

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ДЕТАЛИЗАЦИИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Зарипов Р.Б.

Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации (г. Москва)

zaripov@mecom.ru

Рассматриваются современные методы повышения детализации метеорологических полей с недостаточным пространственным разрешением. Кратко приводятся основные достоинства и недостатки статистических, физических и динамико-статистических методов. Больше внимание уделяется динамическим методам, основанным на интегрировании численных моделей атмосферы с высоким пространственным разрешением. Анализируются различные способы использования данных с грубым разрешением для коррекции состояния численной модели при подобном интегрировании. Кратко рассматривается методология циклического инкрементного усвоения данных, пригодная для повышения детализации метеорологических полей.

Ключевые слова: Повышение детализации крупномасштабных данных (даунскейлинг), динамический даунскейлинг, моделирование атмосферы, моделирование климата, притягивание состояния динамической модели к заданному состоянию.

Введение

Климатические модели, основанные на моделях общей циркуляции атмосферы и океана, активно развиваются с 70-х годов прошлого века [Моисеев с соавт., 1985: с. 45]. Их основными преимуществами относительно более простых климатических моделей являются точность и высокое пространственное разрешение выходной продукции.

Ввиду того, что атмосфера и океан являются непрерывными средами, при долговременном моделировании их состояния применим только глобальный подход. Чтобы долговременное глобальное моделирование было посильной задачей для вычислительной техники, как на пространственное разрешение моделей, так и на сложность описания в них физических процессов накладываются определенные ограничения. В то же время для некоторых региональных исследований было бы полезно детализировать часть полей, выдаваемых моделями общей циркуляции.

В представляемой работе автор хотел бы рассмотреть основные способы повышения детализации крупномасштабных атмосферных полей с тем, чтобы читатель при возникновении потребности в решении подобной задачи смог бы выбрать наиболее приемлемое для него направление работ.

1. Постановка задачи

Пространственное разрешение глобальных моделей атмосферы, используемых в процедурах усвоения данных и для прогноза погоды, постоянно растет. Так, в настоящее время горизонтальное разрешение глобальной модели Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) составляет около 25 км, модели Национального центра исследований окружающей среды США (NCER) – около 35 км, глобальной модели метеослужбы Великобритании (Met Office) – около 40 км в умеренных широтах.

Соответственно растет и разрешение глобальных анализов и прогнозов полей метеорологических величин. Следует отметить, что подготовленные данные не всегда предоставляются пользователям в полном разрешении (т.е. на модельной сетке). Наиболее детальные из свободно распространяемых глобальных наборов полей анализа и прогноза, имеют горизонтальное разрешение $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (NCER).

Разрешение глобальных моделей атмосферы, используемых в климатических исследованиях, значительно ниже. Так, по адресу http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/model_documentation/ipcc_model_documentation.php приводятся ссылки на описания 25 современных климатических моделей, участвующих в эксперименте CMIP3 (Coupled Model Intercomparison Project 3). Горизонтальное разрешение атмосферных блоков климатических моделей – первые сотни километров. Это связано с тем, что климатические модели должны считаться на периоды большей продолжительности, но от них не требуется максимально точного детерминированного прогноза погоды.

Доступные в Интернет пригодные для климатических исследований данные реанализов (т.е. наборы последовательных анализов состояния атмосферы, полученные с использованием не меняющейся в ходе просчетов системой четырехмерного усвоения данных) NCER/NCAR2 и ERA 40 имеют горизонтальное разрешение $2.5^\circ \times 2.5^\circ$. Впрочем, для ERA 40 доступны и данные с разрешением порядка 100 км.

Т.е. по глобальным анализам/прогнозам текущего состояния атмосферы можно рассматривать процессы с горизонтальным масштабом от 70-100 км, по результатам климатических исследований – от сотен километров. Для ряда исследовательских задач и практических приложений подобного разрешения недостаточно, т.к. не могут быть адекватно воспроизведены мезомасштабные особенности атмосферных циркуляций, в первую очередь это касается регионов со сложной орографией.

Для сокращения разрыва между возможностями глобальных моделей общей циркуляции атмосферы

и потребностей ряда пользователей их продукции используются различные методы повышения детализации крупномасштабных данных. Для обозначения повышения детализации данных в англоязычной литературе используется термин «downscaling». В русскоязычной литературе автор не нашел соответствующего слова: в некоторых работах используется «downscaling» [Рубинштейн, 2002], в некоторых – его транслитерация [Кислов с соавт., 2007]. Поэтому автор считает уместным пользоваться транслитерацией английского термина.

Термин даунскейлинг относится к использованию либо более точных численных моделей атмосферы (динамический даунскейлинг), либо статистических соотношений (статистический даунскейлинг) для получения детализованных атмосферных данных. Исходными данными для процедуры даунскейлинг обычно служат: информация, получаемая при интегрировании глобальных моделей атмосферы или атмосферы-океана, детальная информация о состоянии земной поверхности.

Вне всякого сомнения, по крупномасштабным атмосферным полям и данным о состоянии поверхности, может быть восстановлена только часть типичных мезомасштабных циркуляций. Исходя из генезиса мезомасштабных явлений большинство авторов (см., например, [Pielke, 1984; Вельтищев, 1988]) подразделяют их на две основные группы:

- системы, возникающие под действием термической и механической неоднородности подстилающей поверхности (бризовые циркуляции, горно-долинные ветры, горные волны, вихри с подветренной стороны препятствий и т.д.).
- системы, возникающие в свободной атмосфере в результате потери устойчивости течений более крупного масштаба (гравитационные волны, системы мелкой и глубокой конвекции).

Отличительной особенностью систем первой группы состоит в том, что, будучи локально возбужденными, они развиваются также локализовано, и их поведение предсказуемо, т.к. возбуждающие силы являются или постоянными (механическое возбуждение), или имеют суточный цикл (термическое возбуждение). Характеристики систем этого типа могут быть восстановлены с использованием технологий даунскейлинга.

Системы второго типа возбуждаются неоднородностями крупномасштабного потока, которые, в отличие от орографических неоднородностей, являются подвижными и сами нуждаются в прогнозировании. Или же, что еще сложнее с точки зрения детерминированного прогноза или восстановления методами даунскейлинга, мезомасштабные системы могут возникать в однородном по горизонтали крупномасштабном окружении (различные системы внутримассовой конвекции). В этом случае хотя и можно восстановить некие общие характеристики мезомасштабных процессов, но получить детерминированное мезомасштабное распределение метеорологических величин практически невозможно.

2. Методы повышения детализации метеорологических полей

В последние десятилетия было опубликовано большое количество работ, посвященных методологии даунскейлинга. В соответствии с поставленными задачами их можно разделить на две группы. Первая группа – это задачи даунскейлинга применительно к чисто климатическим исследованиям (примеры – работы [Nobre et al., 2001; Ghan et al., 2006; Школьник с соавт., 2000, 2005, 2008]). Их особенностью является то, что при климатических исследованиях не требуется детерминированного восстановления состояния атмосферы для конкретных моментов времени, а важно лишь правильно воспроизвести детализированные особенности климата. Вторая группа – детерминированное восстановление состояния атмосферы для конкретных моментов времени (примеры – [Perez et al., 2003; Brandt et al., 2005; Kanamaru and Kanamitsu, 2007a, 2007b, 2008]). Это в основном обработка полей анализа и реанализа недостаточно высокого разрешения.

Можно выделить 4 основных подхода к задаче даунскейлинга:

- Статистический даунскейлинг
- Физический даунскейлинг
- Динамический даунскейлинг
- Статистико-динамический даунскейлинг

Статистический даунскейлинг. Для получения статистических соотношений, связывающих характеристики региональных циркуляций с крупномасштабным состоянием атмосферы, используются данные наблюдений. В качестве примера можно привести работу [Enke and Spekat, 1997], или, из отечественных работ, статью [Чавро с соавт., 2007]. Сопоставление методов статистического даунскейлинга с другими методами приводится в работе [Murphy, 1999]. Основная проблема статистического подхода – не во всех регионах существует наблюдательная сеть, позволяющая рассчитать статистические соотношения для расчета всех нужных характеристик региональной погоды и климата. При моделировании гипотетического сценария изменения глобального климата данные наблюдений получить невозможно.

Также, при рассмотрении не только гипотетической, но и просто редко встречающейся реальной ситуации (какие-либо экстремальные погодные ситуации) полученные соотношения могут давать неприемлемые результаты. Впрочем, в рамках проекта STARDEX (Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European Region, <http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex>) проводилась оценка 22 методик статистического даунскейлинга при прогнозе частоты экстремальных погодных ситуаций. И

результаты исследования показали, что для данной задачи статистические методы оказались вполне пригодными.

Преимуществом статистического даунскейлинга является нетребовательность данной методики к вычислительным ресурсам и возможность восстановления локализованной информации с использованием тех крупномасштабных полей, которые глобальная модель предсказывает лучше всего. К примеру, количество осадков может оказаться удобнее восстанавливать не по осадкам глобальной модели, а по характеристикам крупномасштабной циркуляции и информации о рельефе.

При получении статистических соотношений используются различные методы: множественная линейная регрессия, корреляционный анализ и многие другие, в том числе искусственные нейронные сети (см. ссылки в работах [Kidson and Tompson, 1998; Li and Smith, 2009]).

При этом может привлекаться крупномасштабная информация не только из того региона, для которого требуется получить детализированные поля. Так, в работе [Li and Smith, 2009] рассматривается процедура восстановления зимних осадков в Южной Австралии по полям давления на уровне моря. При этом привлекается информация из региона, значительно превышающего Австралию. Рассчитывались эмпирические ортогональные составляющие, с которыми наблюдаемые зимние осадки связывались множественной линейной регрессией. Оказалось, что 4-х первых мод достаточно, чтобы описать значительную часть наблюдаемой изменчивости над большей частью Южной Австралии.

Методология статистического даунскейлинга похожа на методы статистической интерпретации выходной продукции гидродинамических моделей атмосферы, и сейчас используемые при прогнозе погоды. Пример – метод, описанный в работе [Васильев и Васильева, 1999], с определенными модификациями используется в Гидрометцентре РФ для прогноза погоды по пунктам, при этом результаты распространяются по Internet: <http://www.meteoinfo.ru/forecasts5000>.

Физический даунскейлинг. Локальные особенности атмосферных процессов связываются с крупномасштабной циркуляцией не статистическими соотношениями, а физическими формулами, выводимыми путем анализа уравнений баланса тепла, влаги и количества движения. Исходными данными служит крупномасштабная информация (в частности, переносы различных субстанций) и дополнительные сведения о подстилающей поверхности, не учтенные при крупномасштабном моделировании. Примером может служить работа [Кислов с соавт., 2007], в которой с использованием орографии с высоким пространственным разрешением детализируются поля приземной температуры и осадков. В данной работе учитывается влияние на приземную температуру собственно высоты орографии, снежного покрова (уточненного) и угла наклона поверхности. По информации о натекающих на орографические препятствия воздушных массах корректируются характеристики полей осадков.

В ряде работ при детализации состояния атмосферы используются физические параметризации, заимствованные из моделей атмосферы [Goyette and Laprise, 1996]. При этом уточнение крупномасштабной информации может проводиться непосредственно при счете модели – в этом случае блок даунскейлинга интегрируется в крупномасштабную модель [Ghan et al., 2006].

Преимуществами данного метода являются относительно невысокие вычислительные затраты и отсутствие зависимости от наблюдений. Основной недостаток – без рассмотрения динамики атмосферы с высоким разрешением неизбежно учитывается только часть региональных/ мезомасштабных атмосферных процессов.

Динамический даунскейлинг. Данный метод подразумевает обработку крупномасштабных полей (прогнозы глобальной модели или же наборы данных анализа/реанализа) с помощью модели с высоким пространственным разрешением. Модель с высоким пространственным разрешением использует крупномасштабные граничные условия, данные о состоянии поверхности (орография, неоднородности типов поверхности, температура поверхности океана). Согласно ряду методик дополнительно усваивается информация о характеристиках крупномасштабной циркуляции внутри рассматриваемой области. Модель с высоким разрешением при интегрировании вырабатывает региональную динамику атмосферы с той требуемой степенью детализации, которую позволяет используемое разрешение и физические параметризации.

Динамический даунскейлинг требует наличия достаточных вычислительных ресурсов для интегрирования модели с высоким пространственным разрешением. В ряде исследований это приводит к необходимости эксплуатации как глобальной, так и вложенной в нее региональной модели. Альтернатива эксплуатации нескольких моделей – использование глобальной модели с переменным разрешением ([Deque and Piedelievre, 1995; Fox-Rabinovitz et al., 2001]).

Детализация региональных и мезомасштабных процессов ограничена разрешением и набором переменных используемой динамической модели. Может оказаться, что предъявляемые требования к точности восстановления мелкомасштабных атмосферных процессов потребуют чрезмерных вычислительных затрат. Однако динамический даунскейлинг позволяет по крупномасштабной информации восстанавливать, хотя и с ограниченной точностью, все характеристики мезомасштабной циркуляции. Выходной продукцией может являться согласованный набор метеорологических полей на сетке модели с высоким пространственным и временным разрешением. Подобная информация может быть использована в

мезо- и микроклиматических исследованиях или, в свою очередь, служить в качестве входных данных для моделей переноса примесей ([Deng et al., 2004; Коновалов с соавт., 2009]).

В разделе 3 методика динамического даунскейлинга будет рассмотрена более подробно.

Статистико-динамический даунскейлинг. Данный метод используется в основном при климатических исследованиях. Глобальная циркуляция и интересующие исследователя характеристики региональной погоды и климата связываются через статистические соотношения, как и в статистическом методе. Но сами соотношения получаются не по наблюдениям, а с использованием результатов интегрирования модели атмосферы с высоким пространственным разрешением.

Статистико-динамический даунскейлинг является наиболее алгоритмически сложным методом. Последовательно должны быть выполнены следующие задачи: По расчетам глобальной модели или данным реанализа за несколько лет выделяются типы крупномасштабных погодных ситуаций, и рассчитывается частота их появления. Затем для каждого выделенного типа проводится один или несколько численных экспериментов с вложенной динамической моделью с высоким пространственным разрешением, соответствующие граничные и начальные условия обеспечиваются глобальной моделью. Далее выдаваемые динамической моделью результаты взвешиваются соответственно частоте наблюдения того или иного типа крупномасштабной циркуляции. Таким образом, получаются региональные распределения климатических параметров, соответствующие тому или иному глобальному представлению климата. Достаточно детально процедура динамико-статистического даунскейлинга описана в работе [Frey-Buness et al., 1995].

Преимущество данного метода по сравнению с чисто статистическим даунскейлингом – отсутствие зависимости от наблюдений. Т.е. он применим и в том случае, когда наблюдательная сеть недостаточна или же рассматривается какой-либо гипотетический климатический сценарий. В то же время метод не столь вычислительно тяжел, как чисто динамический даунскейлинг.

Статистико-динамический даунскейлинг не лишен недостатков. Как и при чисто динамическом даунскейлинге, пространственное разрешение восстанавливаемых особенностей мезомасштабной циркуляции определяется разрешением используемой модели. Другое ограничение (в том числе и по сравнению с динамическим даунскейлингом) – сведение всего многообразия циркуляционных особенностей атмосферы к некоторому набору типов. Также и экстремальные погодные и климатические события сложно охарактеризовать с использованием данного метода.

В работе [Fuentes and Heimann, 2000] предлагается расширение стандартного метода статистико-динамического даунскейлинга. Авторы вместо типичного деления крупномасштабной циркуляции атмосферы на статичные типы рассматривают циркуляционные эпизоды. Т.е. при детализированном численном моделировании вместо однородных крупномасштабных условий задается меняющееся во времени крупномасштабное поле таким образом, что атмосфера последовательно проходит через некоторый набор крупномасштабных состояний, соответствующему данному циркуляционному эпизоду. И к этой последовательной смене крупномасштабных характеристик циркуляции приспосабливается используемая численная модель с высоким пространственным разрешением.

ВЫВОД. Ни один из перечисленных методов повышения детализации метеорологических полей не является наилучшим для решения всех возможных задач, все методы обладают своими достоинствами и недостатками. Выбор исследователя должен определяться требованиями конкретной решаемой им задачи.

3. Методология динамического даунскейлинга

Единственным методом даунскейлинга, который позволяет восстанавливать в комплексе все характеристики мезомасштабной циркуляции, позволяя получить не статистическую информацию для того или иного крупномасштабного климатического сценария, а именно поля метеорологических величин для конкретной атмосферной циркуляции вместе с информацией об атмосферных процессах, является динамический даунскейлинг. Рассмотрим этот метод более подробно.

Как уже указывалось, в основе динамического даунскейлинга лежит интегрирование численной модели атмосферы с высоким пространственным разрешением при использовании некоторого набора условий, определяемых крупномасштабным состоянием атмосферы. В работе [Castro et al., 2005] проводится разделение методов динамического даунскейлинга на 4 группы в соответствии со способом согласования глобальной модели (или наборов данных крупномасштабного анализа) и используемой модели с высоким пространственным разрешением. Несколько видоизменив классификацию [Castro et al., 2005], выделим 3 типа взаимодействия вложенной региональной (мезомасштабной) и глобальной моделей:

1. Вложенная модель использует информацию о крупномасштабном состоянии атмосферы как на боковых границах области моделирования (граничные условия, обычно обновляемые через регулярные интервалы времени – 6 или 12 часов), так и внутри рассматриваемого региона. Используемая внутри области информация о крупномасштабном состоянии атмосферы представляет собой либо задаваемые начальные данные, либо же данные о крупномасштабном состоянии атмосферы, вводимые в модель по ходу интегрирования. На нижней границе задается высота орографии и некоторые характеристики поверхности, не воспроизводимые вложенной моделью. Например – температура поверхности океана и характеристики растительности. Данный тип динамического даунскейлинга позволяет восстановить информацию о

мезомасштабной циркуляции для конкретных моментов времени, при подобном даунскейлинге нередко используются обычные оперативные модели численного прогноза погоды. В качестве примера можно привести прогностические модели MM5 ([Grell et al., 1994; Duhdia et al., 2003]), RSM (детальное описание доступно по адресу <http://ecpc.ucsd.edu/projects/G-RSM/>), WRF ARW ([Skamarock et al. 2008]).

2. Данный тип отличается от предыдущего тем, что внутри рассматриваемой области информация о крупномасштабном состоянии атмосферы не используется. Применяется в основном в исследованиях климата. В качестве примера можно привести работы [Raisanen et al., 2001; Xue et al., 2007]. Из отечественных работ – работы [Школьник с соавт., 2000, 2005, 2008].

Для моделирования состояния атмосферы без привязки к крупномасштабным данным внутри области моделирования используются главным образом специальные климатические модели. Впрочем, ряд климатических моделей использует динамические блоки, однотипные с используемыми в моделях прогноза погоды. Примером может служить региональная климатическая модель RegCM3 ([Pal et al., 2007], детальное описание доступно на сайте <http://users.ictp.it/RegCNET/model.html>), в которой используется динамический блок гидростатической версии MM5.

3. Граничные условия из глобальной модели, в которой связаны атмосфера, океан, биосфера и криосфера, являются интерактивными – т.е. могут изменяться в соответствии с результатами счета вложенной модели.

Наиболее распространены методы динамического даунскейлинга, относящиеся к первым двум типам.

Кратко рассмотрим способы вложения региональной/ мезомасштабной модели в крупномасштабную. Наиболее распространенным является вложение без обратной связи, при котором на боковых границах рассматриваемой области задаются данные, переинтерполированные (в пространстве и во времени) с грубой сетки. Как правило, вдоль границ области моделирования задается некоторая буферная зона, в которой поле модели с высоким пространственным разрешением притягивается к данным глобальной модели. Примерами работ, использующих данный подход, являются [Raisanen et al., 2001; Nobre et al., 2001]. При использовании региональной климатической модели, основанной на модели ETA [Xue et al., 2007], буферная зона отсутствует.

Преимущество метода вложения детализированной модели без обратной связи заключается в простоте по сравнению с вложением с обратной связью. В первом случае возможно сначала провести расчеты с глобальной моделью, а затем отдельно интегрировать детализированную модель для интересующего региона или нескольких регионов.

В ряде работ используется двухкратное и даже трехкратное вложение сеток ([Kunstmann and Jung, 2003] – используется MM5, [Brandt et al., 2005] – ETA).

При многократном вложении сеток типичное соотношение горизонтального разрешения внутренней сетки к наружной обычно близко к 3. В то же время в работе [Beck et al., 2004] рассматривался эффект от различных способов вложения. Пространственное разрешение крупномасштабных данных составляло около 120 км, разрешение вычислительной сетки внутренней модели – 12 км. Рассматривалось два варианта вложения модели: 1) модель с разрешением 12 км вкладывалась напрямую; 2) сначала вкладывалась модель с разрешением 50 км, а уже в нее модель с разрешением 12 км. Эксперименты показали, что качество восстановления мелкомасштабных процессов оказались сравнимыми при том, что первый вариант заметно проще.

В работе [Feser and Storch, 2008] показан положительный эффект от многократного вложения сеток: использовалось двухкратное вложение сеток – 50 и 18 км, исходными крупномасштабными данными служил реанализ NCEP/NCAR. Однако в данном случае, по мнению автора представляемой работы, это был эффект процедуры притягивания состояния детализированной модели к крупномасштабным данным (spectral nudging – см. ниже).

Как уже упоминалось ранее, альтернативой вложенным моделям является использование моделей с переменным разрешением [Deque and Piedelievre, 1995]. Однако в этом случае при необходимости повторения какого-либо регионального эксперимента приходится проводить расчеты для гораздо большего региона или же всего земного шара. При использовании вложенной модели достаточно лишь перезапустить региональную/мезомасштабную модель в рассматриваемом регионе по заранее сохраненным глобальным данным.

Рассмотрим более детально проблему сопряжения модели с высоким пространственным разрешением с полями на сетке грубого разрешения.

Пусть M – фазовое пространство используемой для даунскейлинга мезомасштабной модели атмосферы. Это модельные переменные на модельной конечно-разностной сетке или в пространстве коэффициентов спектрального разложения. Состав и размерность пространства M определяют детальность процедуры даунскейлинга.

Пусть, далее, L – фазовое пространство состояний крупномасштабной модели или же полей реанализа в рассматриваемом регионе. Пространство L определяется имеющимся набором крупномасштабных полей и их разрешением, горизонтальным и вертикальным. К пространству L мы будем относить только ту часть фазового пространства крупномасштабной модели (полей реанализа), которая будет использоваться в процедуре даунскейлинга.

Подобным образом сформированные пространства M и L в общем случае должны иметь разную размерность – можно ожидать, что размерность M больше размерности L за счет более высокого пространственного разрешения используемой для даунскейлинга модели.

Пусть D – оператор, отображающий вектора из пространства L в пространство M . Это процедура преупроцессинга, которая по полям на грубой сетке рассчитывает поля на сетке мелкомасштабной модели:

$$\vec{s} = D\vec{r}.$$

(1)

Здесь \vec{r} – произвольный вектор пространства L , \vec{s} – соответствующий ему вектор пространства M . Естественные требования к D – сохранение максимума крупномасштабной информации и согласованность результирующих метеорологических полей. Поскольку размерность L меньше размерности M , оператор D может ставить в соответствие векторам крупномасштабного состояния не все векторы пространства M , а только некоторое их подмножество. В крупномасштабных полях отсутствует информация о региональной структуре метеорологических полей – эта информация отсутствует и в векторах, переведенных из L в M , но эти векторы могут содержать в себе всю требуемую для даунскейлинга информацию о крупномасштабном состоянии атмосферы.

Обозначим через U линейный оператор проектирования (сглаживания) из M на L . В этом случае по более детальным полям восстанавливаются поля меньшего разрешения. При данной процедуре часть информации о мелкомасштабной структуре рассматриваемых полей неизбежно теряется.

И оператор U , и оператор D основаны на процедурах интерполяции/сглаживания, дополненных расчетом переменных, присутствующих только в одной из рассматриваемых моделей. Скажем, в крупномасштабных полях могут отсутствовать данные о фазе облачности или присутствовать не все поля, характеризующие состояние приземного слоя в мезомасштабной модели.

Переведа вектор \vec{s} в пространство L , без потерь восстановить его в общем случае уже невозможно. Рассмотрим вектор \vec{s} :

$$\vec{s} = DU\vec{s}.$$

(2)

В векторе \vec{s} содержится составляющая вектора \vec{s} , воспроизводимая на крупномасштабной сетке, т. е. \vec{s} – крупномасштабная циркуляция. Вектор

$$\vec{s}' = \vec{s} - \vec{s},$$

(3)

представляет собой мелкомасштабную составляющую циркуляции, восстановление которой и есть задача процедуры даунскейлинга.

Как можно получить вектор \vec{s}' ? Имеется модель атмосферы с высоким пространственным разрешением, которая при интегрировании на некоторый срок вырабатывает региональную/мезомасштабную составляющую циркуляции как функцию от начального состояния и от региональных факторов, влияющих на состояние атмосферы – рельеф, неоднородность свойств поверхности и т.д.. Однако при этом в модельные поля добавляются еще и ошибки. Чем больше период интегрирования во времени, тем дальше уходит состояние модели от истинного состояния атмосферы – как за счет неточностей модели, так и как результат неустойчивости атмосферы, ограничивающей предсказуемость процессов.

Можно приблизить состояние модели с высоким разрешением к предполагаемому «истинному» состоянию атмосферы путем использования имеющихся данных о крупномасштабной динамике атмосферы. Один из стандартных подходов при климатическом моделировании заключается в том, что при интегрировании модели задаются граничные условия из глобальной модели или из наборов данных анализа. Однако при большой области моделирования (или глобальном даунскейлинге), когда основная часть крупномасштабной динамики является не приходящей через границы, а вырабатывается самой региональной/мезомасштабной моделью, такой подход неэффективен – с течением времени модель все равно уходит от состояния глобальной модели. Это не создает серьезных проблем в том случае, если исследователя интересует статистическая информация о состоянии атмосферы.

Однако, в том случае, если модель высокого разрешения содержит неточности, влияющие на вырабатываемый моделью статистический характер атмосферных процессов [Qian et al., 2003], или же если исследователя интересует детализированная циркуляция в какие-то конкретные моменты времени, то граничных условий для коррекции используемой модели с высоким пространственным разрешением недостаточно.

Существует несколько подходов к решению этой проблемы. Наиболее примитивный из них заключается в том, что информация с крупномасштабной сетки с некоторой временной дискретностью переводится на сетку модели с высоким разрешением, затем с использованием этой информации в качестве начальных данных, рассчитывается детализированный прогноз на некоторый срок.

$$\vec{s}_i^0 = D\vec{r}_i, \quad \vec{s}_i^{j+1} = A\vec{s}_i^j.$$

(4)

Здесь нижний индекс обозначает номер набора используемых крупномасштабных полей, верхний индекс обозначает номер шага по времени. A – оператор региональной/мезомасштабной модели. Временная дискретность между полями \bar{s}_1^j и \bar{s}_1^{j+1} многократно меньше, чем между полями \bar{r}_1^j и \bar{r}_1^{j+1} .

Недостатки описанного подхода очевидны – в начальный момент времени мезомасштабная структура данных отсутствует, и модели требуется некоторое время (сутки-двое) чтобы ее выработать. Однако при продолжительном интегрировании модель уходит от истинного состояния атмосферы.

Оператор D может содержать в себе элементы статистического и физического даунскейлинга – при расчете по грубым полям полей на сетке модели с высоким разрешением можно учесть особенности рассматриваемой территории. В частности, можно попытаться учесть циркуляции, возникающие за счет орографической или термической неоднородности рассматриваемой территории, а также неоднородности поля температуры в пограничном слое. Еще один возможный подход к более точному формированию оператора D , предложенный в работе [Важник, 2003], заключается в предвычислении орографической адаптации поля ветра.

Но существуют и другие, более совершенные способы использования данных с грубым разрешением при динамическом даунскейлинге. В работе [Stauffer and Seaman, 1990] предложен метод притягивания состояния модели с высоким разрешением к крупномасштабным полям по ходу интегрирования – так называемый nudging. Этот метод получил широкое распространение, в частности, в моделях MM5 ([Grell et al., 1994; Duhdia et al., 2003]) и WRF ARW ([Skamarock et al., 2008]). Возможность использования данного метода включена в число пользовательских опций этих моделей. Далее в тексте автор будет называть это метод «притягиванием» или «обычным притягиванием».

Суть метода заключается в том, что по имеющимся данным реанализа или прогноза погоды на грубой сетке рассчитываются состояния системы детализированной модели для заданных моментов времени. В уравнения же используемой для даунскейлинга модели вводятся специальные члены, служащие для притягивания к крупномасштабным данным. И на каждом шаге по времени проводится корректировка состояния модели:

$$\bar{s}^{j+1} = A\bar{s}^j + G(D\bar{r}^j - \bar{s}^j).$$

(5)

Рассматривается разность между состоянием модели и проинтерполированным на модельную сетку крупномасштабным анализом ($D\bar{r}^j$). \bar{r}^j – крупномасштабные поля, соответствующие j -му модельного шагу по времени (получены путем интерполяции по времени). Оператор G (обычно диагональная матрица) определяет характер и интенсивность притягивания.

Наиболее детально метод притягивания для модели MM5 описан в работе [Stauffer and Seaman, 1990], в модели WRF ARW версий 3.0.X (2008 год) используется несколько упрощенный вариант притягивания из MM5.

Основной недостаток метода – он уменьшает мелкомасштабную составляющую вырабатываемых детализированной моделью полей. На Рис. 1а показана задача притягивания – имеется поле данных на модельной сетке высокого разрешения и поле на грубой сетке, которое было бы желательно сохранить в ходе процедуры даунскейлинга.

Отклонения детализированных полей от крупномасштабных могут быть разделены на две составляющие: а) ошибка детализированной модели в описании крупномасштабной циркуляции; б) собственно мелкомасштабная циркуляция.

На Рис. 1б показан предельный случай, когда крупномасштабная составляющая вырабатываемых детализированной моделью полей полностью соответствует полям крупномасштабной модели или же полям реанализа. В этом случае использование обычного притягивания сводится к подавлению мелкомасштабных особенностей состояния атмосферы.

Подавление мелкомасштабной циркуляции при использовании обычного притягивания отмечено, в частности, в работах [Weaver et al., 2002; Castro et al., 2005].

Возможное решение этой проблемы можно представить уже по Рис. 1а. Если разделить крупномасштабную и мелкомасштабную составляющие полей модели с высоким пространственным разрешением и «притягивать» к крупномасштабным данным, только крупномасштабную составляющую метеорологических полей, то мезомасштабная информация (которая все равно не может быть подкорректирована по данным на грубой сетке) оставалась бы неизменной – см. Рис. 1б. Применительно к задаче даунскейлинга подобная методика, по-видимому, впервые была предложена в работах [Kida et al., 1991; Sasaki et al., 1995]. Этот метод получил название spectral nudging (далее в тексте «спектральное притягивание»).

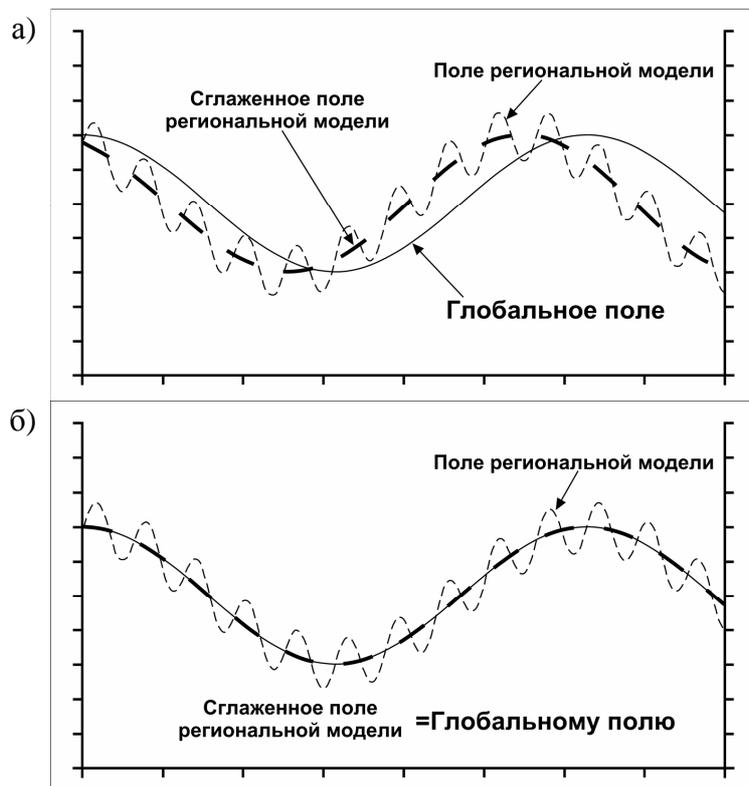


Рис. 1. Схема метода притягивания: а) постановка задачи, б) предельная ситуация, в которой притягивание к крупномасштабным полям нежелательно.

Достаточно подробно метод спектрального притягивания описан в работе [Storch, 2000]. В этой работе использовалась региональная климатическая модель REMO (REgional MOdel) [Jacob and Podzun, 1995, 1997]. Модель являлась конечно-разностной, горизонтальное разрешение составляло 0.5° . Крупномасштабными данными при интегрировании служили данные реанализа NCEP для 3-месячного периода с января по март 1993 г. Данные реанализа усваивались с дискретностью 6 часов, между этими моментами времени для крупномасштабных полей использовалась линейная интерполяция. Спектральное притягивание проводилось только в свободной атмосфере, вблизи поверхности земли модель свободно вырабатывала свое состояние, в заметной степени являющееся функцией от географических особенностей поверхности.

В уравнения модели были введены специальные члены (аналогично уравнению 5), которые притягивали региональные поля к крупномасштабным, но с разной скоростью для различных длин волн – максимальной для самых длинных волн, короткие же волны, целиком относящиеся к мелкомасштабной циркуляции, не корректировались.

В работе [Perez et al., 2003] было проведено сравнение результатов динамического даунскейлинга реанализов NCEP для побережья Испании с использованием моделей REMO и MM5. Разрешение обеих моделей составляло 50 км. Модель MM5 использовала обычное притягивание. В экспериментах с REMO использовался спектральное притягивание. При этом спектральное сглаживание применялось только к составляющим скорости ветра выше планетарного пограничного слоя. Рассматривались оценки относительно наблюдений. В итоге же обе модели показали близкие результаты. Более того, ошибки моделей относительно наблюдений также коррелировали друг с другом, что можно частично объяснить тем, что использовались одни и те же крупномасштабные данные и разрешение моделей было примерно равным. В литературе не представлено описаний и результатов экспериментов, в которых сравнивались бы методы обычного и спектрального притягивания с использованием одних и тех же крупномасштабных данных и одной и той же модели.

В версию WRF ARW 3.1, распространяемую с 9 апреля 2009 года, помимо прочих усовершенствований, включена возможность спектрального притягивания [ARW Version 3 User's Guide, 2009]. Однако ко времени подготовки данной статьи автору еще не встретились печатные работы, в которых счет WRF ARW в данном режиме рассматривались бы достаточно детально.

Метод спектрального притягивания, хотя и используется при работе с конечно-разностными моделями, гораздо легче реализуем для спектральных моделей, в которых изначально присутствует разделение различных длин волн. Подобный подход применяется в модели RSM (Regional Spectral Model, [Juang and Kanamitsu, 1994; Juang et al., 1997]), активно используемой в работах по повышению детализации крупномасштабных полей (пример – работы [Kanamitsu and Kanamitsu, 2007a, 2007b, 2008]).

4. Использование методологии инкрементного усвоения данных

При анализе состояния атмосферы широкое распространение получила схема циклического усвоения данных, предложенная еще в работе [Charney et al., 1969]. В цикле последовательно выполняются краткосрочный прогноз с заблаговременностью несколько первых часов и анализ состояния атмосферы. На шаге анализа усваиваются как текущие наблюдения, так и более ранние наблюдения (опосредованно, через т.н. первое приближение – поля численного прогноза, стартовавшего с анализа на предыдущем цикле усвоения).

На шаге анализа часто применяется инкрементный подход, методически похожий на метод спектрального притягивания. Согласно этому подходу поля первого приближения с вычислительной сетки используемой модели переводятся на более грубую сетку анализа. На грубой сетке по данным наблюдений рассчитываются поля поправок (инкрементов) к первому приближению. Рассчитанные поля инкрементов переводятся на модельную сетку и прибавляются к полям первого приближения на этой сетке.

Полезность инкрементного подхода определяется невозможностью восстановления по данным текущих наблюдений атмосферных образований с разрешением большим, чем разрешение наблюдательной сети. При инкрементном усвоении данных по наблюдениям корректируются атмосферные структуры тех масштабов, которые могут быть восстановлены по имеющимся данным наблюдений. Атмосферные же образования меньших масштабов, вырабатываемые в соответствии с воспроизводимой моделью динамикой атмосферы и используемыми физическими параметризациями, напрямую не корректируются.

Приложение подобного подхода к процедуре динамического даунскейлинга – с использованием вместо данных наблюдений крупномасштабных полей (пусть это будут последовательные наборы полей реанализа) привело бы к следующей технологии:

В начальный момент рассчитывается:

$$\bar{s}^0 = D\bar{r}^0.$$

(1')

Далее в цикле последовательно рассчитываются прогноз по модели с высоким разрешением:

$$\bar{s}_f^i = \tilde{A}\bar{s}_a^{i-1}.$$

(2')

здесь \bar{s}_f^i – прогноз модели с высоким разрешением на момент времени, к которому относится i -й комплект крупномасштабных полей; \bar{s}_a^{i-1} – вектор состояния модели в момент старта прогноза (этому моменту времени соответствует предыдущий набор полей анализа или реанализа); \tilde{A} – оператор модели, рассчитывающий состояние модели \bar{s}_f^i по \bar{s}_a^{i-1} .

После этого проводится процедура псевдоанализа с использованием полученного вектора \bar{s}_f^i как первого приближения.

$$\bar{s}_a^i = \bar{s}_f^i + \mathbf{IF}(\bar{r}^i, U\bar{s}_f^i).$$

(6)

В последнем выражении оператор \mathbf{I} – оператор «инкрементного препроцессинга». Этот оператор осуществляет перевод вектора поправок к первому приближению из пространства L в пространство M ; F – собственно оператор анализа, подготавливающий поля инкрементов на грубой сетке.

Цикл (2'), (6) выполняется многократно. Сходство предлагаемого подхода с используемыми в усвоении данных методами позволяет использовать теоретические и практические наработки, применяемые при усвоении данных (к примеру, работы [Цырульников с соавт., 2003; Skamaroch et al., 2008]). Систематический обзор методов усвоения данных приводится в монографии [Kalney, 2003].

Недостаток предлагаемого циклического подхода очевиден – в те моменты времени, в которые проводится анализ состояния атмосферы, нарушается непрерывность временных производных метеорологических величин. Для решения подобной проблемы в работе [Bloom et al., 1996] предлагается комбинирование инкрементного циклического усвоения данных и метода притягивания. Впрочем, автору неизвестны работы, в которых подобная техника применялась бы для задач даунскейлинга.

Методика 4D-Var ([Huang et al., 2009], к примеру), хотя и может обеспечить наилучшее качество выходной продукции, вне всякого сомнения, слишком сложна и вычислительно тяжела для ее применения в большинстве задач детализации метеорологических полей.

5. Заключение

В представляемой обзорной работе рассмотрено несколько основных способов повышения детализации крупномасштабных метеорологических полей.

Статистические методы наименее требовательны к вычислительным ресурсам, что немаловажно при обработке большого объема информации – скажем, выходных данных глобальной климатической модели за несколько десятков/сотен лет численного интегрирования. При этом, теоретически, может быть учтена более

сложная зависимость между глобальными и региональными полями, чем при использовании физических методов. Но при рассмотрении гипотетических климатических сценариев встает вопрос о применимости статистических соотношений, полученных по наблюдениям для текущего климата. Тем более, может оказаться, что наблюдательная сеть не обеспечивает сбора достаточного количества информации в интересующем исследователя регионе.

Физические методы требуют относительно немного вычислительных ресурсов и свободны от привязки к наблюдениям. Однако при их использовании неизбежно учитывается только часть локальных атмосферных процессов.

Динамические методы – единственные из рассматриваемых групп методов, которые позволяют получить детальную информацию о состоянии атмосферы в виде 4-мерных динамически согласованных полей, дополненных информацией о протекающих в атмосфере процессах. Но они требуют наибольшего объема вычислений, который в некоторых случаях может оказаться неподъемным. При коррекции состояния модели внутри области моделирования задаче даунскейлинга в наибольшей степени отвечает метод спектрального притягивания, использование которого более удобно для спектральных моделей.

Динамико-статистические методы позволяют получать, а затем и использовать статистические соотношения и при отсутствии достаточного количества наблюдений. Но при этом исследователю приходится, по сути, последовательно применять методы динамического и статистического даунскейлинга, что требует от него немалых усилий.

Т.е. все перечисленные методы повышения детализации метеорологических полей обладают своими достоинствами и недостатками, выбор исследователем того или иного метода определяется постановкой стоящей перед ним задачи.

Во многих случаях полезно сократить объем работ путем использования уже готовой методики и/или программного кода. Так, свободно распространяемая модель WRF ARW, способная работать как в глобальном, так и в региональном режиме, является, по сути, готовой системой динамического даунскейлинга. То же можно сказать и о модели RSM, версия которой от 1997 года свободно распространяется.

Сам автор в своих исследованиях предпочел более динамически развивающуюся WRF ARW. В определенной степени на выбор оказал влияние тот факт, что данная модель дополнена пакетом программ вариационного усвоения данных и блоком для описания переноса/эволюции химических примесей.

Работа поддержана грантом РФФИ 08-05-13545 ОФИ-Ц.

Список литературы

- Важник А.И. 2003. Численная схема адаптации крупномасштабного потока (циркуляции) к локальным особенностям рельефа // *Метеорология и гидрология*, **5**, 24-30.
- Васильев П.П., Васильева Е.Л. 1999. Система статистической интерпретации выходной продукции гидродинамических моделей для среднесрочного прогноза погоды // Сборник «70 лет Гидрометцентру России», СПб, Гидрометеоздат, 118-133.
- Вельтищев Н.Ф. 1988. Мезометеорология и краткосрочное прогнозирование. Сборник лекций, ВМО № 701. Женева. – 136 с.
- Кислов А.В., Георгиади А.Г., Алексеева Л.И., Бородин О.П. 2007. Построение полей температуры воздуха и атмосферных осадков в районах с редкой измерительной сетью (на примере бассейна р. Лена) // *Метеорология и гидрология*, **8**, 29-36.
- Коновалов И.Б., Еланский Н.Ф., Звягинцев А.М., Беликов И.Б., Бикманн М. 2009. Валидация химическо-транспортной модели нижней атмосферы Центрально-Европейского региона России с использованием данных наземных и спутниковых измерений // *Метеорология и гидрология*, **4**, 65-74.
- Моисеев Н.Н., Александров В.В., Тарко А.М. 1985. Человек и биосфера. – М.: Наука. – 272 с.
- Рубинштейн К.Г. 2002. Обеспечение метеорологической информацией моделей дальнего переноса примесей в атмосфере // *Метеорология и гидрология*, **9**, 17-31.
- Цырульников М.Д., Толстых М.А., Багров А.Н., Зарипов Р.Б. 2003. Развитие глобальной системы усвоения данных с переменным разрешением // *Метеорология и гидрология*, **4**, 5-24.
- Чавро А.И., Ноготков И.В., Дмитриев Е.В. 2008. Статистическая модель восстановления экстремальных значений приземной температуры на сети метеостанций в Московском регионе // *Метеорология и гидрология*, **7**, 5-16.
- Школьник И.М., Мелешко В.П., Гаврилина В.М. 2005. Валидация региональной климатической модели ГГО // *Метеорология и гидрология*, **1**, 14-27.
- Школьник И.М., Мелешко В.П., Павлова Т.В. 2000. Региональная гидродинамическая модель атмосферы для исследования климата на территории России // *Метеорология и гидрология*, **4**, 32-49.
- Школьник И.М., Молькентин Е.К., Надежина Е.Д., Хлебникова Е.И., Салль И.А. 2008. Экстремальность термического режима в Сибири и динамика пожароопасной обстановки в XXI веке: оценки с помощью региональной климатической модели ГГО // *Метеорология и гидрология*, **3**, 5-15.
- ARW Version 3 Modeling System User's Guide. Mesoscale & Microscale Meteorology Division. NCAR. July 2009.
- Brandt J., Skjoth C.A., Christensen J.H., Frohn L.M., Geels C. 2005. High resolution weather forecasting using dynamical downscaling. Proc. International Conference «Innovation, advances and implementation of flood forecasting technology» 17-19 October 2005, Troms. Norway.
- Castro C.L., Pielke R.A., and Leoncini G. 2005. Dynamical downscaling: Assessment of value retained and added using the Regional Atmospheric Modeling System (RAMS). // *Jour. of Geophysic. Res.*, **110**, 21.
- Charney J.G., Halem M., and Jastrow R. 1969. Use of incomplete historical data to infer the present state of the atmosphere // *J. Atmos. Sci.*, **26**, 1160-1163.
- Deng A., Seaman N.L., Hunter G.K., and Stauffer D.R. 2004. Evaluation of interregional transport using the MM5-SCIPUFF system // *Journal of Applied Meteorology*, **43**, 1864-1886.
- Deque M., Piedelievre J.P. 1995. High resolution climate simulation over Europe. // *Climate Dynamics*, **11**, 321-339.
- Duhdia J. et al, 2003. PSU/NCAR Mesoscale Modeling System. Tutorial Class Notes and User's Guide: MM5 Modeling System Version 3.
- Enke W., Spekat A. 1997. Downscaling climate model outputs into local weather elements by classification and regression. // *Jour. of Clim. Res.*, **8**, 195-207.
- Feser F., and von Storch H. 2008. A dynamical downscaling case study for typhoons in Southeast Asia using a Regional Climate Model // *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 1806–1815.
- Fox-Rabinovitz M.S., Lawrence L.T., Govindaraju R.C., Suarez M.J. 2001. A variable-resolution stretched-grid general circulation model: regional climate simulation // *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 453–469.
- Fuentes U., and Heimann D. 2000. An improved statistical-dynamical downscaling scheme and its application to the Alpine precipitation climatology // *Theoretical and Applied Climatology*, **65**, 119-135.
- Frey-Buness F., Heimann D., and Sausen R. 1995. A statistical-dynamical downscaling procedure for global climate simulations // *Theoretical and Applied Climatology*, **50**, 117-131.
- Ghan S.J., Shippert T., and Fox J. 2006. Physically based global downscaling: regional evaluation // *Journal of Climate*, **19**, 429-445.
- Goyette S. and Laprise J.-P. R. 1996. Numerical investigation with a Physically Based Regional Interpolation for Off-Line Downscaling of GCMs: FIZR // *Journal of Climate*, **9**, 3464-3495.
- Grell G.A., Dudhia J., and Stauffer D. 1994. A description of the fifth generation Penn State. NCAR Tech. Note NCAR/TN-397+STR. 117 P., Nat. Cent. For Atmos. Res., Boulder, Colorado.
- Huang X.-Y., Xiao Q., Barker D.M., Zhang X., Michalakes J., Huang W., Henderson T., Bray J., Chen Y., Ma Z., Dudhia J., Guo Y., Zhang X., Won D.-J., Lin H.-C., and Kuo Y.-H. 2009. Four-dimensional variational data assimilation for WRF: Formulation and preliminary results // *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 299–314.
- Jacob D., and Podzun R. 1997. Sensitivity studies with the regional climate model REMO // *Meteor. Atmos. Phys.*, **63**, 119-129.
- Jacob D., Podzun R., and Claussen M. 1995. REMO – A model for climate research and weather prediction. Proc. Int. Workshop on Limited-Area and Variable Resolution Models, Beijing, China, 273-278.
- Juang H.-M., Hong S., and Kanamitsu M. 1997. The NMC nested regional spectral model. An update // *Bull. of the AMS*, **78**, 2145-2143.
- Juang H.-M., and Kanamitsu M. 1994. The NMC nested regional spectral model // *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 3-26.
- Kalnay E. 2003. Atmospheric modeling, data assimilation and predictability. – Cambridge University Press. – 341 P.
- Kanamaru H., and Kanamitsu M. 2007. Fifty-seven-year California reanalysis downscaling at 10 km (CaRD10). Part I: System detail and validation with observations // *Journal of Climate*, **20**, 5553–5571.
- Kanamaru H., and Kanamitsu M. 2007. Scale-selective bias correction in a downscaling of global analysis using a regional model // *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 334–350.
- Kanamaru H., and Kanamitsu M. 2008. Dynamical downscaling of global analysis and simulation over the Northern Hemisphere // *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 2796-2803.
- Kidson J.W., and Tompson C.S. 1998. A comparison of statistical and model-based downscaling techniques for estimating local climate variations // *Journal of Climate*, **11**, 735-753.
- Kunstmann H., and Jung G. 2003. Investigation of feedback mechanisms between soil moisture, land use and precipitation in West Africa. Water Resources Systems // Water Availability and Global Change (Proceedings of symposium HS02a held during IUGG2003 at Supporo, July 2003). IAHS Publ no. 280.2003.
- Li Y., and Smith I. 2009. A statistical downscaling model for Southern Australia winter rainfall // *Journal of Climate*, **22**, 1142–1158.
- Murphy J. 1999. An evaluation of statistical and dynamical techniques for downscaling local climate // *Journal of Climate*, **12**, 2256-2284.
- Nobre P., Moura A.D., and Sun L. 2001. Dynamical downscaling of seasonal climate prediction over Nordeste Brazil with ECHAM3 and NCEP's Regional Spectral Models at IRI // *Bull. of AMS*, **82**, 2787-2796.

- Pal J.S., Giorgi F., Bi X., Elguindi N., Solmon F., Gao X., Rauscher S.A., Francisco R., Zakey A., Winter J., Ashfaq M., Syed F.S., Bell J.L., Diffenbaugh N.S., Karmacharya J., Konaré A., Martinez D., da Rocha R.P., Sloan L.C., and Steiner A.L. 2007. Regional climate modeling for the Developing World: The ICTP RegCM3 and RegCM3.5 // *Bull. of AMS*, **88**, 1395-1409.
- Perez S., Jimenez P.A., Navarro J., Montanez J.P., Barquero C.G., Cuerva A., Gonzalez-Rouco J.F., Valero F. 2003. Using the MM5 model for wind prediction in a complex terrain site. Proc. European Wind Energy Conference & Exhibition EWEC 2003, Madrid, Spain.
- Pielke R.A. 1984. Mesoscale meteorological modelling. – New York Academic Press. – 612 P.
- Qian J.-H., Seth A., and Zebiak S. 2003. Reinitialized versus continuous simulation for regional climate downscaling // *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 2857-2874.
- Raisanen J., Rummukainen M., and Ullerstig A. 2001. Downscaling of greenhouse gas induced climate change in two GCMs with the Rossby Centre regional climate model for northern Europe // *Tellus*, **53A**, 168-191.
- Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X.-Y., Wang W., Powers J.G. 2008. A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR TECHNICAL NOTE.
- Stauffer D.R., and Seaman N.L. 1990. Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model part I: experiments with synoptic-scale data // *Mon. Wea. Rev.*, **118**, 1250-1277.
- Von Storch, H., Langenberg H., and Feser F. 2000. A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes // *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 3664-3673.
- Xue Y., Vasic R., Janjic Z., Mesinger F., and Mitchell K.E. 2007. Assessment of dynamic downscaling of the continental U.S. regional climate using the Eta/SSiB regional climate model // *Journal of Climate*, **20**, 4172-4193.

A REVIEW OF MODERN METHODS FOR SPACIAL DETAILING OF METEOROLOGICAL FIELDS

R.B. Zaripov

Modern methods for spatial detailing (downscaling) of meteorological fields with an insufficient spatial resolution are considered. The basic advantages and disadvantages of statistical, physically based and dynamical-statistical approaches are briefly discussed. The greater attention is paid to the dynamical methods based on high resolution atmosphere models. Examples of works in which different downscaling techniques were used are listed. A conclusion: all downscaling methods possess advantages and disadvantages, a researcher needs to choose the best method proceeding from the specific problem to solve.

The nesting of high resolution atmosphere model into general circulation model grid is considered in short. Various ways methods of keeping simulations close to coarse data are analyzed. A conclusion: a method of spectral nudging is the best for downscaling purposes. The spectral nudging is easier for implementing in spectral models.

Comparison of intermittent incremental data assimilation and dynamical downscaling is spent. A conclusion: these techniques are close and some blocks of one technique can be used in the other.

Nowadays there are freely available high resolution atmosphere models (in particular, WRF ARW, RSM), that contains nudging techniques. These models are dynamical downscaling systems almost ready to use.

Key words: Downscaling, dynamical downscaling, atmosphere modeling, climate modeling, nudging dynamic model state to a given state.

Поступила в редакцию: 05.05.2009
Переработанный вариант: 30.12.2009