

# ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ НА ПРОЦЕССЫ ОБЛАКО- И ОСАДКООБРАЗОВАНИЯ

В. М. МАЛЬБАХОВ, А. А. ЛЕЖЕНИН

*Институт вычислительной математики и  
математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия*  
e-mail: smvm@ommfao1.sssc.ru, lezhenin@ommfao.sssc.ru

О. А. ДУБРОВСКАЯ, Е. Г. КЛИМОВА

*Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия*  
e-mail: olga@ict.nsc.ru, klimova@ict.nsc.ru

В. А. ШЛЫЧКОВ

*Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия*  
e-mail: slav@ad-sbras.nsc.ru

The fire-site areas, burned down wood mass, heat, moisture, and solid aerosols formed in forest fires in Siberia, Yakutia, and Far East during the last decade are estimated. The near and far transport of heat, moisture, and combustion products are studied, and their influence on the processes of cloud and precipitation formation is estimated using the hydrodynamic modeling. Various scenarios of the mutual influence of forest fires on landscape, weather and natural-climatic changes in the Asian part of Russia are considered.

## Введение

В течение миллионов лет лесные и степные пожары служили составной частью эволюции растительного покрова и животного мира. В засушливые годы возникали массовые природные пожары, а вызванные ими изменения состава растительности порождали изменения климата. Согласно наиболее вероятным сценариям, наблюдаемое потепление климата повлечет увеличение горимости лесов, количества выбрасываемой в атмосферу двуокиси углерода и других парниковых газов.

Важнейший показатель пирологического режима — межпожарный интервал — сократился на треть в 20 столетии по сравнению с 19 в. Имеются предположения о взаимосвязи этого феномена с климатическими трендами. В жаркие и засушливые годы вероятность природных пожаров существенно возрастает. Обратное влияние пожаров на погоду и климат менее очевидно и мало изучено. Такое влияние может осуществляться через воздействие дымовых аэрозолей на процессы облако- и осадкообразования. Исследования, пред-

ставленные в данной работе, посвящены проблеме моделирования переноса тепла, влаги и продуктов горения при локальных и при массовых лесных пожарах.

Модель атмосферного пограничного слоя (АПС) сформулирована на базе негидростатических уравнений гидротермодинамики в приближении глубокой конвекции с краевыми условиями, обеспечивающими сопряжение с синоптическими процессами в свободной атмосфере [1, 2]. Для решения задачи используется метод конечных разностей на основе неявных алгоритмов в рамках схем расщепления. Уравнения, описывающие взаимопревращения в системе пар — вода — лед — аэрозоль, реализованы в рамках подхода [3, 4].

## 1. Расчет высоты подъема дымового аэрозоля, вовлекаемого в облачные системы в зоне лесного пожара

При расчетах по модели АПС пожар имитировался как тепловой источник в ограниченной области заданием локального перегрева подстилающей поверхности на  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  по отношению к периферийной температуре [5]. Рассматривались штилевые условия. На левой части рис. 1 представлен подъем примеси в условиях устойчивой стратификации в сухой атмосфере. Высота подъема дымового аэрозоля около двух километров. В образовавшемся облаке примесь достигает высоты более трех километров (правая часть рис. 1).

В условиях влажной атмосферы с учетом фазовых переходов в интервале модельного времени 2–3 ч наблюдаются формирование одиночного облака (выделено серым цветом), его отрыв от приземного источника и быстрый подъем (рис. 2). Точечная линия показывает контур облака. Изолинии проведены с шагом  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , не закрашенные области соответствуют нулевым отклонениям возмущения потенциальной температуры. Максимальная концентрация примеси в облаке достигает 10 % от приземных значений.

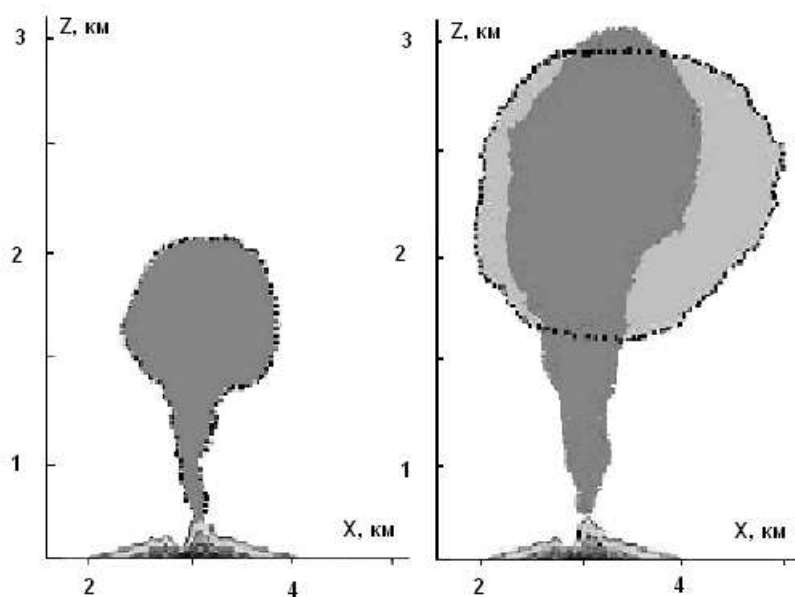


Рис. 1. Область распространения дымового аэрозоля при образовании облаков ( $T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $U = 0$ ,  $S/S_0 > 0.001$ ).

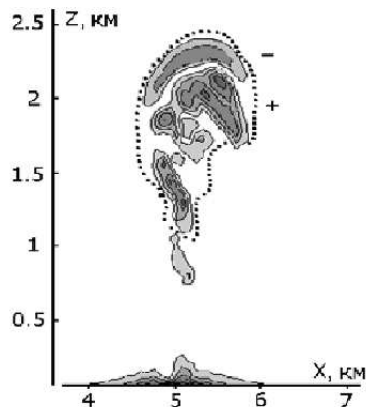


Рис. 2. Поле возмущений температуры при отрыве облака от очага пожара. Точечная линия указывает контуры облака.

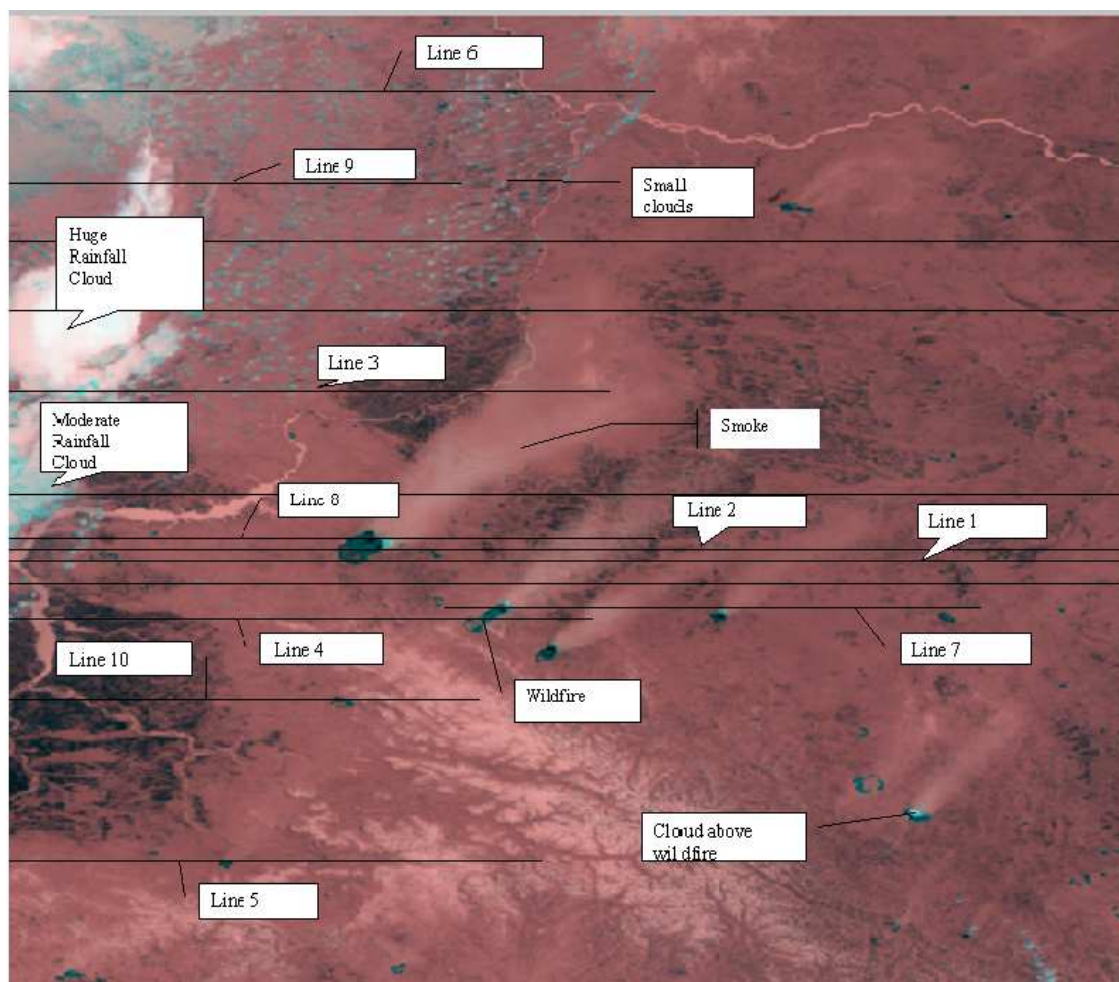


Рис. 3. Космический снимок пожаров 2002 г. на территории Якутии. Над некоторыми из пожаров наблюдается образование мелких конвективных облаков.

Спутниковые фотографии пожаров 2002 г. в Якутии подтверждают результаты численных экспериментов (рис. 3). Одиночные стационарные облака часто формируются над очагами лесных пожаров, они отчетливо идентифицируются на космических снимках [6].

## 2. Перенос дымовых аэрозолей над территорией со сложными физико-географическими условиями

На космических снимках большого разрешения можно видеть, как распространяется дым от пожара в зависимости от рельефа (рис. 4).

Следующая серия численных экспериментов посвящена изучению влияния орографии на распространение дымового шлейфа. На модельной области, размеры которой были заданы  $100 \times 400$  км, видны две возвышенности и впадина. Максимальный перепад высоты составил 700 м.



Рис. 4. Распространение дымов с учетом рельефа.

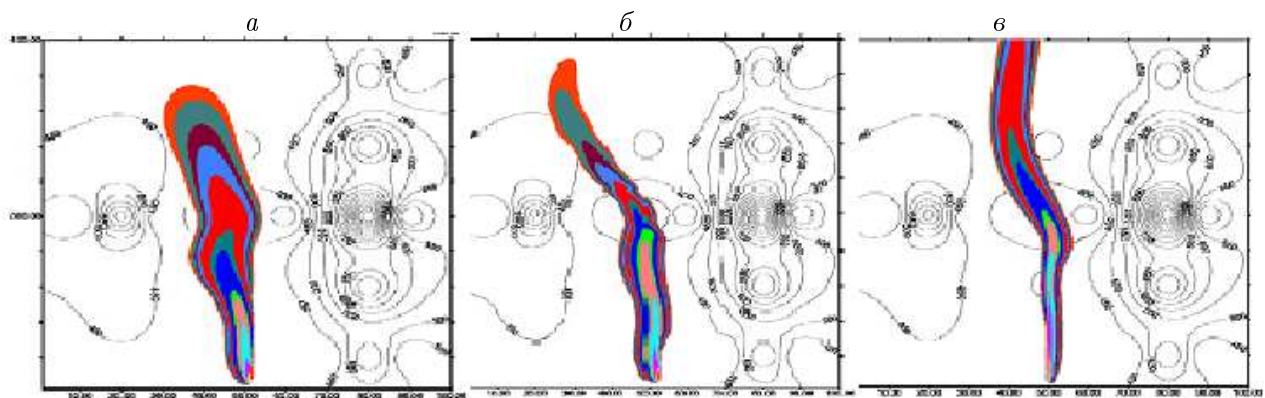


Рис. 5. Осредненная по высоте концентрация частиц дымового аэрозоля при  $U = 3, 6$  и  $10$  м/с (*а–в* соответственно).

Численные эксперименты проводились по упрощенной модели АПС. Расположение источника дымового аэрозоля, который имитировал лесной пожар, задавалось посередине нижней части модельной области. Ветер был направлен вдоль холмов. Модельное время распространения примеси составило 36 ч после начала работы источника. На рис. 5 изображена осредненная по высоте концентрация частиц дымового аэрозоля при различных скоростях ветра.

На основании проведенных численных экспериментов можно заключить, что дымовой шлейф распространяется по долине между двумя хребтами и чем больше скорость ветра, тем он уже и длиннее.

### 3. Оценка влияния крупнодисперсного аэрозоля на процессы облако- и осадкообразования при массовых лесных пожарах

На рис. 6 представлен спутниковый снимок лесных пожаров на территории Республики Саха (Якутия) в 2002 г. Площадь, которая находилась непосредственно под пожарами 14 августа, определялась более 210 тыс. кв. км, а территория, где концентрация дыма превышала предельно допустимые концентрации, составила более 1 млн кв. км. Масса углекислого газа, выделенного за сутки в результате пожаров по данным о сгоревшей биомассе, составила 11.8 млн т.



Рис. 6. Массовые лесные пожары в 2002 г. на территории Якутии. Эллипсом отмечена область, внутри которой задымление больше критического.

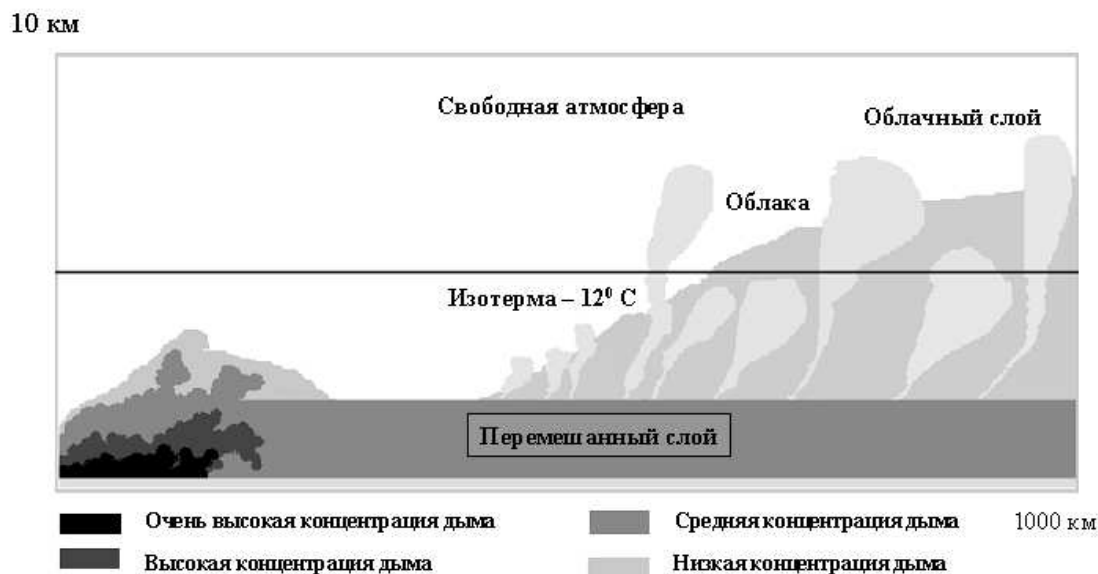


Рис. 7. Схема распределения концентрации дымового аэрозоля при массовых пожарах.

Анализ данных спутникового зондирования показывает, что в средних широтах в отдельных случаях имеет место заметное понижение суммы осадков над территорией, где происходят массовые лесные пожары [7]. Теоретическое объяснение этого феномена было дано на основании результатов численных экспериментов [8], где показано, что если облако имеет переохлажденную вершину (именно эти облака дают интенсивные осадки), то попадание в облако крупных дымовых частиц (более 1 мкм) приводит к ослаблению осадков.

На рис. 7 показана схема распределения концентрации дымового аэрозоля при массовых пожарах. Над зоной пожара концентрация максимальна, далее за счет сухой конвекции образуется перемешанный слой, где концентрация практически постоянна. Высота этого слоя достигает около 1 км, а длина дымового шлейфа в направлении основного переноса 1000 км. За счет облачной конвекции аэрозоль из перемешанного слоя попадает в облака. При образовании облачности незначительная часть аэрозоля попадает в облачный слой. Попадая выше изотермы  $-12^{\circ}\text{C}$ , аэрозоль влияет на фазовые переходы в системе пар — лед — вода.

На основании численных экспериментов, выполненных по модели АПС в [8], сделаны следующие выводы.

1. Обнаружен эффект значительного влияния фазовых переходов влаги на перенос примеси в облачные слои до 3 км. Процессы облакообразования имеют различный характер при устойчивой и неустойчивой стратификации: в первом случае над пожаром формируется квазистационарное облако небольшой мощности, а во втором — наблюдается выраженная цикличность генерации облаков, связанная с их большей мощностью и плавучестью.

2. Массовые пожары создают условия для вторжения крупнодисперсного аэрозоля в переохлажденную часть большого количества облаков, что приводит к быстрой кристаллизации в них переохлажденных водяных капелек [9]. Такие облака дают существенно более слабые осадки, чем те облака, вершины которых состоят из суперпозиции ледяных кристаллов, снега и водяных капель [10–12].

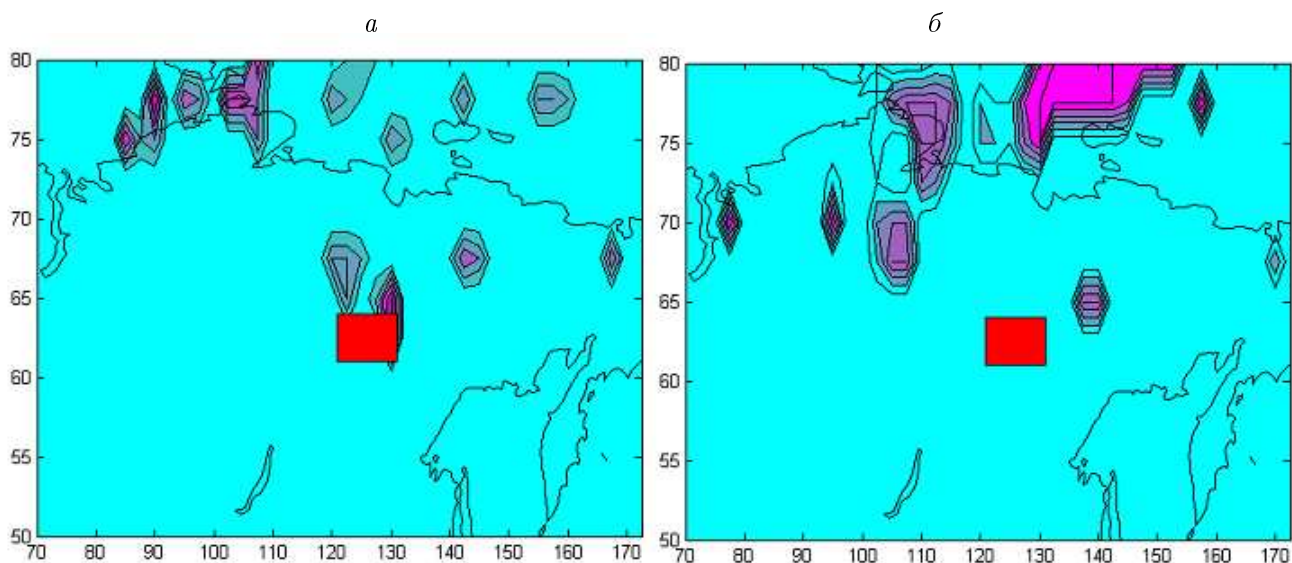


Рис. 8. Распространение примеси на высоте 850 мбар (а) и 600 мбар (б) для 120 ч.

Для оценки территории, охваченной дымовым аэрозолем, разработана крупномасштабная модель переноса трассера с использованием обратных траекторий [11, 12]. В расчетах использовались данные реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) с 10 по 20 августа 2002 г., когда горение леса на территории Якутии было самым сильным. С помощью обратных траекторий восстанавливалась концентрация дымового аэрозоля на территории Якутии и Заполярья.

Для расчета траекторий привлекались данные о ветре и температуре на 23 изобарических поверхностях с шагом по времени 6 ч. В численных экспериментах обратные траектории вычислялись с шагом по времени 1 ч, поэтому данные о ветре и температуре были линейно проинтерполированы для 1-го часа на шести нижних уровнях. Восстановление концентрации проводилось для региона 70–172,5° в.д. и 63,5–80° с.ш. в узлах сетки 2,5×2,5 град. Зона пожара задана как прямоугольный площадной источник с границами с 121–131° в.д. и с 61–64° с.ш.

На рис. 8 представлены результаты численных экспериментов по восстановлению концентрации на высоте 850 и 600 мбар для 120 ч.

Модель дальнего переноса дает возможность оценить районы, в которых дымовой аэрозоль от пожаров на территории Якутии может оказывать влияние на процессы облако- и осадкообразования, на изменение прозрачности атмосферы, а осевший аэрозоль в районах Арктики может влиять на альbedo снежного и ледяного покрова.

## Заключение

Результаты численного моделирования показывают, что, с одной стороны, лесные пожары интенсифицируют процессы облакообразования, с другой — массовые лесные пожары в средних широтах могут подавлять процессы осадкообразования.

## Список литературы

- [1] MOENG C.-H. A large-eddy-simulation model for the study of planetary boundary layer turbulence // J. Atmos. Sci. 1984. Vol. 41, N 13. P. 2052–2062.
- [2] МАЛЬБАХОВ В.М., ШЛЫЧКОВ В.А., ЛЕЖЕНИН А.А., ДУБРОВСКАЯ О.А. Численная модель распространения дымового шлейфа при лесных пожарах с параметрическим учетом процессов горения // География и природные ресурсы. 2004. Спецвыпуск: Тр. Междунар. конф. по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: ENVIROMIS-2004. С. 170–174.
- [3] RUTLEDGE S.A., HOBBS P.V. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. VIII: A model for the “seeder-feeder” process in warm-frontal rainbands // J. Atmos. Sci. 1983. Vol. 40, N 5. P. 1185–1206.
- [4] DUBROVSKAJA O.A., LEZHENIN A.A., MAL'BAKHOV V.M., SHLYCHKOV V.A. On the influence of fires on processes of cloud and precipitation formation // Bulletin of the Novosibirsk Computer Center. Series: Numerical Modeling in Atmosphere, Ocean, and Environment Studies. 2004. Vol. 9. P. 1–8.
- [5] МАЛЬБАХОВ В.М., ШЛЫЧКОВ В.А. Расчет высоты подъема дымового аэрозоля, вовлекаемого в облачные системы в зоне лесного пожара // Оптика атмосферы и океана. 2004. Т. 17, № 5–6. С. 453–456.
- [6] СУХИНИН А.И. Анализ пожаров с помощью средств дистанционного зондирования Земли // Матер. 5-й Междунар. конф. “Природные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия”. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003. С. 181–182.
- [7] СУХИНИН А.И. Якутские пожары 2002 г. как прообразы глобальных экологических катастроф // Там же. С. 181–182.
- [8] ДУБРОВСКАЯ О.А., КОЗЛОВ В.С., МАЛЬБАХОВ В.М. Оценка влияния крупных дымовых частиц на процессы осадкообразования // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18, № 5–6. С. 430–434.
- [9] МЕЙСОН Б.ДЖ. Физика облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 541 с.
- [10] СУЛАКВЕЛИДЗЕ Г.К. Ливневые осадки и град. Л.: Гидрометеиздат, 1963. 412 с.
- [11] SUTTON R.T., O'NEILL A., TAYLOR F.M. High-resolution stratospheric tracer fields estimated from satellite observations using lagrangian trajectory calculations // J. Atmos. Sci. 1994. Vol. 51. P. 2995–3005.
- [12] БЕЛОУСОВ С.Л., ЮСУПОВ Ю.И. Расчет трехмерных траекторий воздушных частиц // Метеорология и гидрология. 1991. № 12. С. 41–48.

*Поступила в редакцию 9 ноября 2006 г.*