

В.Н. Крупчатников, А.А. Фоменко

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕГИОНАЛЬНОГО КЛИМАТА СИБИРИ

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск*

Поступила в редакцию 3.03.99 г.

Принята к печати 30.03.99 г.

Представлена региональная модель динамики атмосферы. Модель является составной частью глобальной климатической модели ECSib [1, 2], имеет повышенное пространственное разрешение и рассчитана на воспроизведение климатических атмосферных характеристик на пространственных масштабах, не описываемых глобальной моделью. В модели осуществлен более детальный учет процессов взаимодействия с подстилающей поверхностью. Поверхностный и деятельный слои почвы учитывают наличие растительного покрова, слоя снега на поверхности, процессы тепло- и влагообмена в почвенном слое, процессы таяния снега на поверхности, поступление влаги в почву за счет крупномасштабных и конвективных осадков, перехват осадков растительным покровом, эффекты фильтрации влаги [3]. Приведен ряд результатов численного моделирования климата Сибири.

**1. Введение**

Глобальные модели общей циркуляции (ГМОЦА), которые сейчас широко используются для моделирования климата, исследований влияния ряда внешних факторов на климатические вариации на различных временных масштабах, для изучения обратного влияния подстилающей поверхности, покрытой льдами или растительностью и т.п., тем не менее имеют ряд ограничений своей применимости. Во-первых, из-за неадекватности описания подсеточных физических процессов (облачности, осадков, турбулентных потоков в погранслое и т.д.), которые оказывают сильное влияние на мезомасштабные процессы. Во-вторых, из-за грубого разрешения пространственной разностной сетки. В-третьих, из-за грубого учета особенностей подстилающей поверхности (как правило, – следствие второй причины).

Одним из подходов, который позволяет исключить две последние причины, является моделирование регионального климата. Пространственное разрешение в региональных моделях климата увеличивается так, чтобы можно было явно описать мезомасштабные явления, которые в том числе обусловлены мезомасштабными особенностями подстилающей поверхности региона. На боковых границах в качестве краевых условий используются либо результаты глобального анализа наблюдений, либо данные моделирования общей циркуляции атмосферы с помощью численных моделей. Использование данных глобального анализа предпочтительней, так как в этом случае будут исключены крупномасштабные ошибки моделирования. Вероятно, первой работой, где были показаны возможность и обоснованность такого подхода, была работа [4]. Авторам удалось показать, как можно улучшить результаты моделирования регионального климата на примере территории США. Идея регионального моделирования получила дальнейшее развитие [5] и нашла широкое применение при исследовании регионального климата Европы [6,7] и Арктического региона [8].

В данной статье основное внимание при построении региональной модели динамики атмосферы было уделено совершенствованию параметризаций физических процессов

подсеточных масштабов, в частности процессов взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью. Такая постановка вопроса обусловлена интересами, связанными с изучением влияния на климат специфических особенностей ландшафта Сибири, таких как большие лесные массивы, огромные пространства болот и тундры. Параметризация процессов взаимодействия поверхности земли и атмосферы является одной из важнейших частей разработки климатических моделей. Сами по себе условия на поверхности (краевые условия) в значительной степени определяют квазистационарное состояние, которое хотелось бы получить в результате численного моделирования.

К настоящему времени существует достаточное количество работ, посвященных этой проблеме, с описанием схем параметризаций, с достаточно полным учетом важнейших аспектов взаимодействия, в частности [9–12].

В настоящей статье приведен ряд результатов численного моделирования динамики атмосферы для Сибирского региона на основе разработанной в Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН новой схемы параметризаций поверхностных процессов [3], которая является существенным развитием схемы, используемой в более ранних версиях модели общей циркуляции атмосферы и прогноза погоды [1, 2].

**2. Региональная модель атмосферы**

Региональная модель атмосферы является составной частью глобальной климатической модели ECSib [1]. Результаты математического моделирования климата на основе глобальной модели позволяют в целом получить качественно верную картину распределения основных атмосферных характеристик [2]. Однако ввиду того, что глобальная модель имеет горизонтальное пространственное разрешение  $5 \times 4^\circ$ , это не позволяет изучать детально тонкую структуру региональных особенностей. В связи с этим и была разработана региональная модель динамики атмосферы, имеющая пространственное разрешение  $1,66 \times 1,25^\circ$ , что в средних широтах дает почти квадратную ячейку интегрирования с горизонтальным разрешением

около 130 км. Количество и положение вертикальных уровней совпадают с глобальной моделью. Область интегрирования составляет сферический прямоугольник 40–146,6° в.д. и 40–80° с.ш. Выбор области интегрирования обусловлен повышенным интересом к Сибирскому региону.

В целом математическая реализация региональной модели практически не отличается от глобальной. Специфика заключается в необходимости постановки боковых граничных условий, обеспечивающих ее взаимодействие с глобальной моделью. В качестве боковых граничных условий задаются значения эволюционных переменных на границах области, полученные из глобальной модели с помощью интерполяции на более мелкую сетку. В процессе интегрирования возможна генерация «паразитарных» коротких волн в результате ложного отражения на границе области вытекания потока. Для решения этой проблемы используется релаксационный метод усвоения краевых условий Дэвиса [13].

### 3. Параметризация основных физических процессов

В отличие от использовавшейся в более ранних версиях модели схемы поверхностного слоя [1, 2], в данной модели разработана новая версия параметризации деятельного слоя суши [3]. Этот вариант модели сочетает достаточно полный учет физических факторов для оценки эффектов взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью. В представленной модели деятельного слоя суши учитываются растительный покров, наличие снега на поверхности суши, процессы в верхнем почвенном слое. Учитываются процессы таяния, уменьшения влаги на поверхности за счет ее фильтрации в глубь почвы, процесс стока влаги на поверхности, поступление влаги за счет крупномасштабных и конвективных осадков и осадков в виде снега, перехват осадков растительным покровом. На каждом шаге по времени рассчитываются температура поверхности почвы, температура четырех почвенных слоев, турбулентный поток тепла от поверхности, поток тепла в глубь почвы, влажность поверхности почвы, влага в поверхностном слое, поток влаги от поверхности.

В модели используется одноуровневое представление растительного покрова, который стягивается в пленку, прилегающую к почве. Влагосодержание поверхностного слоя определяется в модели с учетом осадков, испарения, процессов таяния. Турбулентный поток влаги вычисляется по данным о влажности на поверхности почвы и на ближайшем расчетном уровне. В модели рассчитывается суммарное поступление влаги от поверхностного слоя, состоящее из потока влаги от заснеженной поверхности, турбулентных потоков влаги от растительного покрова, оголенной почвы и транспирации. С учетом тепла, выделяемого при таянии снега, проводится пересчет приземной температуры и глубины снежного покрова. С учетом поступления осадков и процессов таяния на каждом шаге пересчитываются влага поверхностного слоя, влажность на поверхности почвы, сток влаги на поверхности, фильтрация влаги в глубь почвы.

Система «почва – растительность – атмосфера» схематично представлена на рис. 1.

Внешние по отношению к данной системе параметры: температура и влажность воздуха, скорость ветра, осадки, прямая ( $I_s$ ), рассеянная ( $i_s$ ) радиация, противозлучение атмосферы ( $E_{эф}$ ), температура на нижней границе расчетного слоя почвы ( $T_{cl}$ ).

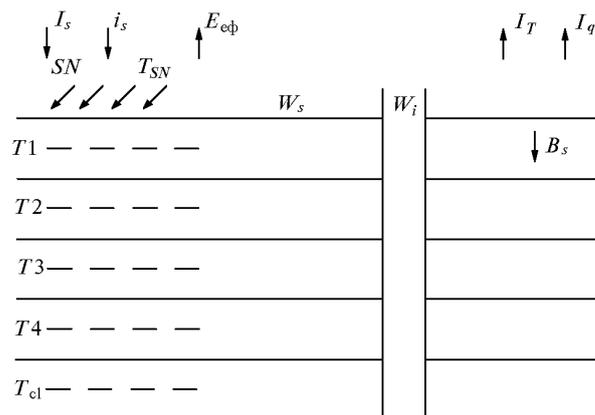


Рис. 1. Схема представления системы «почва – растительность – атмосфера» для построения модели взаимодействия атмосферы с деятельным слоем почвы

Детально в виде математических формул и их реализации модель описана в [3].

### 4. Результаты математического моделирования

Эксперимент по исследованию чувствительности модели региональной атмосферы к новой схеме параметризации взаимодействия с подстилающей поверхностью проводился следующим образом. В начале было получено квазиравновесное климатическое состояние атмосферы на основе 10-летнего интегрирования глобальной модели с учетом годового хода солнечной радиации. В процессе интегрирования зенитный угол склонения Солнца ежедневно менялся в зависимости от дня года. При этом суточный ход солнечной радиации не учитывался. В качестве входных параметров задавались среднемесячные климатические значения температуры поверхности океана, полученные по данным AMIP, распределение ледяного покрова, среднемесячные климатические значения температуры и влажности почвы на глубине. В модели были зафиксированы высота топографии, характерная для принятого пространственного разрешения, и параметр шероховатости над сушией, зависящий от типа подстилающей поверхности, урбанизации и топографии. Значения альbedo подстилающей поверхности зависели от характеристик подстилающей поверхности и менялись во времени с их изменением.

На основе полученного состояния в последний год интегрирования проводился совместно с глобальной расчет по региональной модели с использованием новой разработанной схемы параметризации сроком на один год. При этом все внешние параметры для региональной модели были взяты с учетом увеличившегося пространственного разрешения. Результаты моделирования представлены на рис. 2–5.

Пространственное распределение рассчитанных характеристик, таких как приземная температура, приземное давление, осадки, показывает, что увеличение пространственного разрешения и использование усовершенствованной параметризации процессов взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью позволяет получать более детальную картину, в которой ярко проявляются региональные особенности. В частности, в региональной модели хорошо выражены острова тепла над водной поверхностью в зимние месяцы (Байкал, Балхаш, Арал). Этого не наблюдается в глобальной модели, поскольку данные образования не описываются при используемом в ней пространственном разрешении (см.

рис. 2). Естественно, что это сказалось на приземном давлении, которое уменьшилось над областями, в которых расположены водные бассейны регионального мас-

штаба. Это в свою очередь привело к изменению общей картины распределения приземного давления (см. рис. 3).

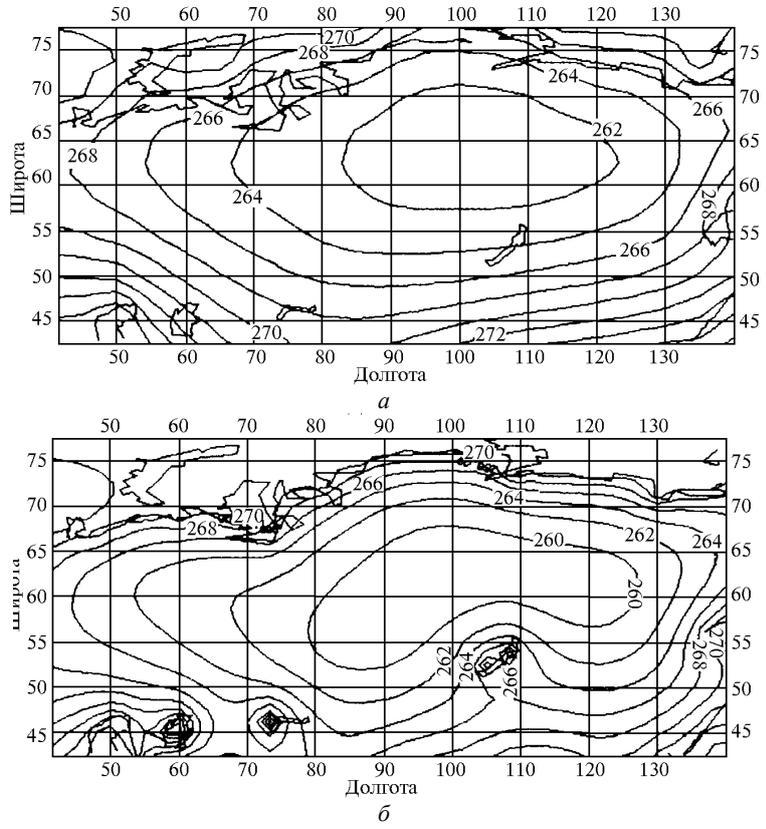


Рис. 2. Среднефевральское распределение приземной температуры (К), рассчитанное по глобальной (а) и региональной (б) моделям

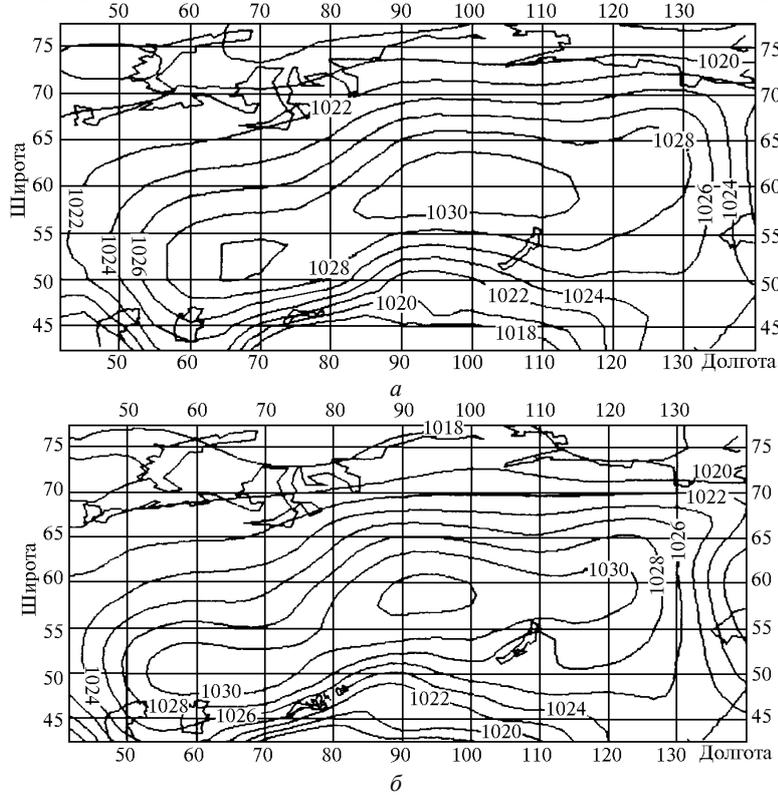


Рис. 3. Среднефевральское распределение приземного давления (гПа), рассчитанное по глобальной (а) и региональной (б) моделям

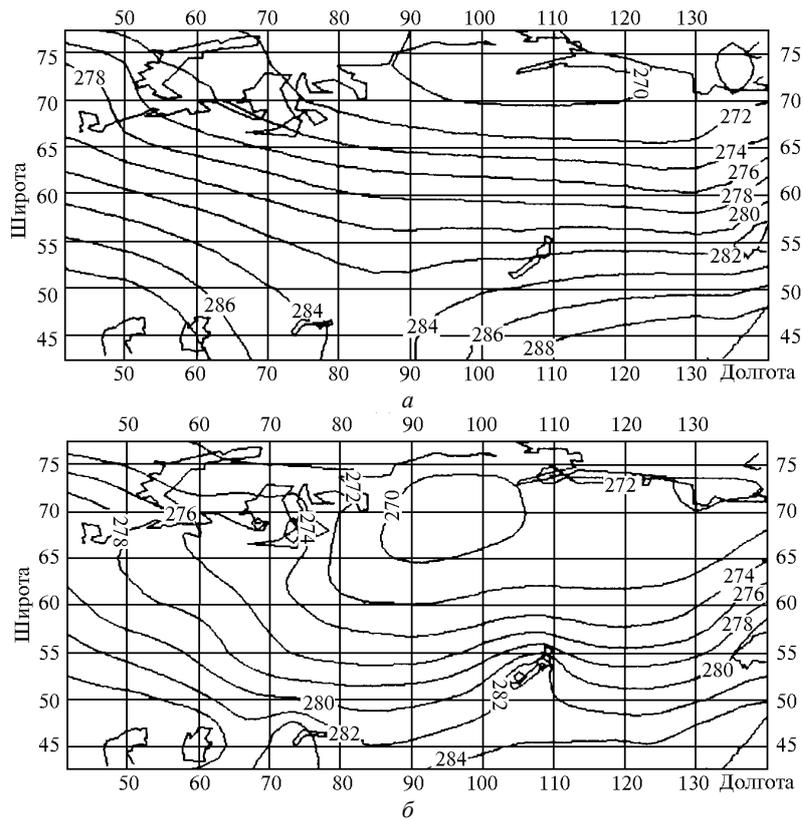


Рис. 4. Среднеиюльское распределение приземной температуры (К), рассчитанное по глобальной (а) и региональной (б) моделям

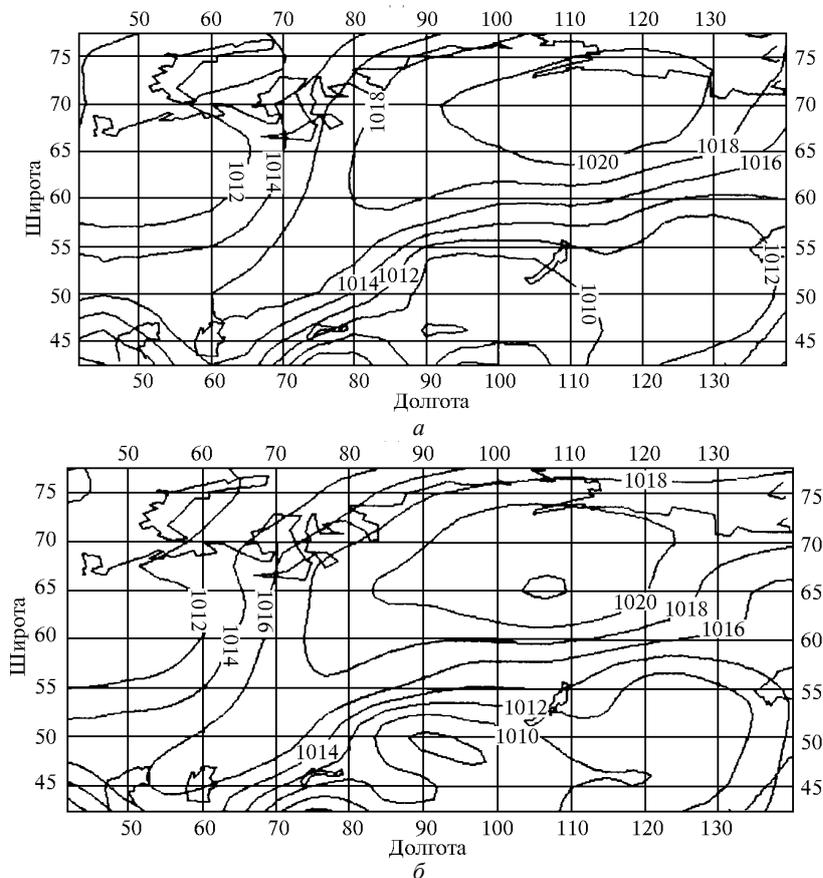


Рис. 5. Среднеиюльское распределение приземного давления (гПа), рассчитанное по глобальной (а) и региональной (б) моделям

В летние месяцы картина полностью меняется, поскольку практически исчезает контраст между температурой водной поверхности и температурой суши (см. рис. 4). При этом разница в воспроизведении приземного давления обусловлена в основном динамическими факторами (см. рис. 5). Использование региональной модели позволило получить более тонкую структуру распределения осадков, влажности почвы, явных и скрытых потоков тепла на поверхности, чего невозможно достичь с помощью глобальной модели. Это, в свою очередь, отражается на динамических характеристиках вблизи поверхности, которые демонстрируют возникновение мезомасштабных циркуляций.

## 5. Заключение

В представленном варианте региональной модели атмосферы с усовершенствованной схемой параметризации деятельного слоя суши осуществлен достаточно полный учет физических факторов для оценки эффектов взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью. Схема параметризации процессов тепловлагопереноса в деятельном слое суши учитывает их нелинейность, нестационарность, явно описываются функции растительного покрова и достаточно подробно описывается гидрологический цикл.

Результаты, полученные при численном моделировании, позволили получить более тонкую региональную структуру распределения рассчитываемых характеристик. Помимо этого использование новой схемы параметризации дает возможность воспроизведения ряда характеристик, которые не рассчитывались в глобальной модели, таких как температура и влагосодержание почвы, сток влаги и фильтрация влаги в почву.

*V.N. Krupchatnikov, A.A. Fomenko. Mathematical Simulation of Regional Climate of Siberia.*

The regional model of atmospheric dynamics is presented. The model is a component of global climatic model ECSib [1,2], has the increased spatial resolution and is designed for reproduction of the climatic atmospheric characteristics on spatial scales which are not described by the global model. More detailed account for processes of interaction with the ground surface is carried out in the model. A presence of vegetative cover and a layer of snow on the surface, processes of heat and moisture exchange in the soil layer, processes of snow melting incoming of moisture into the ground at the expense of large-scale and convective precipitations, interception of precipitations by vegetative cover, effects of moisture filtration [3] are taken into account. Some results of numerical modeling of Siberia climate are given.

Работа поддержана грантами РФФИ 95-05-14588, 97-05-65194, INTAS 96-1935, INTAS 96-2074.

1. *Fomenko A.A., Krupchatnikoff V.N.* // Bull. Nov. Comp. Center, Num. Model in Atmosph., etc. 1993. V. 1. P. 17–31.
2. *Fomenko A.A., Krupchatnikoff V.N., Yantzen A.G.* // Bull. Nov. Comp. Center, Num. Model in Atmosph., etc. 1996. V. 4. P. 11–19.
3. *Крупчатников В.Н., Янцен А.Г.* Параметризация процессов взаимодействия атмосферы и поверхности земли в модели общей циркуляции (ECSib). Новосибирск, 1994. 15 с. (Препринт/РАН. Сиб. отд-ние. ВЦ, N 1013).
4. *Dickinson R.E., Errico R.M., Giorgi F., Bats G.T.* // Climate Change. 1989. V. 15. P. 383–422.
5. *Giorgi F., Mearns L.* // J. Geophys. Res. 1991. V. 29. P. 191–216.
6. *Cubash U., Von Storch H., Waszkewitz J., Zorita E.* Estimates of climate change in southern Europe using different down-scaling techniques. Report No. 183. Max–Planck Institut für Meteorologie. Hamburg, Germany, 1996. 46 p.
7. *Gyalistras D., Von Storch H., Fischlin A., Benitson M.* // Climate Research. 1994. V. 4. P. 167–189.
8. *Detloff K., Rinke A., Lehmann R., Christensen J.H., Botzet M., Machehauer B.* // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. P. 23401–23422.
9. *Blondin C., Bottger H.* The surface and sub-surface parameterisation scheme in the ECMWF forecasting system. Revision and operational assessment of weather elements. ECWMF Tech. Memo. 135. 1987. 48 p.
10. *Dickinson R.E.* // Climate Processes and Climate Sensitivity. Geophys. Mon. / Ed. J.E. Hansen. 1984. P. 58–72.
11. *Choudhury B.J., Monteith J.L.* // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 1988. V. 114. P. 373–398.
12. *Sellers P.J., Mintz Y., Sud Y.C., Dalcher A.* // J. Atmos. Sci. 1986. V. 43. P. 505–531.
13. *Davies H.C.* // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 1976. V. 102. P. 405–418.