

ДИНАМИКО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ДЕТАЛИЗАЦИИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ*

К. Г. РУБИНШТЕЙН

Гидрометцентр России, Москва

e-mail: rubin@mecon.ru

А. Б. ШМАКИН

Институт географии РАН, Москва, Россия

e-mail: climate@igan.ru

Currently the main tool for the Weather Forecast is numerical modeling. In connection with this, in Russia and other countries different methods of downscaling have been developed. The method presented in this publication is a hybrid of statistical and energy balance models. Using this method we have the opportunity to make the spatial downscaling not only at the points of location of the meteorostations but in their vicinity as well. As an example, this method was applied for forecasts in the Pechora district.

Введение

Основным современным методом прогноза погоды является численное моделирование. Однако, несмотря на стремительный рост компьютерных мощностей и совершенствование моделей, пространственное разрешение моделей численных прогнозов остается недостаточным, прежде всего для потребителя. В модели трудно обеспечить воспроизведение адекватной пространственной изменчивости локального и регионального характера. В связи с этим в России и за рубежом интенсивно разрабатываются различные методики “детализации” численного прогноза. За рубежом подобные методики называют более-менее устоявшимся термином “downscaling”. В российской литературе точного аналога этому термину пока не сложилось. Его заменяют терминами “регионализация”, “уменьшение масштаба”, “телескопизация” и т. д. Вслед за работой [1] наиболее подходящим нам кажется термин “детализация”, который мы и предполагаем использовать ниже без кавычек.

В настоящее время имеется множество зарубежных и отечественных работ по применению методов детализации численных прогнозов различной заблаговременности с помощью статистических, динамических и вариационных процедур (см. обзор, например,

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 03-05-64312, № 04-05-64151, № 05-05-08018_ОФИ_а), а также INTAS (грант № 03-51-5296).

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2005.

в [1]). Предлагаемый в данной работе метод является гибридным. Он использует, с одной стороны, ряды наблюдений, с другой — результаты локальной энергобалансовой модели. Использование модели позволяет, в отличие от статистических методов, проводить детализацию не только в том месте, где имеется многолетний ряд наблюдений, но и в окружении. Для этого вводятся свойственные этим регионам характеристики подстилающей поверхности, в соответствии с ними пересчитываются ряды метеорологических параметров.

В работе предполагается использовать теплобалансную модель, которая развивается в Институте географии РАН более десяти лет. Эта модель в различных конфигурациях публиковалась ранее.

Для валидации метода было необходимо сочетание трех обстоятельств. С одной стороны, требуется детальная информация по характеристикам подстилающей поверхности региона, с другой — необходимо наличие длинного ряда данных метеорологических наблюдений с высокой временной дискретностью. В качестве такого региона выбран район г. Печора (Республика Коми), так как по нему имелись детальная информация об окружающих ландшафтах и необходимый набор метеорологических параметров. Третьим аргументом для выбора является наличие эталонных эмпирических данных, по которым можно судить о качестве работы модели. В нашем распоряжении данные о температуре поверхности были только для одной недели в мае 1993 года. Поэтому валидация проводилась для этой недели. Ниже приводятся результаты валидации.

1. Описание метода детализации температуры и влажности почвы

Эксперименты по воспроизведению температуры подстилающей поверхности проводились с использованием модели вертикального энерго- и влагообмена в системе почва — снежный покров — растительность — атмосфера, разработанной для подобных задач в лаборатории климатологии Института географии РАН. Примеры применения модели для расчета режима тепло- и влагообмена в различных природных условиях приведены в [3] и др. Модель с 1993 года участвует в различных международных проектах, посвященных сравнению моделей такого класса и вычислению характеристик тепло- и влагообмена в различных ландшафтах [5]. С тех пор модель была существенно усовершенствована, но в полной версии не публиковалась. В своей нынешней версии модель способна воспроизводить пространственно-временные изменения энерго- и влагообмена в различных ландшафтах суши на уровне лучших мировых образцов [5].

Модель включает вычисление полного цикла переноса и трансформации тепла и влаги на поверхности суши. В модели учитываются следующие физические процессы: перехват осадков растительностью, формирование локального стока излишков воды, впитывание воды в почву, водообмен между слоями почвы, испарение с поверхности почвы и транспирация воды растительным покровом, турбулентный теплообмен в приземном слое атмосферы, кондуктивный теплообмен в почве и снежном покрове, снегонакопление и снеготаяние, промерзание и оттаивание почвы и грунта. Ряд параметров, характеризующих свойства ландшафтов с точки зрения энерго- и влагообмена (например, теплопроводность почвы, аэродинамическая шероховатость), меняются во времени в зависимости от характеристик состояния (влагосодержания почвы, высоты снежного покрова и т. д.). Модель интегрируется с шагом по времени, равным одному часу. Для валидации модели и согла-

сования параметров она должна быть проинтегрирована на сроки от нескольких месяцев до нескольких лет. На каждом шаге по времени (т. е. каждый час) задавался набор реальных метеорологических параметров, включающий температуру и влажность воздуха, скорость ветра, интенсивность осадков, облачность и атмосферное давление. Кроме того, задавался набор параметров, описывающих свойства данного ландшафта, причем по некоторым параметрам (например, по листовому индексу) — с учетом сезонного хода.

На каждом шаге по времени вычислялись следующие переменные состояния: температура поверхности ландшафта, температура поверхности почвы под снегом (при его наличии), температура в почве на четырех расчетных уровнях (0.05, 0.3, 0.5, 5 м), влагосодержание почвы, среднее для четырех слоев (0...0.1, 0.1...0.4, 0.4...1, 1...5 м), количество снега в водном эквиваленте и количество жидкой воды в снеге, количество осадков, перехваченных растительностью. Вычисляются также потоки, обеспечивающие перенос тепла и влаги в системе и фазовые переходы.

2. Ландшафтные и метеорологические параметры региона

Для экспериментов по району г. Печора были заданы параметры, описывающие свойства почвы и растительности на данной территории. Для этого были использованы материалы крупномасштабных лесоустроительных, почвенных и гидрогеологических карт [7–9]. Кроме того, использовались данные по характерным почвенным профилям Республики Коми [7] и характеристикам грунтовых вод [7]. В соответствии с данными о почвах и растительности в пределах исследуемой территории было выделено 33 сочетания типов почв и растительности. В результате дальнейшего сокращения был сформирован итоговый список из 18 сочетаний типов почв и растительности, для которых и проводились вычисления (в дальнейшем будем называть эти сочетания типами ландшафтов).

Для каждого типа ландшафта задавался ряд параметров, описывающих свойства растительности и почвы (альbedo и высота растительности; листовый индекс с сезонным ходом; плотность почвы, теплопроводность почвы в сухом и насыщенном водой виде и т. д.). При этом свойства почвы, включая ее механический состав, задавались переменными по вертикали, что отражает реальную ситуацию в этом районе.

В качестве метеорологических параметров использовались данные станции Печора за 1990–2000 годы. Наличие детальной метеорологической информации, полученной с высоким временным разрешением (4–8 сроков наблюдений в сутки) непосредственно в исследуемом районе, позволило обеспечить необходимую точность расчетов с точки зрения внешних параметров. Исходные данные по четырем срокам в сутки (1990–1995 годы) и по восьми срокам в сутки (1996–2000 годы) интерполировались для получения ежечасных данных. Сроки наблюдений (0, 6, 12 и 18 часов по Гринвичу в четырехсрочном варианте, с четырьмя промежуточными сроками в восьмисрочном варианте) позволяли достаточно точно описать суточный ход метеорологических параметров, поскольку максимальные и минимальные значения ряда параметров (температуры воздуха, скорости ветра и др.) обычно наблюдаются около 3 и 15 часов местного времени (т. е. в 0 и 12 по Гринвичу). Продолжительность осадков для данного района (используемая для перевода полусуточных измеренных сумм осадков в их интенсивность по часам) задавалась по данным [10].

3. Анализ результатов расчетов для различных ландшафтов

Выбор интервала расчетов определило наличие данных измерений температуры поверхности почвы. Несмотря на наличие более чем десятилетних рядов стандартных метеорологических данных со станции Печора, температура почвы в них практически отсутствовала или появлялась лишь эпизодически. В связи с этим наличие непрерывных данных за одну неделю мая 1993 года определило наш выбор периода валидации.

В районе г. Печора встречаются 18 различных типов ландшафтов, но наиболее характерны из них четыре, занимающие основную площадь: березовый лес на суглинистой глееподзолистой почве; березовый лес на песчаной подзолистой почве; редколесье на суглинистой подзолистой почве; пойменный луг на суглинистой аллювиальной дерновой и дерново-глеевой почве. Именно для них анализировались модельные результаты.

На рис. 1 представлены примеры графиков изменения модельной температуры в верхнем слое почвы (0...0.1 м) за 7.5 суток (1–8 мая 1993 года) для различных ландшафтов в районе г. Печора. На этих же графиках нанесены значения температуры почвы, наблюдавшиеся на метеостанции Печора. Первое, что необходимо отметить, это в целом удачное воспроизведение моделью основных особенностей температуры поверхности почвы и ее суточного хода. Можно видеть также, что суточный ход в верхних слоях воспроизводится с несколько отличающейся для различных ландшафтов амплитудой. Так, для ландшафта 2 (березовый лес на суглинистой глееподзолистой почве) средняя суточная амплитуда составляет 7°C , для ландшафта 6 (редколесье на суглинистой подзолистой почве) — 10°C , а для ландшафта 14 (пойменный луг на суглинистой аллювиальной дерновой и дерново-глеевой почве) — 15°C . По данным наблюдений, амплитуда суточного хода колебалась от 3 до 15°C .

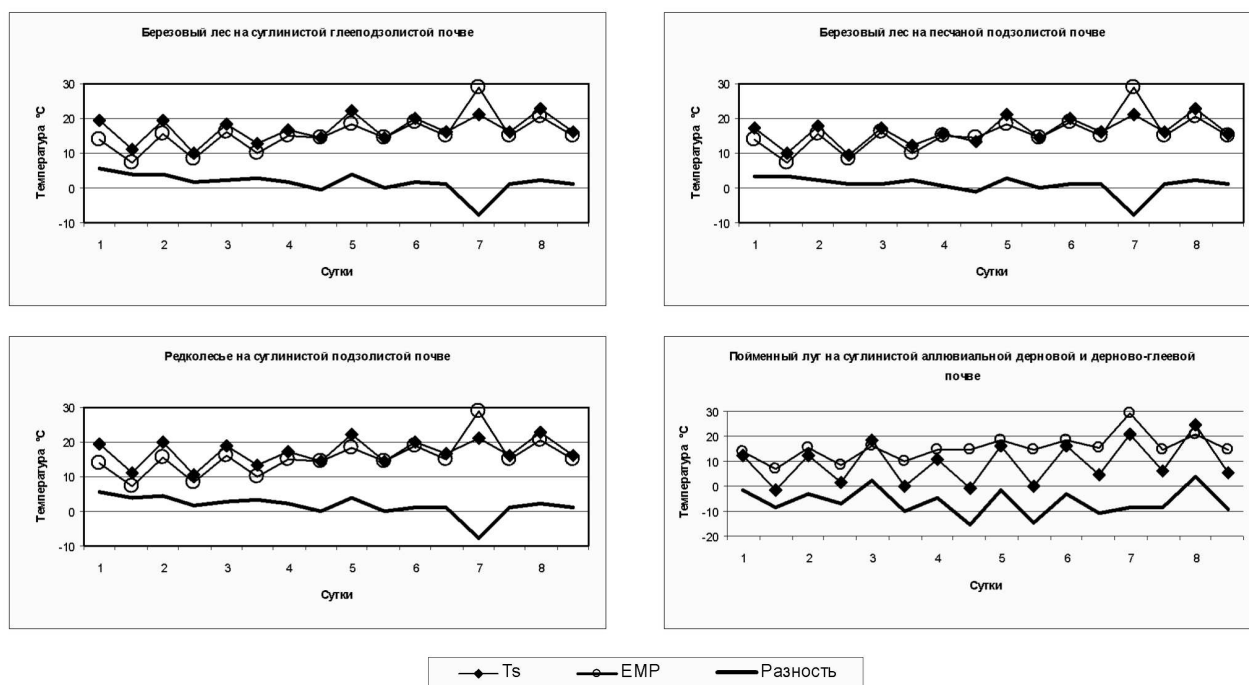


Рис. 1. Пример изменения со временем температуры почвы на поверхности по данным агрометеорологических наблюдений и моделирования для различных ландшафтов за 1–7 мая 1993 года.

Характеристики различий температуры поверхности ($^{\circ}\text{C}$) на различных ландшафтах
в районе г. Печора

Ландшафт	Ср. разн.	Min	Max	Дисперсия	Корреляция
Пойменный луг на суглинистой аллювиальной дерновой почве	-6,29	-15.3	4.1	5.48	0.78
Редколесье на песчаной почве	0.83	-8.0	3.2	2.61	0.86
Березовый лес на песчаной почве	1.54	-7.9	5.7	2.97	0.81
Березовый лес на глееподзолистой почве	1.63	-7.8	5.3	2.94	0.81

Количественные характеристики различий между данными измерений на метеостанции Печора и расчетами температуры поверхности для различных ландшафтов приведены в таблице. Из нее видно, что средние величины расхождения для всех основных ландшафтов, кроме пойменных лугов, не превосходят 2°C . На лугах среднее различие порядка 6 град., причем преобладает тенденция к занижению температуры в модельных расчетах. Это объясняется, очевидно, положением лугов: моделирование проводилось для лугов, расположенных в поймах рек при очень неглубоком залегании грунтовых вод, что обеспечивает постоянный подток воды к почвенным горизонтам и ее испарение. В то же время метеостанция Печора находится на суходольном лугу, на водораздельном участке, где грунтовые воды залегают существенно глубже и фон температуры поверхности выше.

Наименьшее расхождение между данными измерений и вычислений температуры поверхности получено для березового редколесья (0.83), что и естественно, так как измерения проводятся на открытой площадке, которая по свойствам ближе всего к редколесью. Корреляция временного хода рядов температуры для всех ландшафтов весьма высока (порядка 0.8), что связано прежде всего с удачным описанием моделью суточного хода. Видно, что температура верхнего слоя почвы различается для различных типов ландшафтов на 8°C (от 9.14 до 17.06 $^{\circ}\text{C}$), что соответствует пространственной изменчивости для этого времени в районе г. Печора. Видно также, что прогрев, который наблюдается для всех типов ландшафтов, происходит с разной скоростью. Наибольшие изменения за эту неделю наблюдаются на заболоченном пойменном лугу (дисперсия за неделю 8.42), что связано с процессами испарения излишков весенней влаги, а наименьшие — в березовом лесу. Так, для березового леса скорость нагрева составляла 0.38 град. в сутки, для редколесья 0.26, а для пойменного луга — 0.47 град. в сутки. Таким образом, можно констатировать, что модель реалистично воспроизводит температуру и ее временную изменчивость, а также разнообразие температуры почвы для различных ландшафтов. В дальнейшем эти результаты можно использовать для процедуры детализации численных прогнозов температуры поверхности и воздуха.

Оценить реалистичность воспроизведения моделью характеристик влажности почвы оказалось более сложно, чем температуры, в связи с отсутствием данных измерений. Даже средних многолетних данных для этих регионов нам не удалось обнаружить. Все, что мы смогли сделать, это сравнить результаты расчетов с данными станции Усть-Илим (200 км от станции Печора) приведенными в [2], как ближайшей к выбранному для испытания методики региону.

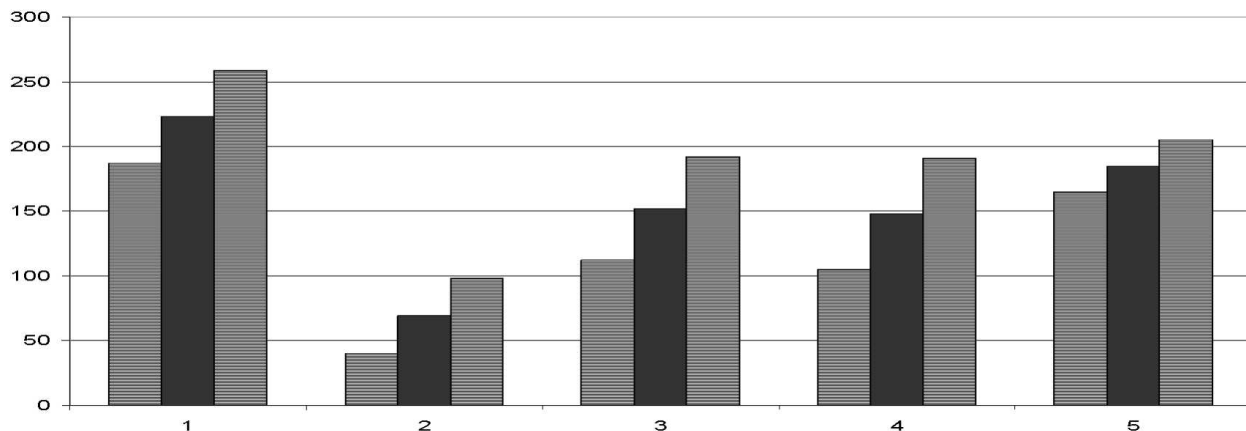


Рис. 2. Среднее влагосодержание метрового слоя почвы в мае в районе станций Усть-Цильма (1972–1985 годы) и Печора (1990–2000 годы), мм: 1 — Усть-Цильма; 2 — Печора, березовый лес на суглинистой глееподзолистой почве; 3 — Печора, березовый лес на песчаной подзолистой почве; 4 — Печора, редколесье на суглинистой подзолистой почве; 5 — Печора, пойменный луг на суглинистой аллювиальной дерновой и дерново-глеевой почве. Сплошные столбцы — средние значения, штрихованные — диапазон, равный среднеквадратическому отклонению.

На рис. 2 представлены примеры изменения влажности в метровом слое почвы за те же сроки и для тех же, что и на рис. 1, ландшафтов. На графиках кроме результатов моделирования приведены средние климатические величины для мая в метровом слое почвы и ее дисперсии. Видно, что только для луга моделируемая влага была близка к минимальным значениям климатических величин. Для остальных ландшафтов она получилась в 1.5 раза меньшей. С другой стороны, можно видеть, что изменения влажности в различных ландшафтах при одних и тех же метеорологических условиях еще более разнообразны, чем температуры.

Так, при общем повышении температуры влажность в верхних слоях почвы заметно уменьшается в лесу и редколесье и практически не изменяется на лугу. Можно видеть, что наибольшие величины влажности (9.08) получались для заболоченного луга, а наименьшие (2.56) — в березовом лесу, т. е. различаются примерно в три раза, их изменения за неделю отличаются не так заметно.

В отсутствие данных конкретных наблюдений влажности почвы трудно оценить количественно степень реалистичности воспроизведения моделью величины влажности, но можно видеть разнообразие величин влажности почвы для различных ландшафтов и надеяться, что результаты будут использованы в процедуре детализации численных прогнозов.

Выводы и дальнейшие планы

Из анализа результатов, приведенных на рис. 1 и 2 и в таблице, следует, что при одних и тех же метеорологических условиях с помощью предложенного метода удастся получить реалистическую картину разнообразия температуры подстилающей поверхности и влажности почвы для различных ландшафтов региона. С помощью имеющейся в распоряжении модели пограничного слоя авторы предполагают получать температуру и влажность воздуха над всем диапазоном ландшафтов региона и использовать эти новые ряды для де-

тализации результатов численных прогнозов погоды не только в точки метеорологических станций, а и во все имеющиеся в регионе ландшафты.

Таким образом, можно считать, что процедура прошла настройку и валидацию для региона г. Печора прежде всего для температуры. Конечно, процесс настройки процедуры на определенный регион требует затрат времени, но можно надеяться, что для любой следующей области эти затраты будут занимать значительно меньше времени и сил.

Список литературы

- [1] ДМИТРИЕВ Е.В., РУБИНШТЕЙН К.Г., ЧАВРО А.И. Детализация крупномасштабного поля приземной температуры для Московского региона // Метеорология и гидрология. 2003. № 7. С. 19–30.
- [2] МЕЩЕРСКАЯ А.В., БОЛДЫРЕВ Н.А., ШАПАЕВА Н.Д. Средние областные запасы продуктивной влаги в почве и высота снежного покрова. Статистический анализ и примеры использования. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 243 с.
- [3] SHMAKIN A.B. The updated version of SPONSOR land surface scheme: PILPS-influenced improvements // Global and Planetary Change. 1998. Vol. 19, N 1–4. P. 49–62.
- [4] CLAPP R.B., HORNBERGER G.M. Empirical equations for some soil hydraulic properties // Water Resources Research. 1978. Vol. 14, N 4. P. 601–604.
- [5] CHEN T.H., HENDERSON-SELLERS A., MILLY P.C.D. ET AL. Cabauw experimental results from the project for intercomparison of land-surface parameterization schemes (PILPS) // J. of Climate. 1997. Vol. 10, N 6. P. 1194–1215.
- [6] ШМАКИН А.Б., КРЕНКЕ А.Н., МИХАЙЛОВ А.Ю., ТУРКОВ Д.В. Роль ландшафтной структуры поверхности суши в климатической системе // Изв. РАН. Сер. географическая. 2001. № 4. С. 38–43.
- [7] ГИДРОГЕОЛОГИЯ СССР. Т. 42 / Под ред. В.Г. Черного. М.: Недра, 1970. 288 с.
- [8] ПЛАН лесонасаждений Березовского лесничества Каджеромского лесхоза. Комитет природных ресурсов Республики Коми МПР РФ, Сыктывкар, 1986.
- [9] ПЛАН лесонасаждений Канинского лесничества Печорского механизированного лесхоза. Лесохозяйственное территориальное производственное объединение “Комилесхоз”. Комитет природных ресурсов Республики Коми МПР РФ, Сыктывкар, 1989.
- [10] АЛИБЕГОВА Ж.Д. Пространственно-временная структура полей жидких осадков. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 230 с.

Поступила в редакцию 2 июня 2005 г.