

Руководящие указания по системам ансамблевого прогнозирования и прогнозированию



Всемирная
Метеорологическая
Организация

Погода • Климат • Вода

ВМО-№ 1091

Руководящие указания по системам ансамблевого прогнозирования и прогнозированию



**Всемирная
Метеорологическая
Организация**
Погода • Климат • Вода

2012

ВМО-№ 1091

РЕДАКЦИОННОЕ ПРИМЕЧАНИЕ

МЕТЕОТЕРМ, терминологическую базу данных ВМО, можно использовать для получения справочной информации по адресу: http://www.wmo.int/pages/prog/lsp/meteoterm_wmo_en.html. Сокращения также доступны по адресу: http://www.wmo.int/pages/themes/acronyms/index_en.html.

ВМО-№1091

© **Всемирная Метеорологическая Организация, 2012**

Право на опубликование в печатной, электронной или какой-либо иной форме на каком-либо языке сохраняется за ВМО. Небольшие выдержки из публикаций ВМО могут воспроизводиться без разрешения при условии четкого указания источника в полном объеме. Корреспонденцию редакционного характера и запросы в отношении частичного или полного опубликования, воспроизведения или перевода настоящей публикации следует направлять по адресу:

Chair, Publications Board
World Meteorological Organization (WMO)
7 bis, avenue de la Paix
P.O. Box 2300
CH-1211 Geneva 2, Switzerland

Тел.: +41 (0) 22 730 84 03
Факс: +41 (0) 22 730 80 40
Э-почта: publications@wmo.int

ISBN 978-92-63-41091-7

ПРИМЕЧАНИЕ

Обозначения, употребляемые в публикациях ВМО, а также изложение материала в настоящей публикации не означают выражения со стороны ВМО какого бы то ни было мнения в отношении правового статуса какой-либо страны, территории, города или района, или их властей, а также в отношении делимитации их границ.

Упоминание отдельных компаний или какой-либо продукции не означает, что они одобрены или рекомендованы ВМО и что им отдается предпочтение перед другими аналогичными, но не упомянутыми или не пропрекламированными компаниями или продукцией.

Заключения, мнения и выводы, представленные в публикациях ВМО с указанием авторов, принадлежат этим авторам и не обязательно отражают точку зрения ВМО или ее стран-членов.

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

1.	ВВЕДЕНИЕ	1
2.	ПОЧЕМУ МЫ ДОЛЖНЫ ИСПОЛЬЗОВАТЬ САП?	1
3.	ТИПЫ САП	2
3.1	Глобальные САП	3
3.2	Региональные САП	3
3.3	САП конвективного масштаба	3
4.	СТАНДАРТНАЯ ПРОДУКЦИЯ САП	5
4.1	Производство основной непосредственной выходной продукции моделей	5
4.1.1	Средняя величина по ансамблю	5
4.1.2	Разброс по ансамблю	5
4.1.3	Базовая вероятность	6
4.1.4	Квантили	6
4.1.5	Карты-спагетти	7
4.1.6	Карты-почтовые марки	7
4.1.7	Метеограммы для конкретных мест	7
5.	ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ, ПРИМЕНИМЫЕ КО ВСЕМ ВИДАМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ САП	9
6.	ИСПОЛЬЗОВАНИЕ САП В ДЕТЕРМИНИРОВАННОМ ПРОГНОЗИРОВАНИИ	11
6.1	Принятие решений на основе детерминированных прогнозов	13
7.	СЦЕНАРИИ	13
8.	ПОЛНОСТЬЮ ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ПРОГНОЗЫ	14
9.	ПОСТПРОЦЕССИНГ	16
9.1	Статистический постпроцессинг	16
9.1.1	Коррекция погрешностей первого момента функции распределения вероятностей	17
9.1.2	Калибровка более высоких моментов функции распределения вероятностей	17
9.2	Уменьшение масштаба	18
9.2.1	Динамическое уменьшение масштаба	18
9.2.2	Топографическое уменьшение масштаба с использованием простых физических моделей	19
9.2.3	Извлечения данных по конкретным географическим пунктам	19
9.2.4	Статистическое уменьшение масштаба	19
9.2.4.1	Использование различий в анализе	19
9.2.4.2	Фильтр Калмана	20
9.2.5	Диагностика погодных явлений со значительными воздействиями и последствиями	20
9.2.6	Уменьшение масштаба за счет комбинации САП низкого разрешения и контрольного прогноза высокого разрешения	21
9.3	Методы кластеризации	21
9.4	Использование повторных прогнозов	21
9.4.1	Индекс чрезвычайного прогноза	22
9.4.2	Соотношение квантилей	22
9.5	Отслеживание характеристик	23

10.	ИСПОЛЬЗОВАНИЕ САП В ПРОГНОЗИРОВАНИИ СУРОВОЙ ПОГОДЫ И ВЫПУСК ПРЕДУПРЕЖДЕНИЙ	23
11.	МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЙ СУРОВОЙ ПОГОДЫ	26
12.	ПРОВЕРКА ОПРАВДЫВАЕМОСТИ	26
13.	ПОДГОТОВКА ПРОГНОЗИСТОВ	28

РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО СИСТЕМАМ АНСАМБЛЕВОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЮ

1. ВВЕДЕНИЕ

Системы ансамблевого прогнозирования (САП) представляют собой системы численного прогнозирования погоды (ЧПП), которые позволяют нам оценивать неопределенность в прогнозе погоды, а также наиболее вероятный исход. Вместо прогона модели ЧПП один раз (детерминированный прогноз) модель прогоняется много раз с несколько разными исходными условиями. Во многих случаях физика модели бывает также несколько возмущенной, а некоторые ансамбли используют более одной модели внутри ансамбля (мультимодельная САП) или одну и ту же модель, но с различными комбинациями схем физической параметризации (мультифизическая САП). Из-за стоимости многократного прогона модели ЧПП САП обычно прогоняется примерно с половиной горизонтального разрешения эквивалентной модели детерминированного ЧПП. Обычно САП включает контрольный прогноз, который использует модель с ансамблевым разрешением, но без каких-либо возмущений для анализа или модели. Отдельные решения ЧПП, которые составляют ансамбль, часто называются членами ансамбля. Серия различных решений в прогнозе позволяет оценивать неопределенность прогноза и то, насколько мы можем быть уверены в детерминированном прогнозе. Неопределенность прогноза погоды может широко варьироваться изо дня в день в зависимости от синоптической ситуации, а САП обеспечивает оценку этой повседневной неопределенности. САП предназначена для исследования функции распределения вероятности (ФРВ) прогноза и часто используется для подготовки вероятностных прогнозов, чтобы оценить вероятность наступления определенных исходов.

Настоящие руководящие указания призваны обеспечить прогнозистов и поставщиков прогнозов некоторыми общими рекомендациями по эффективному использованию САП, а также о том, чего следует и не следует ожидать от САП. Предполагается наличие общего представления о принципах использования ЧПП. Для тех, кто нуждается в более подробной информации, Руководство пользователя по прогностической продукции ЕЦСПП (<http://www.ecmwf.int/products/forecasts/guide/>) Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды содержит всеобъемлющий руководящий материал по использованию систем ЕЦСПП, включая подробные рекомендации по использованию САП; учебные материалы КОМЕТ (https://www.meted.ucar.edu/training_detail.php?orderBy=&topic=15) также предоставляют возможность практического обучения использованию САП.

Как правило, настоятельно рекомендуется, чтобы информация о неопределенности сообщалась в рамках каждого прогноза. Соответствующий руководящий материал представлен в *Guidelines on Communicating Forecast Uncertainty* (Руководящие принципы представления неопределенности прогнозов) (PWS-18, WMO/TD-No. 1422).

Примеры, приведенные в настоящих руководящих указаниях, в основном взяты из САП Системы глобального и регионального ансамблевого прогнозирования (MOGREPS) Метеорологического бюро Соединенного Королевства или САП ЕЦСПП, однако описанные принципы применяются к любой САП.

2. ПОЧЕМУ МЫ ДОЛЖНЫ ИСПОЛЬЗОВАТЬ САП?

Системы численного прогнозирования погоды с использованием новейших численных моделей атмосферы представляют собой очень мощные системы, которые помогают прогнозисту в производстве прогнозов погоды. Многие модели в

настоящее время обеспечивают достаточно хорошее отображение метеорологических условий и также могут применяться для подготовки основных автоматизированных прогнозов погоды на основе непосредственной выходной продукции моделей (ДМО), хотя, как правило, рекомендуется использовать некоторую последующую обработку для калибровки автоматизированных прогнозов. Непосредственная выходная продукция моделей обеспечивает лучшее воспроизведение некоторых метеорологических элементов в отличие от других, например, приземная температура зачастую представлена очень хорошо (по крайней мере, вдали от пересеченной орографии поверхности), в то время как осадки зачастую представлены гораздо хуже.

Однако, несмотря на эти достижения, общеизвестно, что прогнозы даже на базе самых лучших моделей часто оказываются весьма неверными. Это наиболее очевидно в прогнозах на несколько суток и обусловлено хаотичной природой атмосферы. Мы прогнозируем погоду, запуская модель по результатам анализа состояния атмосферы на основе последних наблюдений, которые ведутся по всему миру. Затем модель рассчитывает, как параметры атмосферы будут изменяться и развиваться в ближайшие дни, основываясь на этом предварительном анализе состояния атмосферы. Теория хаоса подразумевает, что изменение атмосферных процессов очень восприимчиво к незначительным ошибкам в этом предварительном анализе, таким образом, очень маленькая ошибка (зачастую слишком незначительная для прогнозиста, чтобы ее заметить) может привести к значительной ошибке в прогнозе. Даже располагая данными оптимальных наблюдений, мы никогда не сможем выполнить безукоризненный анализ, и поэтому мы не можем составлять идеальные прогнозы. Вот почему мы используем САП (ансамбли).

В ансамблевом прогнозе мы вносим очень небольшие изменения (возмущения) в анализ, а затем заново прогоняем модель со слегка возмущенными начальными условиями. Если разные прогнозы в ансамбле все очень похожи друг на друга, тогда мы можем быть уверены в нашем прогнозе, однако если все они развиваются по-разному, как, например, когда некоторые из них показывают развитие сильного шторма, в то время как другие дают гораздо более слабую депрессию, тогда мы будем гораздо меньше уверены в прогнозе. Вместе с тем, обращая внимание на соотношение членов ансамбля, которые прогнозируют шторм, мы можем оценить, насколько шторм вероятен.

Когда мы рассматриваем более краткосрочные прогнозы на 1 или 2 суток, общая метеорологическая обстановка обычно гораздо более предсказуема, тем не менее, мы опять же сможем найти существенные различия между членами ансамбля в тех случаях, когда мы обращаем внимание на локальные элементы погоды, которые могут иметь большое значение для многих пользователей прогнозов. Кроме того, время от времени широкомасштабная эволюция может быть неопределенной даже на короткие сроки — это вероятнее всего происходит во время развития сильных штормов, поэтому важно учитывать САП даже в краткосрочных прогнозах.

3. ТИПЫ САП

Существуют три основных типа САП для применения в прогнозировании погоды – глобального, регионального и конвективного масштабов, и, как и в случае с моделями детерминированного ЧПП, они охватывают различные временные масштабы в прогнозе. Они будут кратко рассмотрены ниже. В каждой из этих категорий существует множество вариаций, например, то, каким образом появляются возмущения и как используются модельные вариации в самих моделях; тем не менее, принципы использования ансамблей остаются теми же, но в настоящей публикации эта информация подробно не приводится. (Можно отметить, что ансамбли также используются для долгосрочного прогнозирования и предсказания климата.

Принципы очень схожи, но они не будут рассматриваться в этих руководящих указаниях, которые сосредоточены на прогнозах с заблаговременностью до 15 дней, т.е. на периоде, в течение которого во многих случаях возможно прогнозировать метеорологические условия на каждый день).

3.1 Глобальные САП

Глобальные САП обычно предназначены и используются для среднесрочного прогнозирования на 3-15 суток вперед. Они используют глобальные модели ЧПП и прогоняются с низким разрешением с обычным шагом сетки от 30 до 70 км. Хотя они предназначены, в первую очередь, для использования на средние сроки, их глобальный охват означает, что они также могут использоваться для подготовки краткосрочных прогнозов САП в регионах земного шара, где другие САП недоступны, и могут являться единственным доступным вариантом для многих стран-членов ВМО. В этом контексте они широко используются для подготовки продукции в целях поддержки нескольких проектов в рамках Показательного проекта по прогнозированию явлений суровой погоды (ПППСП).

Прогнозистам, использующим глобальные САП, всегда следует помнить, что относительно низкая разрешающая способность сетки будет ограничивать детали, которые они могут ожидать в прогнозах. Глобальные САП часто не способны представлять такие детали как, к примеру, полная сила скорости ветра во время шторма.

3.2 Региональные САП

САП на основе региональных моделей или моделей по ограниченному району (ЛАМ) используют региональные модели по меньшим по площади районам и больше ориентированы на краткосрочный прогноз на 1-3 дня вперед. Они используют шаг сетки с более высоким разрешением, чем глобальные САП, обычно от 7 до 30 км, что позволяет им прогнозировать больше локальных элементов метеорологических условий, а также лучше воспроизводить интенсивные метеорологические системы. Тем не менее, прогнозист должен помнить об ограничениях разрешения; к примеру, от региональных САП не следует ожидать возможности прогнозирования элементов мелкомасштабных систем, таких как грозы.

Региональная САП должна воспринимать свои граничные условия (метеорологические системы, движущиеся в район из внешней части области) из глобальной САП. Некоторые региональные САП используют региональный анализ с высоким разрешением и рассчитывают соответствующие возмущения с высоким разрешением, а другие просто берут начальные условия и возмущения из той же глобальной САП, которая обеспечивает граничные условия – это обычно называется уменьшением масштаба. В САП уменьшенного масштаба прогноз необходимо прогонять в течение нескольких часов, прежде чем модель сможет «раскрутить» элементы с более высоким разрешением.

3.3 САП конвективного масштаба

ЧПП конвективного масштаба с шагом сетки модели 1-4 км, прогоняемой по относительно небольшому району, теперь имеются в ряде более развитых центров ЧПП. Эти модели, иногда называемые моделями, позволяющими учитывать конвекцию, способны представлять некоторые элементы больших конвективных систем и тем самым могут попытаться спрогнозировать такие элементы как местоположение и интенсивность гроз. Хотя это обеспечивает большие потенциальные возможности для улучшения прогнозов, конвективные системы

развиваются очень быстро и имеют предсказуемость на короткие временные масштабы, в силу чего прогнозы могут перейти в состояние, при котором господствует случайность. Поэтому системы ансамблевого прогнозирования весьма актуальны для ЧПП конвективного масштаба, поскольку конвективная неустойчивость добавляет новый масштаб неопределенности прогноза, не представленной моделями с более низким разрешением и с гораздо более короткими временными масштабами.

Помимо самой конвекции модели с таким разрешением значительно расширили возможности для прогнозирования других характерных особенностей локальных метеорологических условий, таких как низкая облачность и видимость для авиации. Многие из этих явлений в значительной степени подвержены воздействию топографических условий, что может привести к повышению предсказуемости, когда такое воздействие (например, склоны, береговые линии, растительность, альбедо) может быть отображено моделями (например, возникновение конвекции или долинный туман). САП конвективного масштаба имеют возможность представлять информацию о предсказуемости всех этих метеорологических элементов.

На момент написания данных руководящих указаний в 2011 г. САП конвективного масштаба находились в стадии разработки в различных центрах. В Германии Метеорологическая служба Германии запускает систему COSMO-DE-EPS с разрешением 2,8 км в предоперативном режиме с декабря 2010 г. Метеорологическое бюро Соединенного Королевства и Метео-Франс планируют ввести такие системы в ближайшем будущем, кроме того, исследования проводятся и в других странах.

Из-за очень высокой стоимости прогона САП конвективного масштаба вряд ли они будут доступны в течение многих лет за пределами стран-производителей, а опыт их использования до сих пор весьма ограничен. Они лишь кратко рассматриваются в настоящих руководящих указаниях.

Ожидается, что гораздо более высокое разрешение САП конвективного масштаба обеспечит лучшее разрешение многих метеорологических явлений, чем это возможно с глобальной и региональной САП, например, локальных ветров, подверженных воздействию рельефа поверхности, и, по всей видимости, таких элементов, как низкая облачность и видимость, особенно в тех местах, где эти явления подвержены влиянию характерных особенностей местности или поверхности земли.

Применительно к осадкам модели способны лучше представлять интенсивность и пространственные масштабы локальных осадков, в особенности конвективных осадков. Тем не менее, для того, чтобы исследовать весь спектр неопределенности в конвективных осадках, потребуются очень большие ансамбли с сотнями или тысячами членов, которые не будут доступны в обозримом будущем. В связи с этим настоятельно рекомендуется выполнять последующую обработку САП конвективного масштаба, используя такие методы, как обработка соседних значений (где предполагается, что такая характеристика как конвективный ливень может быть реальной, но он может сместиться и произойти где-нибудь в близлежащем районе, скажем, в пределах 10 шагов сетки от того места, где он появляется в модели) для обеспечения более реального пространственного распределения вероятностей. Подобные методы также подходят для других переменных параметров с учетом небольших размеров ансамблей.

4. СТАНДАРТНАЯ ПРОДУКЦИЯ САП

В данном разделе содержится описание некоторых видов стандартной продукции САП, которая генерируется большинством САП, и краткая информация о том, как ее можно использовать.

4.1 Производство основной непосредственной выходной продукции моделей

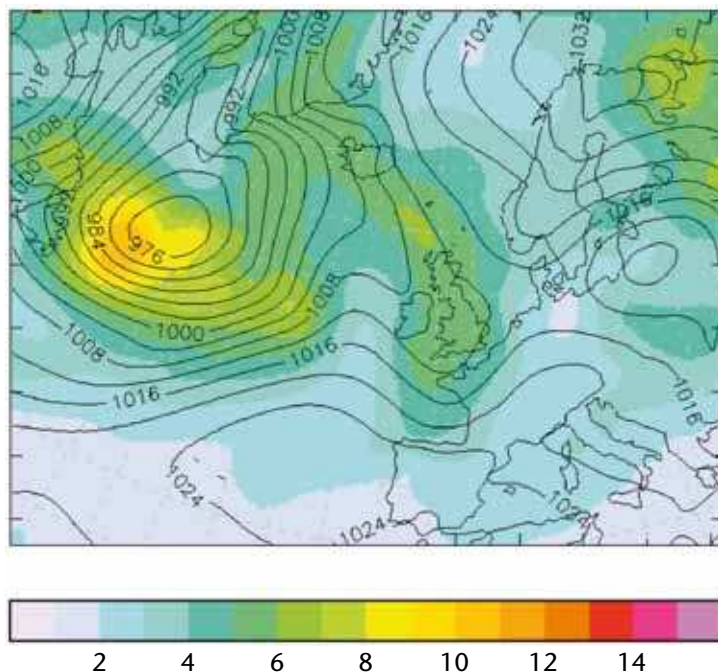
Целый ряд основных видов продукции производится большинством САП непосредственно на основе выходных полей моделей. Как правило, к их числу относятся следующие виды продукции.

4.1.1 Средняя величина по ансамблю

Это простое среднее значение параметра между всеми членами ансамбля. Средняя величина по ансамблю обычно лучше обеспечивает проверку оправдываемости, чем контрольный прогноз по наиболее стандартным оценкам оправдываемости (среднеквадратическая ошибка, средняя абсолютная ошибка, коэффициент временной корреляции аномальных значений и т.д.), поскольку она сглаживает непредсказуемые элементы и просто представляет более предсказуемые элементы прогноза. Это может предоставить хороший ориентир на элемент прогноза, который можно спрогнозировать с уверенностью, но которому нельзя доверять как таковому, т. к. он будет редко улавливать риск наступления экстремальных явлений.

4.1.2 Разброс по ансамблю

Рассчитывается как (несмещенное) стандартное отклонение выходной переменной модели и обеспечивает меру уровня неопределенности параметра в прогнозе. Часто



Источник: Метеорологическое бюро СК, © British Crown Copyright

Рисунок 1. Средние величины (контуры черного цвета) и разброс (заливка разного цвета) для прогноза давления, приведенного к СУМ (на 72 часа)

указывается на картах с наложением средней величины по ансамблю. На рисунке 1 контурами черного цвета показаны величины среднего давления по ансамблю, приведенные к среднему уровню моря (ДСУМ), а заливкой разного цвета – разброс ДСУМ. Районы, выделенные резкими цветами, указывают на больший разброс и, следовательно, более низкую предсказуемость.

4.1.3 **Базовая вероятность**

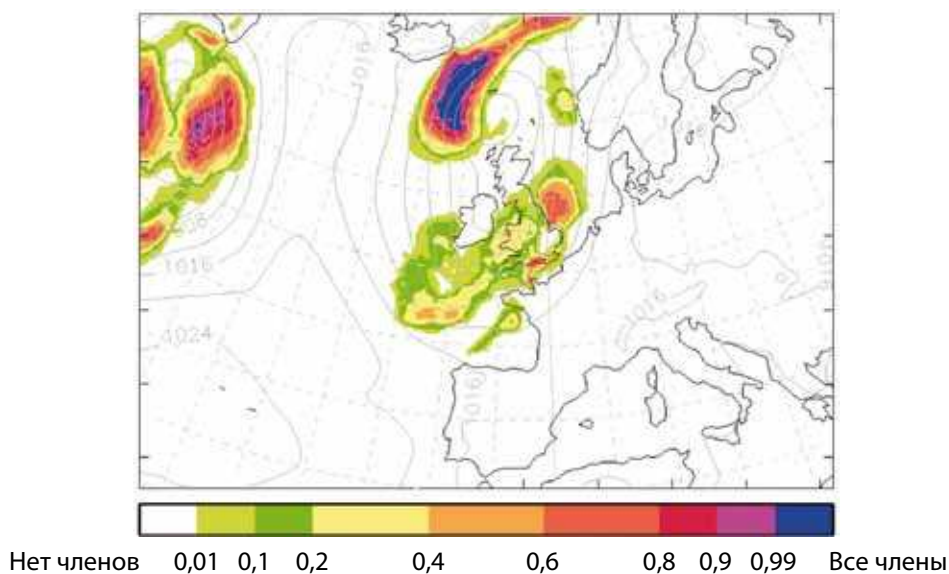
Вероятность часто оценивается как простое соотношение членов ансамбля, которые прогнозируют наступление события в конкретном месте или точке сетки, например, температуру (на уровне 2 м) ниже 0° по Цельсию или более чем одно стандартное отклонение ниже нормы. На рисунке 2 заливкой разного цвета показана вероятность порывов ветра более 40 узлов. Среднее по ансамблю давление, приведенное к СУМ, также включено в виде контуров серого цвета.

Следует отметить, что данное определение вероятности не является истинной байесовской вероятностью, как было бы определено специалистом по статистике, но оно обеспечивает полезную оценку для практических целей. Оно содержит предположение, что модель точно отражает климатическое распределение наступления события. Вероятностные прогнозы, подготовленные таким образом, должны всегда проверяться на больших выборках случаев, чтобы определить степень, с которой прогностические вероятности соотносятся с наблюдаемой частотой.

Пример, приведенный на рисунке 3, был подготовлен для проекта в южной части Тихого океана в рамках более крупного ПППСП.

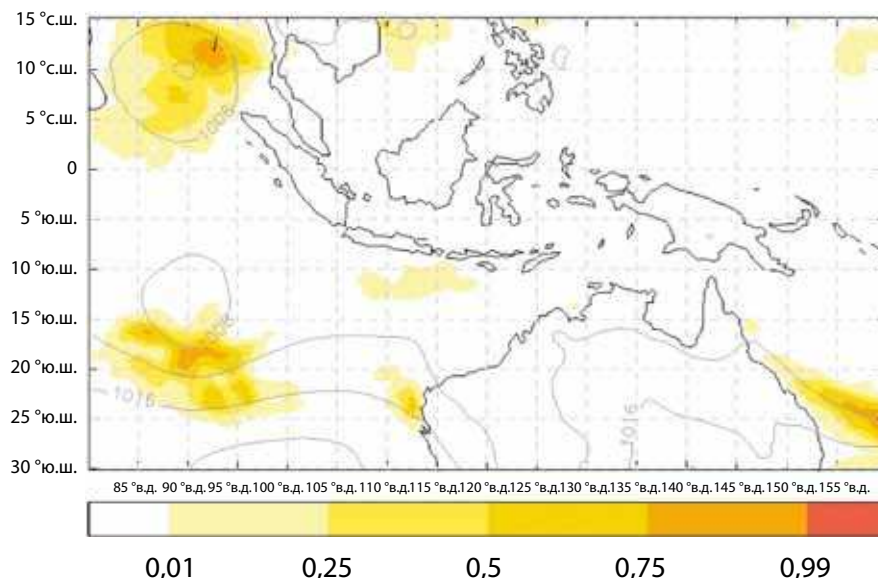
4.1.4 **Квантили**

Набор квантилей распределения ансамбля может обеспечить краткое описание неопределенности. Обычно используются максимальные и минимальные квантили



Источник: Метеорологическое бюро СК, © British Crown Copyright

Рисунок 2. Карта вероятности порывов ветра более 40 узлов по данным региональной системы MOGREPS на 16 июля 2010 г. в 03.00 МСВ (на 21 час от 15 июля 2010 г. в 06.00 МСВ); среднее по ансамблю давление, приведенное к СУМ, нанесено как слабый фон



Источник: Метеорологическое бюро СК, © British Crown Copyright

Рисунок 3. Карта вероятности скорости ветра более 20 узлов на уровне 10 м по данным глобальной системы MOGREPS на 5 ноября 2010 г. в 00.00 МСВ (на 48 часов от 3 ноября 2010 г. в 00.00 МСВ); среднее по ансамблю давление, приведенное к СУМ, нанесено как слабый фон

распределения ансамбля, а также 25-й, 50-й (медиана) и 75-й процентиля. Среди других часто используются 5-й, 10-й, 90-й и 95-й процентиля.

4.1.5 **Карты-спагетти**

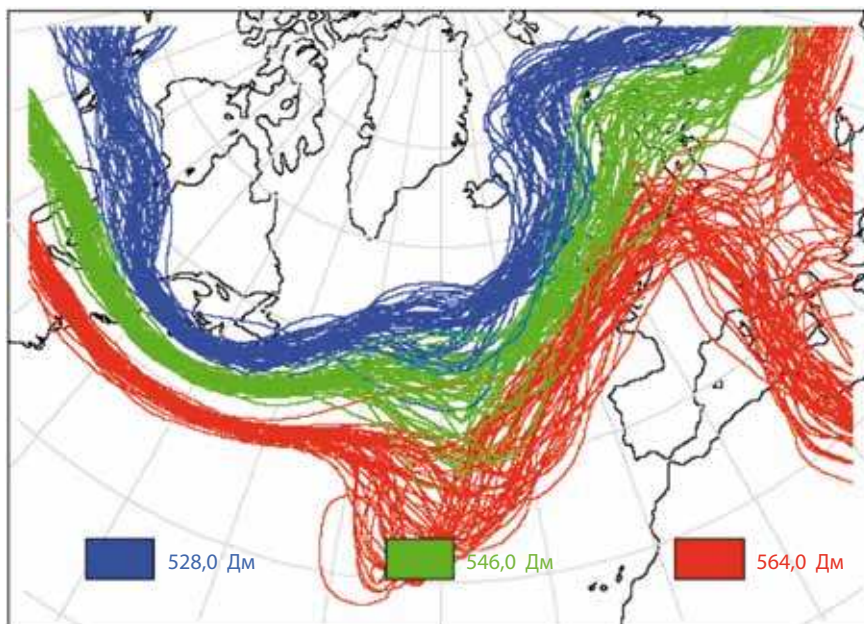
Карты, показывающие несколько выбранных контуров переменных (например, контуры 528, 546 и 564 Дм высоты геопотенциальной поверхности 500 гПа) из всех членов ансамбля, могут дать полезное изображение предсказуемости поля. Там, где все контуры членов ансамбля расположены близко друг к другу, предсказуемость выше; там, где они выглядят как спагетти на тарелке, предсказуемость ниже (см. рисунок 4).

4.1.6 **Карты-почтовые марки**

Набор небольших карт, показывающих контурные диаграммы отдельно взятого члена каждого ансамбля (см. рисунок 5), позволяет прогнозисту рассматривать сценарии в прогнозе каждого члена и оценивать возможные риски экстремальных явлений. Однако это большой объем информации, который, возможно, будет трудно усвоить.

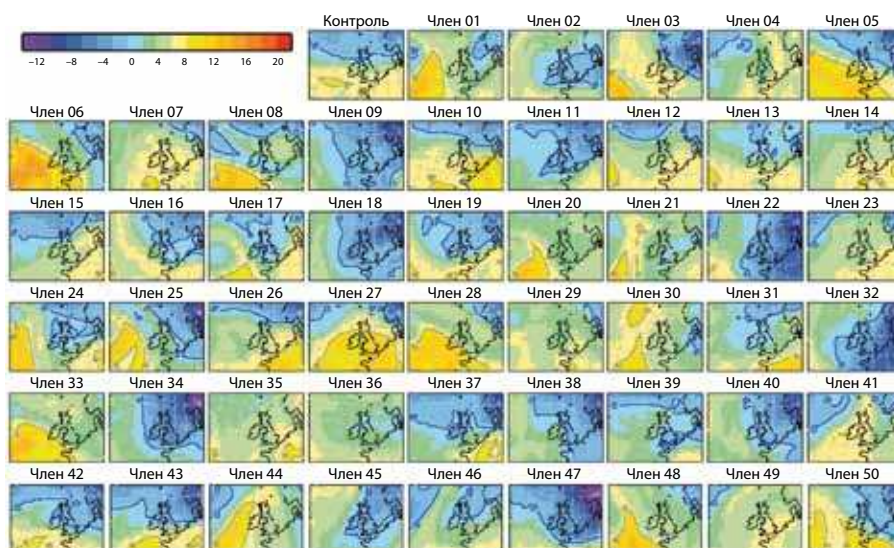
4.1.7 **Метеограммы для конкретных мест**

Выходные переменные модели можно брать из сетки для конкретных мест. Существует множество презентаций, которые могут использоваться для представления прогноза на местах, например, графики шлейфа и вероятности осадков. Одним из наиболее часто используемых средств является метеограмма ансамбля (или САП-грамма), которая использует диаграмму вида «ящик с усами» для иллюстрации основных процентильных пунктов прогностического распределения для одной или нескольких переменных (см. рисунок 6).



Источник: Метеорологическое бюро СК с использованием данных ЕЦСПП, © British Crown Copyright

Рисунок 4. Графики-спагетти ансамблевого прогноза высоты геопотенциала на уровне 500 гПа на 11 февраля 2001 г. в 12.00 МСВ (на 96 часов от 7 февраля 2001 г. в 12.00 МСВ)



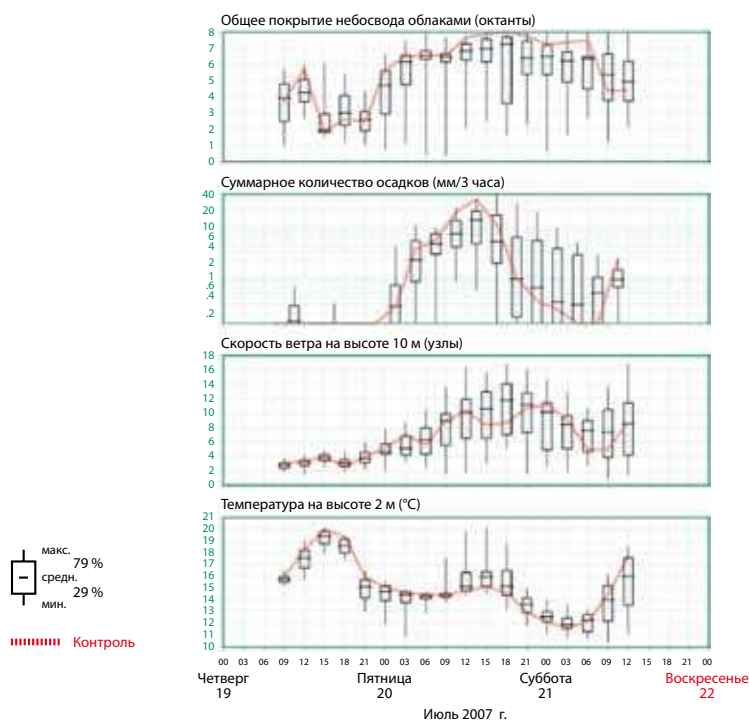
Источник: Метеорологическое бюро СК с использованием данных ЕЦСПП, © British Crown Copyright

Рисунок 5. Карта-почтовая марка на 7 февраля 2009 г. в 12.00 МСВ (потенциальная температура по мокрому термометру на уровне 850 гПа, в градусах Цельсия; на 300 часов от 26 января в 00.00 МСВ)

5. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ, ПРИМЕНИМЫЕ КО ВСЕМ ВИДАМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ САП

В данном разделе представлен ряд общих принципов, применимых ко всем видам использования САП. Последующие разделы содержат более подробную информацию об отдельных видах использования САП для производства конкретных типов прогностической продукции.

- a) САП лучше всего представляет неопределенность отображенных переменных.
 - i) Аэрологические обычно успешнее чем приземные
 - Приземные параметры подвержены неопределенности в масштабе, меньшем шага сетки, которая не устраняется моделью.
 - ii) По мере увеличения разрешения и качества модели, способность прогнозировать приземные метеорологические параметры постоянно повышается.
- b) САП хороша так же как и модель(и), которую(ые) она использует.
 - i) Если модель не способна отобразить определенное явление, САП также не может его представить.
 - Ярким примером является неспособность большинства ансамблей описывать конвективные штормы, что является одной из причин, почему некоторые центры разрабатывают ансамбли конвективного масштаба.



Источник: Метеорологическое бюро СК, © British Crown Copyright

Рисунок 6. Метеограмма европейской САП системы MOGREPS для Брайз Нортон (51,8 °с.ш., 1,6 °з.д.) с 19 июля 2007 г. в 09.00 МСВ по 21 июля 2007 г. в 12.00 МСВ

- ii) САП будет распределять любые систематические погрешности используемой модели.
- c) Как сочетать детерминированный прогноз с ансамблевым/вероятностным?
 - i) Относительные возможности членов ансамбля в сравнении с прогнозом высокого разрешения/контрольным прогнозом.
 - ii) См. [*Guidelines on using information from EPS in combination with single higher resolution NWP forecasts*](#) (Руководящие указания по использованию информации от САП в комбинации с отдельными прогнозами более высокого разрешения в рамках ЧПП) (февраль 2006 г.).
- d) Общий вопрос заключается в том, может ли синоптик улучшить распределение путем повторного взвешивания членов (к примеру, контрольный прогноз с высоким разрешением, если он включен) либо путем отведения некоторых членов.
 - i) Прогнозисты могут предположить, что некоторые члены нереалистичны.
 - ii) Можем ли мы убрать некоторые члены на основе данных последних наблюдений или выбрать «лучший член»?
 - ВОЗМОЖНО, в отношении конкретных прогностических аспектов для прогнозов на очень короткий период и для локальных прогнозов по небольшому району.
 - По большому району или всей области модели контрольный прогноз всегда будет наиболее успешным.
 - НЕ для прогнозов на более длительный период.
 - iii) Такой тип подхода является субъективным и сложным.
 - iv) Настоятельно рекомендуется, чтобы прогнозисты использовали полное распределение САП в вероятностном подходе.
- e) Прогнозисту должны быть известны сильные и слабые стороны имеющихся моделей/ансамблей. Документация должна быть легко доступна для прогнозиста.
 - i) Проверка множества пороговых значений, которые будут доступны.
 - ii) Итоговая документация о достоинствах и недостатках по сезонам.
- f) Будьте осторожны с диагностическими параметрами «на конце цепочки», например, с осадками и облачностью. К примеру, обращайте внимание на распределение индексов в ситуациях конвекции.
- g) Прогнозисты не всегда должны полагаться на прямые выходные модельные данные метеорологических переменных, но должны также рассматривать результаты анализа лучше представленной диагностики, что может оказать помощь в интерпретации прогноза САП (например, синоптические характеристики, внешние факторы/прекурсоры/возможности развития явлений погоды со значительными воздействиями и последствиями, таких как конвергенция влажности, струйные течения в нижних слоях атмосферы, развитие атмосферных процессов в региональном масштабе и конвективная диагностика).

Использование САП (и других вероятностных инструментов) открывает возможность для выпуска двух разных типов прогнозов, полностью вероятностного или детерминированного с дополнительной информацией о неопределенности (к примеру, степень достоверности). То, какой тип используется, влияет на того, кто принимает решения на основе прогноза. Как правило, использование полностью вероятностных прогнозов позволяет всем пользователям адаптировать их решения к своим конкретным потребностям (к примеру, использование оценки экономического ущерба), и в этой связи настоятельно рекомендуется.

6. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ САП В ДЕТЕРМИНИРОВАННОМ ПРОГНОЗИРОВАНИИ

Как правило, настоятельно рекомендуется, чтобы вероятностные прогнозы обеспечивали наилучший и наиболее полный прогноз погоды для пользователей, и их следует рекомендовать, особенно на более длительные периоды заблаговременности. Тем не менее, отмечается, что многим пользователям требуется простой детерминированный прогноз, и если планируется подготовить детерминированный прогноз, использование САП часто может обеспечить более надежный прогноз, чем прогон обычного детерминированного ЧПП. Это особенно касается прогнозов более чем на 1-3 суток вперед и может помочь уменьшить резкие колебания системы прогноза от запуска к запуску в любом диапазоне времени.

Некоторые показатели САП могут использоваться для оптимизации детерминированного прогноза. Средняя величина по ансамблю будет в среднем считаться лучшей по многим стандартным оценкам оправдываемости, но следует помнить, что она будет стремиться сгладить непредсказуемые элементы меньшего масштаба и редко захватывать интенсивность крупных метеорологических систем со значительными воздействиями и последствиями. Поэтому среднюю величину по ансамблю не следует использовать отдельно, если прогноз будет использоваться в отношении потенциальных воздействий явлений суровой погоды. Другими полезными признаками наиболее вероятного прогноза могут быть медиана (центральная точка в ФРВ) или мода (наиболее вероятное значение в ФРВ), которые легче определить для отдельных метеорологических параметров, чем для полной прогностической картины.

Если планируется выпустить детерминированный прогноз, он может иногда дополняться указанием степени достоверности данного прогноза, чтобы воспользоваться преимуществом наличия информации о неопределенности. Степень достоверности не всегда будет одинаковой для всех элементов одного и того же прогноза. Индексы достоверности, если они используются, лучше всего представлять отдельно для каждой переменной. Степень достоверности должна основываться на разбросе по ансамблю, а также с учетом известных ограничений успешности прогноза.

Наилучший подход к выпуску детерминированного прогноза будет зависеть от предсказуемости, на что указывает разброс по ансамблю. Разброс можно анализировать с использованием различных видов продукции, например, диаграмм-спагетти и карт с изображением разброса в синоптическом масштабе, а затем в меньших масштабах с использованием метеограмм, квантилей, кластерного анализа и т. д.

а) Малый разброс в ансамбле (хорошая предсказуемость).

i) В этом случае может быть разумным представить больше деталей в прогнозе.

- ii) Взять за основу контрольный прогноз, контрольный прогноз с высоким разрешением, среднюю величину по ансамблю или медиану (учитывая надлежащим образом необходимость калибровки или коррекции погрешностей).
- iii) Разброс может часто различаться между переменными модели, поэтому небольшой разброс в одном параметре не гарантирует уверенности во всех аспектах прогноза.
 - хорошая предсказуемость синоптического масштаба не всегда означает предсказуемость приземных метеорологических переменных, таких как температура или конвективные осадки.
 - прогнозист должен по-прежнему учитывать неопределенность параметров, не устраненную моделью.
- b) Большой разброс в ансамбле (слабая предсказуемость).
 - i) Избегать чрезмерной детализации в прогнозе.
 - ii) Следует учитывать среднюю величину по ансамблю, но если ансамбль охватывает целый ряд сценариев, средняя величина по ансамблю не обеспечит реалистичный сценарий.
 - iii) В этой ситуации следует взять наиболее представительный член ансамбля (к примеру, наиболее представительный кластер или моду ФРВ) в качестве индикатора наиболее вероятного исхода.
 - Обратите внимание, что наиболее представительный член ансамбля может не дать наиболее вероятное значение для каждого метеорологического элемента (к примеру, наиболее вероятная температура в конкретном месте может не коррелировать с наиболее вероятным количеством осадков).
 - iv) Оценка неопределенности.
 - Рекомендовать пользователям следить за уточнениями прогноза.
 - v) Учитывать экстремальные значения САП и контрольного прогноза с высоким разрешением.
 - Провести тщательную оценку возможных эволюций синоптической ситуации и их потенциального воздействия.
 - Учитывать поведение моделей.
 - Контрольный прогноз с высоким разрешением может лучше отображать определенные явления со значительными воздействиями и последствиями.
- c) На короткие сроки (12-18 часов), вероятно, можно учитывать данные последних наблюдений (3-6 часов в прогнозе), чтобы выбрать сценарий или член ансамбля.
 - i) К примеру, быстро развивающийся циклон можно лучше всего прогнозировать с помощью члена, имеющего лучшее положение спустя несколько часов, но ТОЛЬКО в сверхкраткосрочные сроки.
 - ii) Необходимо помнить о том, что на процесс будущего развития будут влиять события, привносимые восходящим потоком. Это делает невозможным выбор члена для прогнозов, превышающих ~ 24 ч.

- iii) Кроме того, последовательность последних прогонов по отношению к предыдущим является фактором, который необходимо учитывать.
- d) На более длительные сроки, наряду с тем, что вероятностные прогнозы лучше всего подходят для случаев, когда планируется выпустить детерминированный прогноз, использование средней величины по ансамблю или медианы может дать более надежные прогнозы с меньшей скачкообразностью между прогонами прогноза.

6.1 Принятие решений на основе детерминированных прогнозов

Прогнозы погоды полезны только тогда, когда они используются для принятия решений. Часто утверждается, что легче принять решение на основе детерминированного, чем вероятностного прогноза. Вместе с тем, когда прогнозист выпускает детерминированный прогноз, лежащая в его основе неопределенность все еще сохраняется, а он должен сделать лучшую предположительную оценку вероятного исхода. Пока прогнозист полностью не разберется в решении, которое пользователь собирается принять на основе прогноза, и не уяснит последствия различных исходов, его лучшее предположение может не соотноситься надлежащим образом с реальными потребностями пользователя.

- a) Требуется некоторая сумма знаний о потребностях конечных пользователей при выборе решения о выпуске детерминированного прогноза наступления определенного события. Оптимальное решение не может быть принято без учета соотношения «затраты-потери» пользователя. Это соотношение может быть определено с помощью проведения опроса или прямого обсуждения с конечным пользователем.
- b) Когда это целесообразно, прогнозистам необходимо сообщать о рисках и последствиях, связанных с наихудшими сценариями, наряду с информацией о наиболее вероятном исходе.

7. СЦЕНАРИИ

Полезным способом формулирования неопределенности прогноза погоды может быть описание небольшого количества возможных исходов или сценариев вместо сообщения всех деталей вероятностного прогноза. Для некоторых пользователей, привыкших получать детерминированные прогнозы, этот вариант может оказаться более приемлемым. В идеале САП может использоваться для оценки относительной вероятности различных представленных сценариев. В большинстве случаев, чтобы избежать путаницы, наилучшим подходом может стать выпуск наиболее вероятного сценария на основе вышеизложенной рекомендации по выпуску детерминированных прогнозов, а также одного альтернативного сценария. Это во многих случаях может быть худший сценарий, вполне возможно, отражающий низкую вероятность, но вместе с тем показывающий возможность серьезных воздействий и последствий, предполагаемую самыми крайними членами ансамбля. Тем не менее, необходимо проявлять осторожность с тем, чтобы не создавать впечатление, что любой сценарий будет правильным, поскольку истина может легко находиться где-то посередине (или опять же даже отличаться!).

Полезными инструментами в помощь подготовке альтернативных сценариев являются карты-почтовые марки (см. раздел 4.1.6 выше), которые показывают прогнозисту все отдельные прогнозы в ансамбле, или кластеризация (см. раздел 9.3 ниже), которая автоматически группирует члены ансамбля и обеспечивает прогнозиста объективной оценкой возможных сценариев.

8. ПОЛНОСТЬЮ ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ПРОГНОЗЫ

Там, где это возможно, при выпуске прогнозов рекомендуется использовать полностью вероятностный подход. Это обеспечивает полное представление информации о неопределенности, предоставленной САП, а также позволяет пользователям выстраивать процесс принятия решений с учетом их конкретных видов применений.

Вероятностные прогнозы могут выражаться несколькими способами и не всегда должны выражать вероятность словесно, например:

- a) Прогноз метеорологической переменной, выпущенный с «усами» погрешностей, величины которых варьируются в зависимости от разброса по ансамблю;
- b) более полное представление распределения ансамбля, показывающее ряд процентильных значений, как это используется в стандартной продукции метеограмм;
- c) вероятности наступления конкретных (четко определенных) событий, выраженные в виде чисел или контурной заливки на карте.

Когда прогноз представлен в виде вероятности, очень важно четко выразить, для чего эта вероятность, так чтобы она была ясна и понятна как прогнозисту, так и пользователю. Во многих случаях мы говорим о вероятности наступления события; именно это событие и должно быть определено. Зачастую событием может быть превышение порогового значения какой-либо величины (к примеру, более 50 мм дождевых осадков или температура ниже 0° по Цельсию). В идеале это будет что-то, что имеет значительные последствия, в отношении которых кто-либо должен будет принимать решение (например, вероятность того, что на дорогах образуется лед, поэтому понадобится обработка дорог). Также важно определить, когда и где это событие прогнозируется, в частности:

- a) Точное время или период времени, к которым относится прогноз.
- b) Точное место или район, к которым относится прогноз.
 - Если это район, подразумевает ли этот прогноз, что пороговое значение будет превышено где-то конкретно в этом районе или везде по всей его территории?

Хорошей проверкой того, хорошо ли событие спрогнозировано, является вопрос самому себе о том, можете ли вы с легкостью определить, происходит событие или нет (другими словами, можете ли вы проверить оправдываемость прогноза). Если вы не можете с легкостью этого сказать, то вам, возможно, понадобится лучше определить это событие.

Ниже приводится ряд вопросов, которые следует учитывать, основывая вероятностные прогнозы на выходной продукции САП:

- a) Калиброванный, скорректированный по отклонению прогноз может непосредственно выпускаться для конечного потребителя (низкая стоимость).
 - Этот подход допускает возможность выпуска автоматизированных прогнозов для многих пунктов и пользователей.
 - Методы коррекции погрешностей и калибровки рассматриваются в разделе 9.

- b) Непосредственную выходную продукцию моделей из ансамблей следует применять с осторожностью, поскольку она может не обеспечивать надежные вероятностные прогнозы, но все же часто предоставляет ценную информацию. В некоторых случаях использование ДМО может быть важным там, где отсутствует система калибровки – калибровка затруднительна для определенных переменных, таких как осадки, или там, где отсутствуют адекватные наблюдения.
- c) Для производства вероятностных прогнозов исходов, зависящих от более чем одного метеорологического элемента, важно рассчитать этот исход для каждого члена ансамбля, а затем объединить члены для выстраивания вероятностей. Это сохраняет последовательные корреляции между различными метеорологическими переменными, а также различными пунктами (например, соотношение температур между двумя пунктами). Калибровка или последующая обработка могут нарушить эту последовательность.
 - Этот принцип также применяется при использовании ансамбля для прогона моделей влияния на нисходящие потоки (например, гидрологические модели), где модель потока в нисходящем направлении должна прогоняться для каждого члена ансамбля и после этого должна быть рассчитана вероятность воздействия на нисходящий поток.
- d) В «обычных» ситуациях прогнозистам следует стараться не менять вероятностные прогнозы, выпущенные САП (ДМО или прошедшие постпроцессинг). Прогнозы могут выпускаться непосредственно для населения. Прогнозисты должны сосредоточить внимание на «необычных» ситуациях.
- e) В «необычных» ситуациях вероятностные прогнозы могут адаптироваться прогнозистами с использованием, к примеру, опыта, аналогов и концептуальных моделей. Синоптики могут делать поправки на некоторые известные погрешности систем или недостатки моделей. Поправки следует делать с использованием руководящих указаний, упомянутых в разделе 9.
- f) Исследования показали, что широкий круг лиц способен принимать более взвешенные решения, когда этим лицам предоставляется информация о неопределенности в прогнозах, а не детерминированный прогноз. Когда информация о неопределенности не предоставляется, люди делают собственные предположения.
- g) Вероятности должны представляться в исчерпывающей графической форме. Примеры и руководящие принципы содержатся в публикации [Guidelines on Communicating Forecast Uncertainty](#) (Руководящие принципы представления неопределенности прогнозов) (PWS-18, WMO/TD-No.1422).
- h) Необходимо определять вероятности событий, относящихся к конкретным видам применений. Это предусматривает, например, применения в сельском хозяйстве, где наступление засухи или периода дождей влияет на орошение, посев и сбор урожая.
- i) Риск представляет собой сочетание вероятности явления и его потенциального воздействия, которое может оценить САП. Это обеспечивает объективную и ценную основу прогнозистам для принятия решений с тем, чтобы оценить различные уровни предупреждения. Информация о воздействии должна доводиться до сведения соответствующих органов власти и согласовываться с ними (пользователи метеорологического обслуживания населения). Обычно климатология предоставляет хорошие рекомендации для установления пороговых значений явлений, которые оказывают воздействие. Пороговые значения могут быть адаптированы с учетом последних изменений различных

параметров окружающей среды (последние накопления осадков влияют на насыщенность почв, лиственной покров растительности, снежный покров и т.д.).

- j) Рекомендуется, чтобы прогнозист добавлял письменный комментарий или предупреждение в случаях, когда устанавливается вероятность возникновения метеорологических явлений со значительными воздействиями и последствиями.

9. ПОСТПРОЦЕССИНГ

Цель настоящих руководящих указаний заключается в предоставлении разъяснений и рекомендаций по постпроцессингу с использованием статистических динамических и других подходов для улучшения выходной продукции САП. Существует множество методов, и некоторые наиболее распространенные из них рассматриваются в данном разделе. Некоторые методы довольно универсальны и могут лучше всего применяться производителями САП у источника, в то время как другие довольно специфичны для применений и могут лучше применяться конкретно для отдельных пользователей.

9.1 Статистический постпроцессинг

В общих чертах статистический постпроцессинг необходим для того, чтобы исправлять систематические ошибки в моделях и тем самым повышать эффективность непосредственной выходной продукции ЧПП. Эти ошибки особенно важны по значению в отношении параметров приземной атмосферы (к примеру, температура на высоте 2 м, влажность на высоте 2 м, скорость ветра на высоте 10 м, осадки и общее количество облачности) и связаны с локальными условиями.

Точнее говоря, статистический постпроцессинг может использоваться для:

- a) Устранения систематических погрешностей;
- b) регулирования разброса по ансамблю;
- c) количественной оценки неопределенности, не представленной напрямую САП;
- d) прогнозирования тех параметров, которые модель не может представить в явном виде (например, плохая видимость).

Как правило, статистические методы проще применять к одним типам модельных выходных переменных, чем к другим. С температурой воздуха часто относительно просто, например, потому, что это непрерывная переменная, которая изменяется относительно плавно в полях модели, и, что самое главное, распределение ошибок температуры часто близко к стандартному. В противоположность этому, с осадками дело обстоит особенно сложно, поскольку поля осадков часто имеют большую многомасштабную структуру, которая слабо представлена моделями, особенно в небольших масштабах. Их климатологическое распределение, а, следовательно, и распределение ошибок прогноза ограничено 0 на одном конце и зачастую крайне неравномерно, что делает осадки гораздо более сложными для представления статистически. Иногда проблему можно уменьшить путем преобразования распределения, чтобы сделать его более квазинормальным, но, как правило, методы постпроцессинга для осадков значительно менее эффективны, чем для других переменных.

9.1.1 ***Коррекция погрешностей первого момента функции распределения вероятностей***

Такой постпроцессинг аналогичен методам статистики выходной продукции модели (МОС), применяемым для отдельных моделей, но с некоторыми важными различиями. Применительно к ансамблям, хорошо известно, что традиционная МОС, подготовленная специально для каждого периода заблаговременности прогноза, приведет к значительному уменьшению разброса по ансамблю при более длительном периоде заблаговременности. Вместо этого рекомендуется использовать метод псевдо-совершенных прогнозов. Этот метод основан на использовании статистических моделей МОС, рассчитанных на первые 24 часа прогноза и затем применяемых ко всем соответствующим этапам на всех периодах заблаговременности прогноза.

Рекомендуется использовать такие адаптивные методы как фильтр Калмана, чтобы поправки обновлялись автоматически для учета изменений модели (обновлений) и изменений в сезоне.

В случае одномодельных ансамблей (т. е. когда одна и та же модель используется для всех членов, даже если реализуются возмущения модели) та же самая статистическая модель должна подготавливаться с использованием контрольного прогноза и применяться ко всем членам ансамбля.

В случае мультимодельных или мультифизических ансамблей (т. е. когда для построения ФРВ используются различные модели или применяются систематически различные модельные версии, например, различные схемы параметризации) специальная статистическая модель должна подготавливаться и применяться к каждой модельной версии.

В любом случае, для развития этих статистических моделей требуется обучающий набор выходной продукции моделей (предикторы) и наблюдений (предиктанты). В случае таких адаптивных методов как фильтр Калмана этот обучающий набор непрерывно обновляется из ежедневных прогнозов.

«Наблюдениями» могут быть как наблюдения для конкретных пунктов, так и наилучший имеющийся набор анализа. В случае наблюдений для конкретных пунктов статистический постпроцессинг приведет к локальным прогнозам (т. е. в каждом конкретном месте, где имеются наблюдения). Когда используется анализ, конечной продукцией является скорректированный на систематическую погрешность и нанесенный на сетку прогноз уменьшенного масштаба.

Следует отметить, что, когда различные метеорологические переменные параметры независимо корректируются на систематическую погрешность, некоторые корреляции между переменными, представленными различными членами ансамбля, могут быть потеряны. По этой причине прогнозисты могут предпочитать рассматривать непосредственную выходную продукцию модели.

9.1.2 ***Калибровка более высоких моментов функции распределения вероятностей***

Устранение погрешностей для второго момента ФРВ часто называют «калибровкой». Она направлена на повышение надежности вероятностного прогноза. Поэтому данный вид постпроцессинга характерен для систем ансамблевого прогнозирования и, что особенно важно, для оптимизации вероятностных прогнозов. Что касается коррекции погрешностей для первого момента, калибровка основана на локальных условиях и требует высококачественных наблюдений или анализа в качестве эталона.

Существует ряд методов, находящихся в стадии разработки, которые направлены на калибровку как первого, так и второго моментов ФРВ для оптимизации полного распределения, к числу которых относятся:

- a) метод, разработанный в Вашингтонском университете Соединенных Штатов Америки, в настоящее время считается одним из лучших для решения этой задачи. Этот метод, называемый усреднением байесовской модели, основан на конкретных статистических допущениях, например, нормальное распределение для температуры;
- b) статистическая обработка выходных данных модели ядерного распределения ансамбля (EKDMOS) является еще одним методом, который внедряется.

Приведенные выше методы обычно применяются к таким переменным как температура воздуха и скорость ветра. Такие переменные как осадки сложнее корректировать из-за особенностей поведения ФРВ и локальной изменчивости наблюдений. Некоторые конкретные подходы находятся в стадии разработки, но методы постпроцессинга в настоящее время менее успешны и могут не обеспечить значительного улучшения по сравнению с первичной выходной продукцией моделей.

Следует отметить, что существуют ограничения потенциальной возможности статистического постпроцессинга, особенно в случае явлений суровой погоды. Обычно калибровка повышает статистическую надежность вероятностных прогнозов (согласованность прогностических вероятностей с частотой наблюдений явления), но уменьшает разрешение прогнозов (способность различать, произойдет событие или нет). Иногда оказывается, что калибровка улучшает прогнозы распространенных явлений, но ослабляет вероятность более экстремальных явлений. Основная причина этого состоит в том, что наблюдения такого рода явлений бывают редкими, и статистические распределения обучаются более распространенным явлениям. Поэтому в этом случае не следует ожидать, что калибровка обеспечит значительное улучшение по сравнению с первичными прогнозами.

Предпринимались некоторые попытки разработки методов постпроцессинга напрямую для прогнозирования более экстремальных явлений, например систем предупреждения опасных явлений погоды первого приближения. В этих случаях системы могут калиброваться специально для оптимизации надежности экстремальных пороговых значений. Тем не менее, интерпретация экспертами по-прежнему особенно важна для оценки опасности экстремальных явлений.

9.2 Уменьшение масштаба

Существует ряд методов, которые могут использоваться для добавления некоторых локальных деталей в прогнозы на базе моделей с более низким разрешением, и эти методы могут применяться к прогнозам САП, равно как и к детерминированным ЧПП.

9.2.1 *Динамическое уменьшение масштаба*

Динамическое уменьшение масштаба можно определить как использование модели ЧПП для ограниченных районов с более высоким разрешением для добавления детализации, обусловленной элементами рельефа поверхности, и представления мелкомасштабных процессов, таких как конвекция. В идеале все члены ансамбля будут уменьшены в масштабе, но если финансовые ограничения препятствуют этому, можно уменьшить масштаб выборочного набора членов. В динамическом уменьшении масштаба начальные условия, граничные условия и возмущения берутся непосредственно из членов САП с более низким разрешением. Необходимо

соблюдать осторожность для обеспечения надлежащего уменьшения масштаба с целью обеспечения эффективности модели с высоким разрешением, к примеру, соответствующих соотношений размеров сетки и скорости обновления граничных условий. Эффективность модели должна тщательно тестироваться по области. Многие ЛАМ и САП конвективного масштаба являются системами динамического уменьшения масштаба из глобальных ансамблей.

9.2.2 ***Топографическое уменьшение масштаба с использованием простых физических моделей***

Для некоторых параметров, таких как температура на уровне 2 м и скорость ветра на уровне 10 м, может применяться простое уменьшение масштаба, используя взаимосвязь с рельефом поверхности. Например, в прогнозах приземной температуры может использоваться вертикальный градиент для уменьшения масштаба поля САП с низким разрешением до сетки с более высоким разрешением с использованием нанесенного на сетку рельефа. На рисунке 7 показано распределение вероятности сильного ветра с уменьшенным масштабом, полученное из региональной САП с использованием топографического поля высокого разрешения, а также показано, как можно определить значения вероятности ветров над горами в Шотландии, которые были пропущены версией ДМО этой карты.

9.2.3 ***Извлечения данных по конкретным географическим пунктам***

Прогнозы по конкретным географическим пунктам могут генерироваться путем извлечения данных из сетки модели. В простейшей программной реализации прогностического алгоритма данные просто берутся из ближайшей точки сетки модели или интерполируются между ближайшими точками сетки с помощью линейной интерполяции. Для улучшения этих подходов используются различные методы с применением методов, сходных с методами уменьшения масштаба. В частности, в приземную температуру и скорость ветра должны вноситься поправки для учета разницы между модельной топографией и истинной высотой пункта. Интеллектуальная система отбора точек сетки, которая выбирает наиболее представительные точки сетки, может также оказаться лучше, чем простая интерполяция, особенно вблизи береговых линий, где, возможно, лучше выбрать ближайшую точку суши, чтобы представить пункт на суше, а не, к примеру, ближайшую точку сетки, которая может быть над морем. Этот подход, кроме того, может быть полезным вблизи мест с пересеченной топографией.

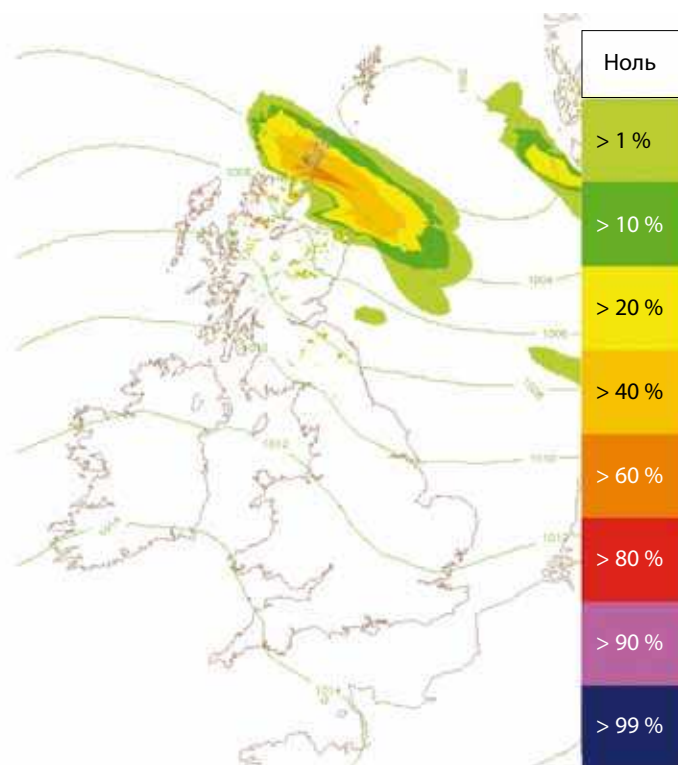
Для специализированных видов применений прогнозов также можно использовать одномерную модель, например, одномерные модели тумана для аэропортов.

9.2.4 ***Статистическое уменьшение масштаба***

Уменьшение масштаба приземных полей можно выполнить также путем выстраивания статистической взаимосвязи между полями модели с низким разрешением и анализом с высоким разрешением. Ниже приведены два подхода, которым можно следовать.

9.2.4.1 **Использование различий в анализе**

Статистическую взаимосвязь можно выстроить путем сравнения нанесенных на сетку анализов с высоким разрешением и соответствующих полей анализа на сетке модели САП. Это обеспечивает вектор уменьшения масштаба, который может потом применяться к полям прогноза САП для обеспечения скорректированных на



Источник: Метеорологическое бюро СК, © British Crown Copyright

Рисунок 7. Вероятности сильного ветра на 5 августа 2011 г. в 09.00 МСВ (на 15 часов), рассчитанные по данным регионального компонента MOGREPS-R после уменьшения масштаба выходных полей модели с шагом сетки 2 км с использованием поля орографических возмущений с высоким пространственным разрешением. Обратите внимание на высокие значения вероятности сильного ветра над горными районами северо-восточной части Шотландии, показанные в результате даунскейлинга.

погрешность полей прогноза уменьшенного масштаба на сетке с высокой разрешающей способностью.

9.2.4.2 Фильтр Калмана

Подход с использованием фильтра Калмана может применяться в каждой точке сетки с высокой разрешающей способностью для выстраивания статистической взаимосвязи с полями анализа САП более низкого разрешения. Фильтр Калмана может затем применяться к полям прогноза САП для обеспечения скорректированных на погрешность полей прогноза уменьшенного масштаба на сетке с высокой разрешающей способностью.

9.2.5 **Диагностика погодных явлений со значительными воздействиями и последствиями**

Существует ряд методов диагностики конкретных погодных явлений со значительными воздействиями и последствиями на базе моделей ЧПП, которые в равной степени могут применяться к САП. Хорошим примером является диагностика сильной конвекции. Здесь часто используется многоуровневая выходная продукция нескольких моделей для диагностики неустойчивости и потенциальной возможности

сильной конвекции, и обеспечиваются вероятности таких явлений как крупный град, торнадо и конвективные порывы ветра.

9.2.6 ***Уменьшение масштаба за счет комбинации САП низкого разрешения и контрольного прогноза высокого разрешения***

Поля возмущений ансамбля с низким разрешением (разница между возмущенным прогнозом члена и контрольным прогнозом) могут быть добавлены к полям контрольного прогноза с высоким разрешением для обеспечения вероятностного прогноза с высоким разрешением.

9.3 **Методы кластеризации**

Для синтеза огромного объема информации, содержащейся в ансамблях, могут использоваться процессы классификации. Могут использоваться различные типы классификации, а именно:

- a) Кластеризация направлена на группирование членов, которые в наибольшей степени схожи в их эволюции по определенному географическому региону, представляющему интерес. Существует несколько стандартных алгоритмов кластеризации, которые могут давать различные результаты. Результат кластеризации также зависит от выбранных переменных;
- b) «трубная» классификация определяет центральный кластер членов, которые наиболее близки к средней величине по ансамблю, и те члены, которые значительно всего отличаются от средней величины по ансамблю (экстремальные значения трубки). «Трубная» классификация полезна для определения наиболее вероятного исхода, а также возможных сценариев, сильнее всего отличающихся от этого решения;
- c) классификация прогнозов путем сопоставления членов ансамбля с определенным набором режимов потока, например, типами макросиноптических положений, определенными для Центральной Европы. Этот метод может обеспечить кластеризацию, которая лучше всего оправдывает синоптические ожидания прогнозиста.

9.4 **Использование повторных прогнозов**

Исследования показали, что калибровка ансамблевых прогнозов с использованием исторических наборов повторных прогнозов – прогнозов, прогоняемых с той же самой моделью или САП из набора исторических случаев, инициированных из повторного анализа, – может быть очень эффективной для повышения качества и надежности вероятностных прогнозов. Такие повторные прогнозы обеспечивают улучшенный обучающий набор данных для методов статистической последующей обработки по сравнению с использованием последних прогнозов, т. к. они обеспечивают улучшенную выборку различных режимов и типов погоды. Это может быть особенно полезно для оптимизации калибровки прогнозов редких или экстремальных явлений. Однако, прогон повторных прогнозов существенно увеличивает вычислительные затраты на прогон САП, а также зависит от наличия подходящего набора данных повторного анализа для обеспечения начальных условий. В результате очень мало САП в настоящее время имеют в наличии наборы данных повторных прогнозов, но их использование рекомендуется там, где это возможно. В случае отсутствия полного набора данных повторных прогнозов альтернативой может являться использование последнего архива прогнозов САП из

той же системы, хотя это, вероятно, обеспечит менее надежную выборку всего модельного климата.

9.4.1 *Индекс чрезвычайного прогноза*

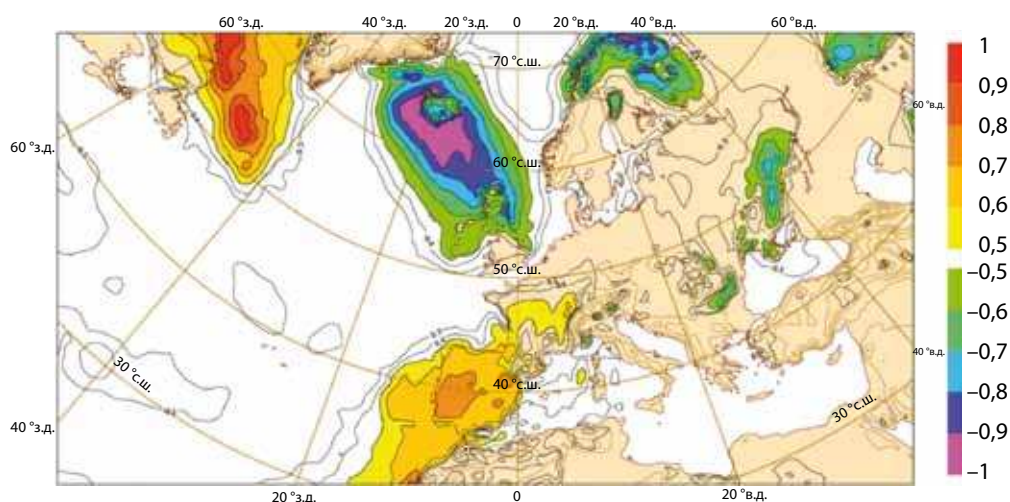
Одним из применений повторных прогнозов является вычисление индекса чрезвычайного прогноза (ИЧП).

Модели ЧПП и САП не точно воспроизводят климат реальной атмосферы, и экстремальные явления могут быть лучше всего определены по отношению к климатологии модели. Индекс чрезвычайного прогноза, разработанный в ЕЦСПП (см. рисунок 8), позволяет определить прогнозы, которые являются экстремальными по отношению к модельному климату, обеспечивая оповещение о риске суровой погоды, но не предоставляют в явном виде информации о вероятности опасных явлений.

Повторные прогнозы могут также использоваться для оценки суровости прогноза по отношению к климатологическим периодам повторяемости, что может являться полезным способом сообщения об опасности явления.

9.4.2 *Соотношение квантилей*

Еще одним подходом к калибровке прогнозов, который может быть использован там, где доступна оценка модельного климата, является соотношение квантилей. Например, значение, соответствующее 90-му процентилю модельного климата, может интерпретироваться как 90-й процентиль реального наблюдаемого климатического распределения для конкретного места. Как правило, этот метод требует использования набора данных повторных прогнозов для обеспечения модельного климата.



Источник: ЕЦСПП

Рисунок 8. Индекс чрезвычайного прогноза (температура воздуха на уровне 2 м) на период 6-7 января 2011 г. с 00.00 до 00.00 МСВ (на 60-84 часа от 3 января 2011 г. в 12.00 МСВ)

9.5 Отслеживание характеристик

Полезным методом для САП с более низким разрешением, к примеру, глобальной САП, является отслеживание метеорологических характеристик в каждом члене ансамбля. Хотя модель не обеспечивает надлежащее представление тропических циклонов, тропические циклоны являются хорошим примером метеорологической характеристики, перемещение которой тем не менее хорошо прогнозируется глобальными моделями. От глобальной САП не следует ожидать способности прогнозировать интенсивность сильных ветров или сильного дождя в тропическом циклоне, но она может отслеживать его положение. Прогнозист может интерпретировать вероятности суровой погоды, зная характеристики тропических циклонов в сочетании с информацией по ансамблю о том, куда он, скорее всего, направится. На рисунке 9 показаны траектории урагана *Томас* в членах ансамбля (слева); вероятности того, что шторм пройдет вблизи мест на карте (в центре), а также сводные траектории, такие как средняя траектория по ансамблю (справа). Эти типы графиков обычно выпускаются для региональных специализированных метеорологических центров по тропическим циклонам.

10. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ САП В ПРОГНОЗИРОВАНИИ СУРОВОЙ ПОГОДЫ И ВЫПУСК ПРЕДУПРЕЖДЕНИЙ

Явления суровой погоды или погодные явления со значительными воздействиями и последствиями происходят в широком диапазоне масштабов во времени и пространстве от тропических циклонов, внетропических циклонов, муссонов, зимних штормов и других крупномасштабных систем до систем меньшего масштаба, таких как локальные сильные штормы, орографические осадки, грозы и торнадо. Прогнозисты должны принимать во внимание различную предсказуемость различных типов событий (например, не пытаться прогнозировать грозу за три дня).

Хорошо структурированная система предупреждений о явлениях суровой погоды национальной метеорологической и гидрологической службы (НМГС) должна иметь в своем распоряжении соответствующие пороговые значения, периоды заблаговременности составления прогнозов и уровень обслуживания, согласованные с пользователями. Обычно пороговые значения должны отражать уровень воздействия, которое, как ожидается, метеорологические условия будут оказывать на общество, включая степень опасности для жизни людей и имущества, а также дестабилизацию повседневной жизни. Стоит учитывать следующие характерные особенности системы предупреждений:

- a) Типы предупреждений; регионы; пороговые значения (суровость/воздействие и вероятность).
 - i) $\text{Риск} = \text{вероятность} \times \text{воздействие}$
- b) Хорошая система предупреждений – это система, легко понятная пользователям, имеющая стандартизированные пороговые значения, которые соблюдаются прогнозистами.
 - i) Многие страны в настоящее время используют четырехцветную систему «светофор» (зеленый, желтый, янтарный и красный), показывающую различные уровни риска и соответствующие уровни действий, которые пользователи должны предпринять.
- c) Хорошей системе предупреждений необходима обратная связь пользователей с НМГС. В свою очередь, НМГС нужно поддерживать обратную связь с

производителями продукции, предоставляя им возможность создавать соответствующие виды продукции.

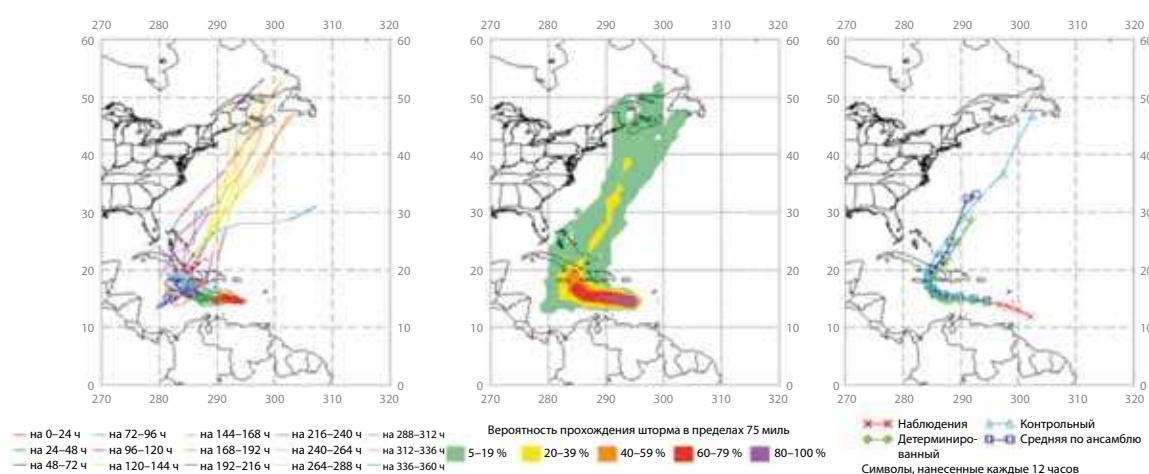
Системы ансамблевого прогнозирования являются мощным инструментом в прогнозировании явлений суровой погоды. Для систем предупреждений, учитывающих воздействия, САП могут использоваться с тем, чтобы помочь оценить вероятность опасных явлений погоды для использования при расчете степени риска = вероятность $\times$ воздействие. Тем не менее, САП могут, в частности, предсказывать явления суровой погоды, которые могут быть представлены моделью или моделями. В противном случае применяется нижеследующее:

- a) Численный прогноз погоды имеет ограничения четкого воспроизведения явлений более мелкого масштаба, что приводит к недооценке вероятности экстремальных явлений в САП;
- b) иногда САП могут определять предшествующие условия для развития явлений суровой погоды или благоприятную крупномасштабную среду, например, конвективные индексы;
- c) САП более низкого разрешения (глобальные) в меньшей степени могут воспроизводить детали экстремального явления;
- d) региональные САП, которые обычно имеют более высокое разрешение, должны обеспечивать более детализированную оценку неопределенности в меньших масштабах.

Пороговые значения опасных явлений, используемые в САП, возможно, понадобится откалибровать с тем, чтобы учесть вышеуказанные ограничения.

Заблаговременное отображение некоторых экстремальных явлений будет прогнозироваться в хвосте распределения ансамбля.

- a) Поэтому прогнозисты и пользователи не должны игнорировать явления с низкой вероятностью, особенно, если это очень редко встречающиеся явления.



Источник: Метеорологическое бюро СК, © British Crown Copyright

Рисунок 9. Продукция по тропическим циклонам экспериментального 15-дневного ансамбля системы MOGREPS, показывающая траектории урагана Томас по прогнозу, выпущенному 1 ноября 2010 г.

- i) К примеру, игнорируя вероятности ниже 20 процентов или даже 10 процентов, можно упустить наиболее важные явления, сигнализируемые САП.
- ii) Чтобы иметь возможность использовать низкие вероятности, прогнозистам нужна информация о результатах проверки оправдываемости прогнозов.
- iii) «Ложная тревога» – это на самом деле правильные характеристики низких вероятностей. Тем не менее, низкие вероятности могут потребоваться в случаях возможных ситуаций со значительными воздействиями и последствиями.
- iv) ожидается, что вероятность будет возрастать по мере наступления явления – обычно, но не во всех случаях.

Экстремальное явление может также прогнозироваться в основном правильно, но с ошибками или неопределенностями в местоположении или во времени.

Синоптическая интерпретация (например, отслеживание метеорологических характеристик, использование аналогов) или инструменты статистического уменьшения масштаба – это способы повышения успешности основных САП.

- a) Отметим, что для некоторых статистических методов требуются большие выборки данных для обучения, и они могут быть не совсем пригодны для редко встречающихся или экстремальных явлений.
- b) Продукция, необходимая для отслеживания циклонов (как тропических, так и внетропических циклонов), может содержать полезную обобщенную информацию о развитии штормов со значительными воздействиями и последствиями.
- c) Существует потенциальная возможность разработки большего числа методов диагностики, основанной на выделении признаков для слабо воспроизводимых систем суровой погоды.

Индекс чрезвычайного прогноза может быть полезным инструментом предупреждения прогнозистов о потенциальном опасном явлении.

- a) ИЧП не обеспечивает явную вероятность отдельных явлений и должен интерпретироваться в совокупности с другими инструментами.
- b) В настоящее время только небольшое количество систем могут обеспечивать ИЧП в связи с потребностью в модельной климатологии.

Рассмотрение данных, полученных от многочисленных прогностических систем (САП и детерминированных), может предоставить дополнительную информацию о вероятности экстремальных явлений.

- a) Проверка оправдываемости прогнозов, демонстрирующая успешность и ограничения САП, имеет важное значение.
 - i) Пользователи САП должны быть осведомлены об этих ограничениях и преимуществах.
 - ii) Однако вследствие низкой повторяемости наиболее экстремальных явлений во многих случаях невозможно обеспечить надежную (или статистически достоверную) проверку вероятностной оценки. Существует

возможность получения некоторой оценки успешности САП применительно к экстремальным явлениям путем экстраполяции на основе проверки оправдываемости прогнозов в отношении менее опасных явлений.

- b) Учитывая, что успешность САП снижается с увеличением периода заблаговременности, достоверность самой последней доступной продукции, как правило, повышается. Тем не менее, предшествующие прогоны САП могут по-прежнему обеспечивать полезную информацию о редком явлении из-за отсутствия разброса (ограничение размера выборки).

11. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЙ СУРОВОЙ ПОГОДЫ

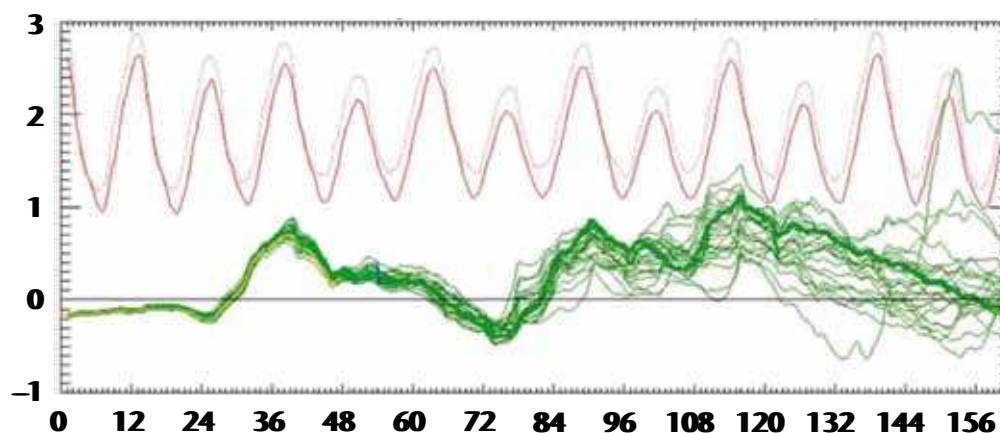
Неопределенность прогноза погоды может распространяться на неопределенность воздействия за счет сопряжения членов ансамбля с моделями воздействия и генерирования распределения прогнозов воздействия. Примерами являются гидрологические модели для вероятностного прогнозирования паводков, модели штормовых нагонов в прибрежных районах и модели волн тепла с точки зрения воздействия на здоровье. Это перспективное применение, которое все чаще применяется в более развитых передовых центрах. На рисунке 10 показан ансамблевый прогноз штормового нагона в расположенном на берегу моря порту, где используется САП для усиления ансамбля с помощью модели штормовых нагонов. Красными линиями в верхней части графика показан уровень опасности наступления нагонной волны, колеблющейся вверх и вниз с приливом, а величина риска нагонной волны указана там, где линии ансамблевого прогноза штормового нагона пересекаются с красными линиями наверху. Это является интересным примером, поскольку один из членов ансамбля дает экстремальный нагон на 7 день, указывая на низкую вероятность опасного затопления прибрежных территорий. В этой ситуации пользователь должен иметь возможность принять некоторые заблаговременные подготовительные меры, но не переусердствовать, поскольку вероятность затопления низка.

12. ПРОВЕРКА ОПРАВДЫВАЕМОСТИ

Проверка оправдываемости прогнозов является очень важной частью всего того, что мы делаем в области прогнозирования. Если мы не будем проверять наши прогнозы – измерять, насколько они хороши, оглядываясь впоследствии назад и видя, насколько точно прогноз соответствовал тому, что произошло фактически, – мы не сможем учиться и совершенствовать наши прогнозы в будущем. Это в не меньшей степени относится и к вероятностным прогнозам. Часто можно встретить людей, которые говорят, что вероятностный прогноз не может быть неправильным (кроме случаев, когда мы говорим 0 процентов или 100 процентов). Некоторые также заявят, что это всего лишь способ для прогнозиста избежать принятия решения. Чтобы оспорить эти утверждения, необходимо продемонстрировать, что мы действительно выполняем проверку этих прогнозов, и что они имеют полезную оправдываемость.

Детализированное руководство по проверке оправдываемости прогнозов здесь не приводится, но отмечаются несколько важных моментов:

- a) Единичный вероятностный прогноз не может быть правильным или неправильным.



Источник: Метеорологическое бюро СК, © British Crown Copyright

Рисунок 10. Ансамблевый прогноз нагонного уровня для г. Лоустофта с 18.00 МСВ 2 октября 2011 г. (сплошные/пунктирные красные линии: уровень предупреждения, при котором штормовой нагон представляет риск затопления, изменяясь соразмерно с уровнем прилива; зеленые/оранжевые линии: ансамблевый/детерминированный прогноз нагонной волны. Опасность затопления возникает, когда нагонная волна превышает уровень предупреждения.)

- i) Если мы прогнозируем что-то с высокой степенью вероятности и это происходит, зачастую возникает соблазн сказать: «Смотрите, мы оказались правы!». Мы должны избегать этого, потому что, когда мы прогнозируем что-то с невысокой степенью вероятности и это происходит, нам захочется сказать пользователю «Мы же говорили, что вероятность была, хотя даже и низкая».
- b) Если мы говорим, что вероятность выпадения дождя с осадками больше 10 мм составляет 30 процентов, а наблюдение показывает, что выпал только 1 мм осадков, прогноз не является правильным или неправильным. Мы должны измерить реальное наблюдаемое количество для многих случаев, когда мы делаем такой прогноз – из каждых 100 раз, когда мы это говорим, мы должны получить осадки более 10 мм на 30 случаев. Это то, что подразумевает прогноз. Из 100 раз, что мы прогнозируем вероятность 80 процентов, мы должны получить ее 80 раз.
- c) Самый простой способ представить проверку оправдываемости – это использовать диаграмму надежности, на которой изображен график зависимости между наблюдаемой частотой и прогнозируемой частотой, т.е. это та самая проверка, описанная выше. На рисунке 11 показаны три примера диаграммы надежности для вероятностей скорости ветра, превышающей 8, 9 и 10 баллов по шкале Бофорта. В идеале линия проходит в соответствии с главной диагональю от (0,0) до (1,1). Диаграмма слева (8 баллов) довольно хорошая и показывает, что прогнозы высокой вероятности означают, что событие намного более вероятно – наклон графика чуть меньше идеального, но хороший. Центральная диаграмма (9 баллов) похожа, но не такая хорошая для наиболее высоких вероятностей в правой верхней части графика. Диаграмма справа (10 баллов) показывает полезную оправдываемость для вероятностей вплоть до 30 процентов, но при вероятностях выше этого полезной информации нет. В действительности это редкое явление, и в наборе данных не хватает выборки, чтобы измерить, имеется ли полезная оправдываемость. Это общая проблема проверки оправдываемости для экстремальных явлений; для измерения оправдываемости вероятности недостаточно данных.

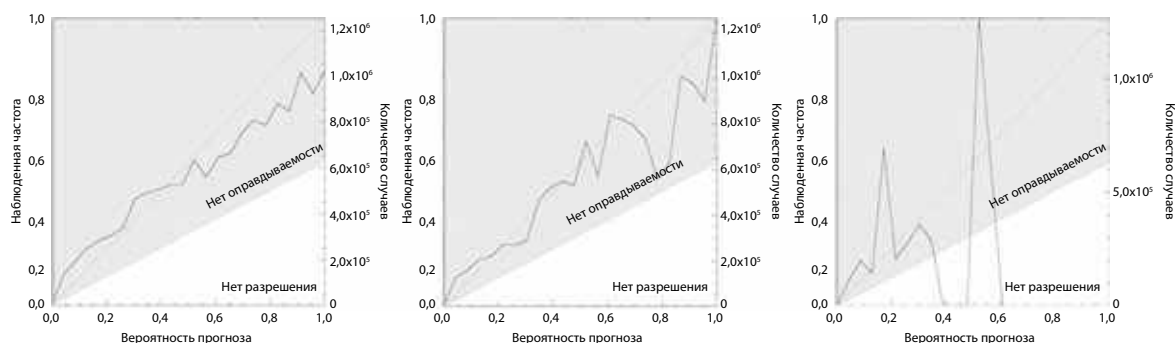
- d) Существует много других критериев оценки вероятностного прогноза. Некоторые прочие из общепринятых критериев перечислены ниже. Более полную информацию об этих критериях можно легко найти в Интернете, используя соответствующие термины для поиска, или в стандартных руководствах по проверке оправдываемости прогнозов.
- i) Показатель Брайера: среднеквадратическая ошибка вероятностных прогнозов порогового значения конкретного явления;
 - ii) показатель успешности Брайера: сравнивает показатель Брайера для прогнозов с показателем Брайера для какой-либо эталонной прогностической системы;
 - iii) надежность: измеряет, насколько хорошо прогностические вероятности соответствуют наблюдаемой частоте;
 - iv) разрешение: измеряет, насколько хороша система в прогнозировании вероятностей, которые отличаются от «нормальных»;
 - v) сравнительная оперативная характеристика (COX): измеряет, насколько прогнозы пригодны для принятия решений – по аналогии с разрешением;
 - vi) показатель вероятности постоянного ранга (ПВПР) и показатель упорядоченной вероятности (ПУР): как и показатель Брайера – для множества пороговых значений метеорологической переменной.

Комиссия ВМО по основным системам определила стандартный набор показателей проверки оправдываемости для сравнения САП; они изображены для ряда глобальных САП на сайте ведущего центра: <http://epsv.kishou.go.jp/EPsV/>.

13. ПОДГОТОВКА ПРОГНОЗИСТОВ

В общем плане, подготовка прогнозистов должна включать компоненты, касающиеся предсказуемости и ансамблевого прогнозирования, а именно:

- a) Обоснование вероятностных прогнозов — теория хаоса и ее воздействие;
- b) теория статистического фона и подходы;



Источник: Метеорологическое бюро СК, © British Crown Copyright

Рисунок 11. Диаграмма надежности и точности для вероятностей скоростей ветра, превышающих 8, 9 и 10 баллов по шкале Бофорта; проверка оправдываемости прогноза на 36 часов по сравнению с приземными наблюдениями по области моделирования (Северная Атлантика и Европа) с января 2006 г. по февраль 2007 г.

- c) цели начальных условий и модельных возмущений;
- d) стандартные средства проверки оправдываемости ансамбля и их значение;
- e) объяснение основного значения продукции (например, линии на карте);
- f) методы постпроцессинга и их воздействия.

Обучение через действие

Обучение прогнозистов использованию руководящего материала по САП должно представлять собой практический опыт с использованием инструментов, наиболее близких к тем, что используются на практике. Максимальная выгода от практического обучения по САП достигается только тогда, когда НМГС имеет доступ к оперативным данным САП, обладает оперативным временем для их использования, а также продукцией и инструментами для их непосредственного применения.

Преимущества от обучения, которое не подкреплено оперативной практикой, быстро утрачиваются.

- a) Предоставление обучения в сочетании с участием в реализации показательного проекта, как например, ПППСП, может способствовать тому, чтобы обучение подкреплялось и консолидировалось предоставлением соответствующих оперативных данных САП.
- b) Во время обучения тематические исследования должны прорабатываться посредством демонстрации надлежащего использования руководящих материалов по САП как в повседневных сценариях, так и в сценариях суровой погоды.
- c) Инструментальные программные средства на основе Интернет-технологий могут быть полезны в обучении, т. к. они могут использоваться на любом рабочем месте системы посредством стандартного браузера для обеспечения непрерывного доступа впоследствии.
- d) В относительно новой области САП ожидается, что периодическое обучение будет обеспечивать максимальную пользу. Прогнозистам требуется время, чтобы накопить опыт в использовании этих руководящих материалов с последующим обучением для закрепления ключевых понятий. Кроме того, был бы полезен обмен опытом между различными НМГС в области использования САП.
- e) Учебные ресурсы:
 - User Guide to ECMWF Forecast Products (Руководство пользователя по прогностической продукции ЕЦСПП)
<http://www.ecmwf.int/products/forecasts/guide/>
 - Модули КОМЕТ по ансамблям:
https://www.meted.ucar.edu/training_detail.php?orderBy=&topic=15

За дополнительной информацией просьба обращаться по адресу::

World Meteorological Organization

7 bis, avenue de la Paix – P.O. Box 2300 – CH 1211 Geneva 2 – Switzerland

Communications and Public Affairs Office

Тел.: +41 (0) 22 730 83 14 – Факс: +41 (0) 22 730 80 27

Э-почта: cpa@wmo.int

www.wmo.int