90. – P. 1321–1336.

17. COSMO utilities software. Available at <http://www.cosmo-model.org/content/support/software/default.htm>

*Поступила в редакцию 25.09.2014 г.*