



Технологии динамико-статистических долгосрочных метеорологических прогнозов: современное состояние и перспективы

Д.Б. Киктёв

Гидрометцентр России

1. Объект прогноза

В соответствии с классификацией Всемирной метеорологической организации (ВМО) [1], «долгосрочными» называются метеорологические прогнозы на срок от 30 суток до двух лет. Прогнозы на срок свыше двух лет уже относятся к прогнозам климата. Вместо термина «долгосрочный прогноз погоды» более подходящим в данном случае является «долгосрочный метеорологический прогноз» (ДМП) [2], т.к. объектом прогнозирования на долгие сроки являются не мгновенные значения метеорологических элементов, ассоциируемые со словом «погода», и не индивидуальные структуры в атмосферных течениях, а обобщенные статистические характеристики состояния атмосферы, например, осредненные за тот или иной временной интервал значения метеорологических параметров или другие статистики от прогностических вероятностных распределений значений этих параметров.

2. Предположения, лежащие в основе ДМП

В долгосрочных процессах атмосфера выступает как часть единой системы «Атмосфера — деятельный слой подстилающей поверхности». Надежды на ДМП связаны, главным образом, с влиянием внешних воздействий на атмосферу, которые изменяются медленнее, чем текущая погода, но могут оказывать заметное влияние на статистические характеристики атмосферной циркуляции. Такого рода медленные воздействия на атмосферу могут быть обусловлены граничными условиями на ее подстилающей поверхности, к которым относятся аномалии температуры поверхности океанов (ТПО), влажности почвы, протяженности и толщины морского льда и снежного покрова.

В основе ДМП лежит оценка распределения вероятностей состояний атмосферы в период прогноза. Возможность такой оценки и,





соответственно, качество ДМП зависят от относительной роли изменчивости, определяемой внешними вынуждающими воздействиями на атмосферу, в сравнении с ее собственной, «внутренней» изменчивостью, обусловленной динамической неустойчивостью атмосферных течений. Специфика ДМП по сравнению с прогнозами на более короткие сроки заключается в степени учета неадиабатических процессов и неопределенности в оценках будущего состояния атмосферы.

3. О прогностических моделях и представлении внешних воздействий на атмосферу

В течение продолжительного времени основными подходами к решению задачи долгосрочного прогноза были эмпирико-статистические методы. Историю развития долгосрочных прогнозов на основе гидродинамических методов принято отсчитывать от работы Е.Н. Блиновой [3], опубликованной в 1943 году. Успехи гидродинамического моделирования позволили перейти к активному использованию моделей общей циркуляции атмосферы (МОЦА) в задачах ДМП и развитию динамико-статистических методов прогноза.

На интервале долгосрочного прогноза эволюцию полей, характеризующих медленные внешние воздействия на атмосферу, также необходимо прогнозировать. Технологически это может быть реализовано по-разному. Простейшим вариантом является инерционный прогноз полей аномалий ТПО — в силу высокой тепловой инерции океана начальное распределение температурных аномалий в его деятельном слое может существенным образом сказываться на эволюции атмосферных процессов в течение периода прогноза. На практике для прогноза состояния подстилающей поверхности также используются того или иного рода статистические модели. И, наконец, наиболее радикальным решением является построение совместных моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО). Именно такие модели все шире используются сейчас как основной инструмент для сезонных прогнозов погоды.

Следует заметить, что на временных масштабах до сезона пока нельзя сказать, что по успешности прогнозов МОЦАО ощутимо превосходят МОЦА. Это связано с высокой сложностью совместного описания и настройки модели атмосферы и океана как единой системы. По этой причине ряд прогностических центров для описания будущих полей ТПО на интервале прогноза комбинирует данные





моделей циркуляции океана с инерционными прогнозами аномалий ТПО и климатическими данными – в тропиках используются данные моделей циркуляции океана, а инерционные прогнозы и климатология ТПО подставляются в умеренных и высоких широтах. Для более детального описания таких существенных для ДМП процессов как Эль-Ниньо-Южное колебание океанские компоненты МОЦАО, как правило, имеют повышенное пространственное разрешение в экваториальных областях. Выбор подходящей конфигурации совместной модели атмосферы и океана в значительной степени зависит от требуемого периода прогноза. Так, например, в технологии среднесрочного прогноза погоды ЕЦСПП (Европейский Центр Среднесрочных Прогнозов Погоды, базируется в Великобритании) при прогнозе на срок до 10 суток океан представлен инерционным прогнозом начальных аномалий ТПО. Далее для прогнозов на большие сроки к атмосферной модели подключается динамический океанический блок. В [4] показано, что в условиях практических ресурсных ограничений при прогнозе на месяц за пределами 10 суток в МОЦАО целесообразно использовать модель верхнего перемешанного слоя океана с высоким вертикальным разрешением, а при сезонных прогнозах — модель общей циркуляции океана пусть и с меньшим разрешением в верхнем перемешанном слое, но способную воспроизводить крупномасштабную океанскую динамику, существенную в первую очередь для прогноза Эль-Ниньо-Южного колебания. Для прогнозов на временных масштабах порядка нескольких сезонов инерционный прогноз полей аномалий ТПО является уже слишком грубым приближением, что делает использование совместных моделей атмосферы и океана в этом случае практически необходимым.

Динамические блоки расчета эволюции морского льда, несмотря на важность этой характеристики, пока не включены ни в одну из МОЦАО, используемых в практике сезонных прогнозов. Так, в частности, в нынешней технологии сезонного прогноза ЕЦСПП [5] начальная концентрация морского льда сохраняется 15 суток в процессе интегрирования модели по времени с последующей релаксацией в течение очередных 15 дней до климатического распределения.

Состояние снежного покрова, температура и влажность почвы в большинстве используемых для ДМП МОЦА сегодня являются модельными переменными. Общая же тенденция развития этих моделей — совершенствование описания и расширение круга воспроизводимых физических процессов и переменных. Они все больше превращаются в модели окружающей среды. Концентрация





стратосферного озона, динамика биосферных процессов, содержание атмосферных аэрозолей и целый ряд других факторов, роль которых изучена в меньшей степени, также в будущем могут войти в число механизмов, учитываемых в ДМП (хотя и не столь важных, как ТПО, влажность почвы или состояние ледового покрова). Появляется опыт построения унифицированных «бесшовных технологий» (<http://www.ensembles-eu.org>), предназначенных как для решения прогностических задач, так и для моделирования климатических изменений.

4. Общая схема технологии ДМП

Решение задачи оценки будущего распределения вероятности состояний атмосферы по данным наблюдений о начальном состоянии можно представить в виде трех шагов:

- 1) инициализация прогностических моделей;
- 2) расчет ансамбля гидродинамических прогнозов;
- 3) статистическая интерпретация результатов динамических прогнозов и прикладные приложения.

4.1. Инициализация прогностических моделей

Очевидно, что для прогноза эволюции сложной системы необходимо, прежде всего, фиксировать начальное состояние этой системы в целом. Одним из важнейших условий совершенствования технологий ДМП является развитие глобальной системы наблюдений за состоянием атмосферы, океана и суши — расширение спектра усваиваемых переменных, повышение точности, пространственного и временного покрытия данными наблюдений. По сравнению с моделями ОЦА инициализация совместных моделей атмосферы и океана предъявляет дополнительные требования к наблюдательным системам. Помимо поверхностных переменных (ТПО, направление ветра, параметры ледового покрова и, в ряде случаев, поверхностная топография океанской поверхности) перечень усваиваемых параметров, в зависимости от конкретной реализации прогностической системы, может включать данные на глубинных горизонтах океана (по крайней мере в его верхнем деятельном слое). Наряду с температурой получает распространение усвоение данных о солёности. Так как данные об океанских течениях пока отрывочны, эта информация не усваивается моделями в рутинном режиме, а используется для целей их проверки. Более низкая в сравнении с атмосферой степень





информационной освещенности океана данными наблюдений создаст определенные трудности при инициализации океанских моделей. Прямых измерений влажности почвы крайне мало, поэтому вместо них в основном приходится использовать различного рода косвенную информацию. Некоторые моды изменчивости климатической системы, связанные с двусторонним взаимодействием атмосферы с граничными средами, сегодня не удастся инициализировать надлежащим образом.

Для повышения успешности ДМП существенным может быть уточнение ряда дополнительных «внешних» параметров. Так, например, задание реальных концентраций парниковых газов в начальный момент прогноза вместо их средних климатических значений существенно для оценки радиационного воздействия на атмосферу при расчете ретроспективных и текущих прогнозов и позитивно значимо проявляется уже на интервале сезонного прогноза [6]. Некоторые океанские модели, включаемые в прогностические МОЦАО, также учитывают прозрачность воды как характеристику, влияющую на поглощение солнечной радиации. В рамках выполняемого в настоящее время в рамках Шестой рамочной программы ЕС проекта ENSEMBLES помимо реалистичных начальных концентраций парниковых газов также задаются уточненные текущие значения концентрации вулканических аэрозолей и солнечной постоянной.

4.2. Расчет ансамбля гидродинамических прогнозов

Для учета стохастических факторов в динамике воспроизводимой системы в практике долгосрочных прогнозов широко используется метод Монте-Карло, реализуемый средствами ансамблевого гидродинамического моделирования атмосферных процессов с последующей статистической интерпретацией его результатов. Предполагается, что получаемая в результате ансамблевого моделирования статистика прогностических исходов дает информацию о наиболее вероятном состоянии системы на момент прогноза и о степени его неопределенности. Для построения представительных ансамблей необходим учет неопределенности в задании начального состояния атмосферы и несовершенства прогностических моделей. Для учета неопределенности в задании начального состояния системы расчет долгосрочных прогнозов проводится от ансамбля ее возмущенных начальных состояний. По аналогии с начальными данными возмущения могут быть внесены в параметры настройки модели и ее





физических параметризаций. Практическим вариантом учета неопределенности в формулировках моделей атмосферы является также построение мультимодельных ансамблей прогностических реализаций. Как показывает мировая практика, совместные прогностические продукты обычно оказываются более успешными по сравнению с прогнозами индивидуальных моделей — участниц ансамбля. Об этом же свидетельствуют результаты нацеленных на задачи долгосрочного прогноза международных мультимодельных экспериментов: PROVOST (PRediction Of climate Variations On Seasonal to inter-annual Time-scales), DSP (Dynamical Seasonal Prediction), DEMETER (Development of a European Multi-model Ensemble system for seasonal to inTERannual prediction), ENSEMBLES и других.

Оптимальный размер ансамбля определяется в контексте того, как используются его данные. Так, для выявления малых сдвигов в вероятностях нужны достаточно большие ансамбли. Априори можно ожидать, что, например, оценка средних, вероятностей и экстремальных статистик потребуют разного объема доступных для их оценки данных.

Требования к представительности прогностического ансамбля могут также меняться в зависимости от интенсивности внешнего воздействия на атмосферу. Правильно построенная процедура генерации ансамблей прогностических реализаций должна обеспечивать отражение существующей неопределенности в оценках начального состояния атмосферы. При слабых и умеренных внешних воздействиях на атмосферу требования к размерам прогностических ансамблей при этом могут возрастать [7].

Прогностические ансамбли бесполезны, если применяемые для их расчета модели недостаточно реалистичны. Практика показывает, что используемые сегодня для ДМП модели имеют серьезные недостатки. Всемерное улучшение прогностических моделей — ключевое направление развития методов ДМП. Оно требует активных исследований для более глубокого качественного понимания и количественной оценки целого ряда физических механизмов, ответственных за эволюцию основных мод климатической изменчивости.

4.3. Статистическая интерпретация результатов динамических прогнозов и прикладные приложения

Статистические характеристики воспроизводимой прогностическими моделями циркуляции атмосферы, вообще говоря, отличаются





от соответствующих статистик реальной атмосферы, т.е. существуют систематические отличия модельного и наблюдаемого климатов. В связи с этим важную роль в ДМП играют многолетние архивы ретроспективных прогнозов. Они необходимы для проверки моделей на ретроспективном материале и для калибровки ДМП, т.е. для коррекции их систематических ошибок как в средних полях, так и в более сложных статистиках (в том числе для коррекции прогностических вероятностей).

Статистическая интерпретация гидродинамических прогнозов способна привести в выходную продукцию ДМП «добавленную стоимость» лишь в случаях, когда базовый гидродинамический ДМП достаточно успешен. Прогнозы, не несущие в себе полезной информации, улучшить таким образом пытаться бесполезно.

Частными случаями статистической интерпретации прогнозов являются простая статистическая калибровка, заключающаяся в устранении систематических ошибок прогнозов, статистическая регионализация («даунскейлинг»), приближение MOS (Model Output Statistics) и др.

Формулировка вероятностного прогноза несет в себе априорную оценку его качества. Близость прогностических вероятностей к климатическим (все прогностические исходы приблизительно равновероятны) означает либо низкий уровень предсказуемости для данного региона, либо отсутствие явно выраженного внешнего воздействия на климатическую систему в соответствующий период.

Ведущие прогностические центры уделяют серьезное внимание развитию «дочерних» приложений на основе результатов ДМП. Так, активная работа с энергетическим и сельскохозяйственными секторами экономики осуществляется в рамках проекта стран Азиатско-Тихоокеанского бассейна по сезонному прогнозированию. На основе проекта DEMETER развивались модели прогноза урожая и модель развития малярии: для каждого члена прогностического ансамбля запускаются соответствующие дочерние модели и по результатам их интерпретации строятся вероятностные прогнозы развития урожая в Европе и заболеваемости малярией. Растет интерес к приложениям ДМП у российских энергетиков. Демонстрация положительного опыта и потенциальных возможностей приложений долгосрочных прогнозов, а также укрепление связей с потребителями являются в определенной степени катализаторами развития технологий ДМП.





5. Международная инфраструктура для выпуска ДМП

Долгосрочный прогноз — сложная ресурсоемкая задача, для решения которой целесообразно объединять усилия различных прогностических центров. Совместные прогностические продукты на основе мультимодельных ансамблей долгосрочных прогнозов сегодня выпускаются на регулярной основе несколькими группами метеорологических центров. Концерн EUROSIP (European Seasonal to Interannual Prediction) комбинирует прогнозы, выпускаемые на основе совместных моделей атмосферы и океана трех центров, — ЕЦСПП, МетОфиса Великобритании и МетеоФранс. Мультимодельные прогнозы также выпускают Климатический центр стран Азиатско-Тихоокеанского региона (APCC — Asia Pacific Climate Centre, базируется в Республике Корея), Международный институт климата и общества (IRI — International Research Institute for Climate and Society, США), а также Канадский метеорологический центр. Сегодня становятся реальностью сезонные прогнозы на базе мультимодельных ансамблей общей размерностью порядка сотен прогностических реализаций. Это уже достаточно представительная статистика для составления вероятностного прогноза, включая кластерный анализ прогностических исходов.

Гидрометслужба России уже сегодня вовлечена в активное международное сотрудничество в области глобальных долгосрочных прогнозов погоды и реально выполняет целый ряд связанных с этой деятельностью международных обязательств. В России практическая деятельность в области гидродинамико-статистических долгосрочных прогнозов ведется в Гидрометцентре России и в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (ГГО). Оба института являются участниками международных проектов в области долгосрочных прогнозов: SMIP-2 (проект фокусируется на оценках предсказуемости и сравнении сезонных прогнозов различных моделей), APCC и др. Участие в таких проектах важно для поддержания исследований в области ДМП прогнозов на современном мировом уровне.

Активная деятельность по построению международной инфраструктуры для выпуска, интерпретации и распространения ДМП в настоящее время ведется в ВМО. Основные участники этой деятельности:

– центры-производители глобальных долгосрочных прогнозов (ЦПГП);





– региональные климатические центры (РКЦ), осуществляющие региональную интерпретацию долгосрочной прогностической продукции различных производителей;

– национальные метеорологические центры, адаптирующие продукцию ДМП для своих нужд.

В недалеком будущем регулярный обмен продукцией долгосрочных метеорологических прогнозов между прогностическими центрами и построение совместных прогностических продуктов станут такими же обычными, каким сегодня является обмен данными среднесрочных прогнозов. Понятия «Центр — Производитель Глобальных долгосрочных Прогнозов» (ЦПГП) и «Региональный Климатический Центр» (РКЦ) уже включены в новую редакцию Технического регламента ВМО наряду с понятиями Мировой метеорологический центр (ММЦ), Региональный специализированный метеорологический центр (РСМЦ), Национальная гидрометеорологическая служба (НГМС). Глобальные сезонные гидродинамические прогнозы сегодня выпускают на регулярной основе одиннадцать ЦПГП: Вашингтон, Мельбурн, Монреаль, Москва, Пекин, Претория, Реддинг, Сеул, Токио, Тулуза, Эксетер. В г. Сеул, Республика Корея, создан Ведущий центр ВМО по мультимодельным долгосрочным ансамблевым прогнозам (<http://www.wmolc.org>), представляющий в унифицированном виде продукцию ЦПГП авторизованным пользователям (рис. 1).

Требования к ЦПГП включают:

– фиксированный производственный цикл по выпуску глобальных долгосрочных прогнозов;

– обязательный выпуск минимального базового перечня продукции в соответствии с требованиями ВМО;

– распространение долгосрочной прогностической продукции в виде числовых сеточных полей, пространственно осредненных значений и индексов и/или изображений через Интернет и/или глобальную сеть телесвязи ВМО;

– верификация прогнозов в соответствии с требованиями Стандартизированной системы оценок долгосрочных прогнозов ВМО;

– сопровождение прогнозов актуальной информацией о методологии их выпуска — моделях, процедурах подготовки прогностических данных, а также информацией о предстоящих изменениях в прогностической технологии.

Прогнозы, выпускаемые на основе текущих данных, должны сопровождаться оценками качества ретроспективных прогнозов, рас-



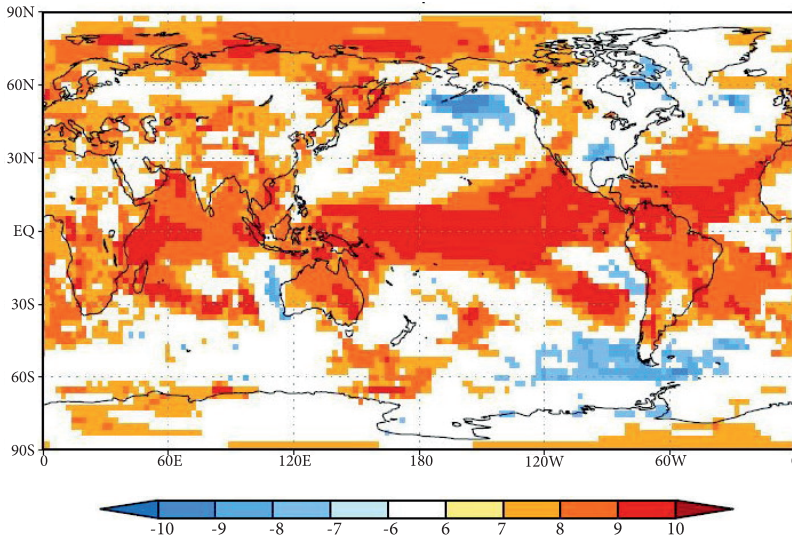


Рис. 1. Пример карты согласованности прогнозов различных ЦППП с сайта <http://www.wmolc.org> для аномалий приземной температуры на период с ноября 2009 г. по январь 2010 г. Интенсивность заливки красным/синим цветом характеризует количество моделей, прогнозирующих сезонные аномалии «выше»/«ниже» нормы.

считанных по той же технологии на основе многолетнего архива исторических данных. Любые более или менее значительные изменения в моделях предполагают пересчет ретроспективных прогнозов для очередной проверки и калибровки результатов ДМП. Минимальный перечень продукции ЦППП должен выпускаться ежемесячно в виде месячных и сезонных средних или накопленных сумм, рассчитываемых с заблаговременностью от нуля до нескольких месяцев на сетке с разрешением $2,5 \times 2,5^\circ$.

Состав базового набора выходной продукции:

а) Калиброванная выходная продукция систем ансамблевого прогнозирования, показывающая среднее и разброс распределения для:

- температуры на уровне 2 м;
- температуры поверхности океана;
- осадков;
- H500, давления на уровне моря, T850.

Прогностические поля представляются в виде отклонений от модельного климата, оцениваемого по данным ретроспективных про-



Таблица 1

Характеристики технологий ДМП различных ЦПП

Прогностический центр	Модель	Характеристики прогностического ансамбля	Примечание
ECMWF	МОЦАО (System 3) Атмосфера: пространственное разрешение TL159L62 (1,125° ~110 км, до 5 гПа). Океан: пространственное разрешение 1×1° в средних и высоких широтах с повышением до 0,3° в экваториальных областях. 29 уровней по вертикали.	41 реализация: атмосфера – сингулярные вектора, 5 параллельных циклов океанского анализа, различающихся мерами задания неопределенности в поле ветра у подстилающей поверхности. Неопределенность в значениях ТПО представлена 40 возмущенными полями ТПО. Дополнительно в течение периода прогноза используется стохастическая физика. Это увеличивает разброс между членами ансамбля в первые дни прогноза, компенсируя отсутствие начальных возмущений для атмосферы. Продолжительность прогноза — 7 месяцев	Сайт: http://ecmwf.int . В свободном доступе на сайте представлены минимальный объем информации. Долгосрочные прогнозы в него не входят. Доступ к дополнительной продукции возможен лишь в режиме авторизованного доступа. Расширенный объем продукции доступен для стран-членов консорциума ECMWF и на коммерческой основе.
Met Office, UK	МОЦАО GloSea (на основе HadCM3) Атмосфера: 2,5×3,75°, 19 уровней Океан: 40 уровней.	Размер ансамбля — 41. Генерация возмущений — только для океанской компоненты МОЦАО через возмущения полей ветрового напряжения и дополнительные возмущения полей ТПО. Ежемесячно выпускается прогноз на 6 месяцев.	http://www.metoffice.co.uk/ Сезонные прогнозы: http://www.metoffice.gov.uk/weather/world/seasonal/index.html



Прогностический центр	Модель	Характеристики прогностического ансамбля	Примечание
National Centers for Environmental Prediction (NCEP), США	МОЦАО Climate Forecast System (CFS)	10-месячные прогнозы рассчитываются дважды в день. Описание технологии: Saha S. and Coauthors. The NCEP Climate Forecast System // Journal of Climate, 2006, Vol. 19, No. 15. P. 3483—3517.	Продукция глобальных ДМП в графическом виде доступна по адресу http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/laninaensoforecast.shtml (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/people/wwang/cfs_fcst4CPC/)
Japan Meteorological Agency, Япония	МОЦАО Прогноз на месяц (34 дня) – раз в неделю: TL159L60 с инерционным прогнозом аномалий ТПО Сезонный прогноз — раз в месяц. Атмосфера: TL95 L40 (1,875° ~180 км) Океан: пространственное разрешение 1°x1° с повышением до 063° в экваториальных областях. 50 уровней по вертикали.	Прогноз на месяц: 50 членов (25 членов x 2 суток) — сочетание BGM ¹ и LAF ² . Сезонный прогноз: 51 член ансамбля – сингулярные вектора + дополнительные возмущения полей ТПО. Динамический прогноз аномалий ТПО комбинируется с инерционным и климатическим прогнозами ТПО.	http://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/index.html
Гидрометцентр России	МОЦА 1,125x1,40625° L28 Океан: инерционный прогноз аномалий ТПО.	Ансамбль — 10 прогностических реализаций. Способ генерации ансамбля — BGM для атмосферных данных. Периодичность выпуска – ежемесячно. Прогноз выпускается на 4 месяца (зон с месячной заблаговременностью).	В графическом виде сезонные прогнозы и оценки их успешности доступны по адресу http://wmc.meteoinfo.ru/season





гнозов за период не менее, по крайней мере, 15 лет. Для атмосферных моделей также должны быть предоставлены поля ТПО, используемые в качестве граничных условий.

б) Калиброванные вероятности осуществления прогностических категорий для:

- температуры на уровне 2 м;
- температуры поверхности океана (для МОЦАО);
- осадков.

В соответствии с нынешними возможностями в качестве прогностических категорий следует использовать терцили (3 формально вероятных прогностических категории) и сопровождать прогноз информацией о границах категорий. В перспективе, по мере роста технологических возможностей, сможет быть обеспечено большее число категорий.

В таблице 1 приведена краткая информация о ряде прогностических технологий глобальных ДМП различных ЦППП, в том числе Гидрометцентра России. В 2009 году Гидрометцентру России стали доступны ресурсы нового суперкомпьютерного вычислительного комплекса. В ближайшие месяцы предполагается существенно обновить используемую для сезонных прогнозов модель атмосферы [8] и увеличить размер выпускаемых прогностических ансамблей. Ведется работа по созданию совместной модели атмосферы и океана.

В части региональных долгосрочных прогнозов следует отметить, что в системе Росгидромета сформирован и впоследствии утвержден Межгосударственным советом по гидрометеорологии стран СНГ Северо-Евразийский Климатический Центр (СЕАКЦ) — см. <http://seakc.meteoinfo.ru>. На сайте СЕАКЦ для авторизованных НГМС европейского и азиатского регионов сегодня представлены долгосрочные прогнозы Гидрометцентра России и ГГО, а также их совместные вероятностные сезонные прогнозы (рис. 2). В недалеком будущем для построения совместных прогностических продуктов СЕАКЦ предполагается также использовать данные ряда зарубежных провайдеров ДМП. В европейской и азиатской региональных ассоциациях ВМО СЕАКЦ позиционируется как РКЦ ВМО, однако для формального подтверждения этого статуса СЕАКЦ должен продемонстрировать способность обеспечивать страны региона климатической информацией в ходе испытательного периода (пилотного эксперимента). В европейском регионе такой пилотный эксперимент был начат летом 2009 года. В азиатском регионе аналогичный испытательный эксперимент будет инициирован в ближайшее время.



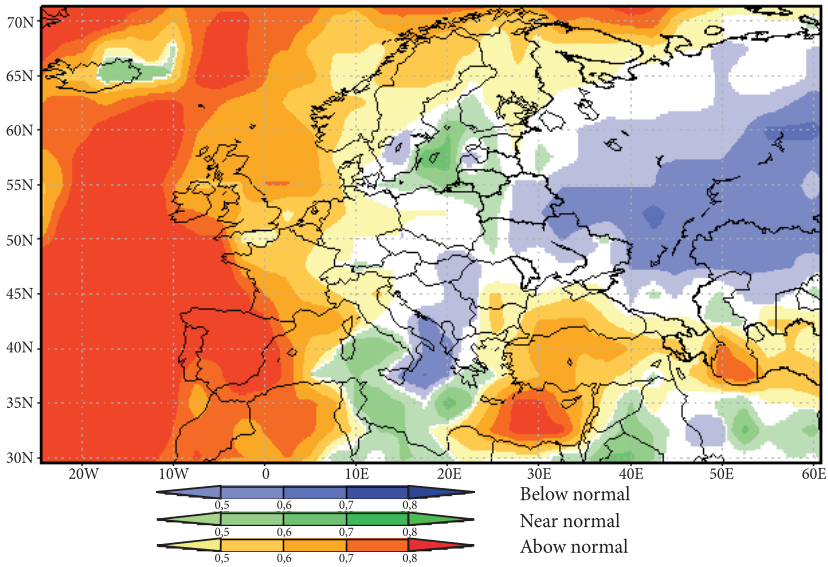


Рис. 2. Композитная карта вероятностей с сайта Северо-Евразийского климатического центра, построенная по данным сезонных прогнозов Гидрометцентра России и ГГО для приземной температуры. Цветом показаны вероятности наиболее вероятных градаций аномалий (ниже/около/выше нормы). Вероятности трех градаций для моделей Гидрометцентра России и ГГО взяты с равными весами. Период прогноза: ноябрь 2009 — январь 2010 гг.

6. Современный уровень успешности ДМП

Развитие моделей атмосферной циркуляции невозможно без их разносторонней проверки (валидации). Проверка на основе текущих оперативных данных требует значительного времени для накопления представительного статистического материала, позволяющего делать заключения об особенностях поведения и адекватности моделей. Появление общедоступных многолетних архивов данных реанализа дало возможность проводить систематическую проверку различных моделей на едином историческом материале, сравнивать их результаты, проводить диагностические исследования. В последние годы был инициирован целый ряд международных проектов по сравнению и диагнозу результатов различных моделей, фокусирующихся на определенных аспектах моделирования гидрометеорологических процессов.





Эксперименты по расчету многолетних серий ретроспективных сезонных прогнозов по протоколу SMIP-2 (Seasonal Prediction Model Intercomparison Project, см. <http://www-pcmdi.llnl.gov>) для оценки долгосрочной предсказуемости и сравнения различных прогностических моделей проведены практически всеми центрами, выпускающими глобальные ДМП. Оценки успешности прогнозов различных ЦПП, включая Гидрометцентр России, можно найти на специализированном сайте ВМО по верификации долгосрочных прогнозов — <http://www.bom.gov.au/wmo/lrfvs/> (на сайте представлены оценки успешности гидродинамических прогнозов после простой калибровки, заключающейся в безусловном устранении систематических ошибок). Текущие вероятностные сезонные прогнозы Гидрометцентра России с месячной заблаговременностью и оценки успешности ретроспективных прогнозов [9] доступны по адресу <http://wmc.meteoinfo.ru/season>. Более разносторонний эксперимент по валидации ДМП, СНФР (Climate-system Historical Forecast Project) был недавно инициирован в рамках Всемирной программы климатических исследований [10].

В 2007—2008 гг. были проведены совместные оперативные испытания технологий глобальных ДМП Гидрометцентра России и ГГО на период до сезона. Для территории России совместные вероятностные прогнозы Гидрометцентра России и ГГО показали заметно лучшие результаты, чем каждая из двух моделей по отдельности. По итогам испытаний метод прогноза был рекомендован для внедрения в оперативную практику.

В целом, оценки свидетельствуют о наличии значимой успешности сезонных прогнозов крупномасштабной циркуляции в тропиках, где основная доля крупномасштабной изменчивости атмосферы определяется влиянием медленно меняющихся граничных условий. В умеренных широтах и, в частности, на значительной части территории России для рассматриваемых временных масштабов успешность сезонных прогнозов остается весьма скромной и недостаточной для многих практических приложений (рис. 3). Эти закономерности весьма характерны для других прогностических моделей, используемых на сегодняшний день для задач ДМП. Тем не менее, на общем фоне весьма скромной успешности сезонных прогнозов имеются регионы, периоды и метеорологические параметры, для которых есть надежда на получение практически полезного прогностического сигнала (так, например, успешность ДМП для температуры, как правило, заметно выше, чем для полей осадков). Кроме того, сезонные прогнозы явля-



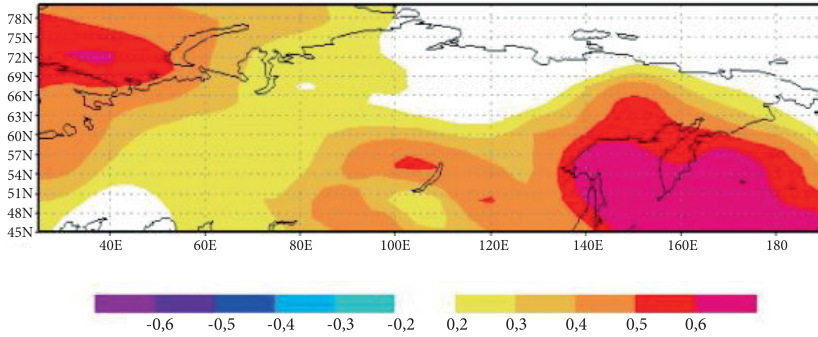


Рис. 3. Коэффициент временной корреляции фактических и средних прогностических аномалий для ретроспективных прогнозов температуры на уровне 850 гПа за 1981—2001 гг. по данным мультимодельного ансамбля АРСС. Период прогноза: сезон (декабрь, январь, февраль), заблаговременность прогноза — 1 месяц.

ются естественным полигоном для испытания и совершенствования гидродинамических моделей и для улучшения качества прогнозов на более короткие сроки (в частности для прогнозов на месяц), где получение практически значимых результатов уже сегодня вполне реально.

Средние за многолетний период оценки дают лишь самое общее представление об уровне успешности сезонных прогнозов, который меняется от случая к случаю и зависит от многих факторов: от того, какие атмосферные характеристики прогнозируются; от региона, сезона; от начальной структуры гидрометеорологических полей; от внешних вынуждающих условий; от несовершенства модели и неточности задания начального состояния. Разброс относительно этих средних оценок и закономерности изменения успешности прогнозов представляют практический интерес и требуют дальнейших исследований.

Очевидно, что возможности повышения предсказуемости на сезонных временных масштабах реализованы неполностью. В современных технологиях ДМП слабо задействованы многие потенциально важные резервы предсказуемости (например, более адекватное описание взаимодействия стратосферы с тропосферой, атмосферы с поверхностью суши, криосферой и т.д.). Источники сезонной предсказуемости в настоящее время являются предметом исследований в рамках различных международных диагностических про-





ектов: GLACE (Global Land-Atmosphere Coupling Experiment) – для влажности почвы, SPARC (Stratospheric Processes And their Role in Climate) — для взаимодействия стратосферы с тропосферой, CliC (Climate and Cryosphere) — для морского льда и криосферы и т.д. Для прогресса в ДМП важен опыт и прогностического и климатического сообществ, так как задача ДМП лежит на стыке областей их интереса.

7. Меры по развитию технологий выпуска ДМП

Какие меры представляются необходимыми в нынешних условиях для развития отечественных технологий ДМП:

- развитие физического наполнения прогностических моделей, используемых для задач ДМП;
- исследование предсказуемости гидрометеорологических процессов и механизмов ее изменения;
- развитие систем усвоения данных о состоянии окружающей среды (атмосферы, океана, почвы, криосферы);
- развитие совместной модели атмосферы и океана;
- развитие систем интерпретации результатов динамических ДМП;
- развитие вычислительной базы для исследовательских и оперативных задач ДМП;
- активное участие в международной научной и оперативно-прогностической кооперации в области ДМП;
- поддержание адекватного сложности задачи уровня кадровых ресурсов.

Настоящий обзор подготовлен при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 09-05-00630-а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Наставление по системам глобальной обработки данных и прогнозирования (WMO-№. 485), 2003 г., том I
2. *Филатов А.Н., Муравьев А.В., Реснянский Ю.Д.* Долгосрочный метеорологический прогноз: математические проблемы и возможности гидродинамических моделей // кн. 70 лет Гидрометцентру России. СПб.: Гидрометеиздат, 1999. С. 141—165.
3. *Блинова Е.Н.* Гидродинамическая теория волн давления, температурных волн и центров действия атмосферы // Доклады АН СССР. 1943, т. 39, № 7. С. 284—287.
4. *Vitart F.*, 2008: Coupling issues in monthly forecasting, - ECMWF Workshop on Ocean-Atmosphere Interactions, 10—12 November 2008 (http://www.ecmwf.int/publications/library/ecpublications/_pdf/workshop/2008/Atmos_Ocean_Interaction/Vitart.pdf)





5. *Anderson D. L. T., Stockdale T., Balmaseda M., Ferranti L., Vitart F., Molteni F., Doblas-Reyes F., Mogensen K. and Vidard A.*, Seasonal Forecast System 3 // ECMWF Newslette, 2007. P. 110 (http://www.ecmwf.int/publications/newsletters/pdf/110_rev.pdf).
6. *Doblas-Reyes F.J., Hagedorn R., Palmer T.N. and Morcrette J.-J.* Impact of increasing greenhouse gas concentrations in seasonal ensemble forecasts // *Geophysical Research Letters*, 2006, Vol. 33, L07708, doi 10.1029/2005GL025061
7. *Straus D.M., F. Molteni*, 2004: Flow regimes, SST forcing, and climate noise: results from large GCM ensembles, *J. Climate*, 17, 1641—1656.
8. *Толстых М.А., Киктев Д.Б., Заринов Р.Б., Зайченко М.Ю., Шашкин В.В.* 2010: Воспроизведение атмосферной циркуляции на сезонных масштабах новой версией полулагранжевой модели атмосферы // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, № 2, в печати.
9. *Киктев Д.Б., Тросников И.В., Толстых М.А., Заринов Р.Б.* Оценки успешности прогнозов сезонных аномалий метеорологических полей для модели SL-AV в эксперименте SMIP-2. // *Метеорология и гидрология*, 2006, № 6. С. 16—26.
10. WCRP Position Paper on Seasonal Prediction Report from the First WCRP Seasonal Prediction Workshop, 4—7 June 2007, Barcelona, Spain
http://wcrp.wmo.int/documents/WCRP_SeasonalPrediction_PositionPaper_Feb2008.pdf
11. *Toth, Z., and Kalnay E.* Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method. // *Mon. Wea. Rev.*, 1997, 127, P. 3297—3318¹.
12. *Hoffmann, R.N. and E. Kalnay*, Lagged average forecasting, an alternative to Monte Carlo forecasting. *Tellus*, 1983, 35A. P. 100—118².

¹ Метод выращивания начальных возмущений для построения ансамбля: BGM — Breeding of Growing Modes [11].

² Метод построения ансамбля по данным прогнозов за несколько последних сроков наблюдений: LAF — Lagged Average Forecasting [12].

