

М.А. Моцаков, С.П. Смышляев

МЕТОД СИММЕТРИЧНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ОСЦИЛЛЯЦИЙ МАССЫ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧЕ ПЕРЕНОСА ПРИМЕСЕЙ ГЕОСФЕРЫ

M.A. Motsakov, S.P. Smyshlyayev

SYMMETRIC COMPENSATION METHOD OF THE MASS OSCILLATIONS FOR GEOSPHERIC TRACE GASES ADVECTION

Рассмотрены принципы построения и приведены результаты тестирования метода симметричной компенсации отрицательных осцилляций массы применительно к задаче полулагранжева переноса примеси, предназначенного для построения глобальных моделей адвективного переноса атмосферных примесей. Метод основан на взаимной компенсации положительных и отрицательных полуволн 4-шаговых осцилляций массы в точках разрыва функции концентрации трассера. Метод прост в реализации и не требует больших затрат машинного времени. В работе представлены результаты тестирования, показывающие эффективность метода применительно к решению задачи переноса примесей.

Ключевые слова: адвекция, атмосферные малые газы, сохранение массы.

The principals of computationally effective symmetric compensation method with reference to semi-lagrangian scheme for atmospheric trace gases advection algorithm and testing results are presented. The method is based on mutual compensating of positive and negative half-waves of four-step mass oscillations in discontinuities point of concentration function. The results of the algorithm tests are represented. The tests results demonstrated the method effectiveness.

Keywords: advection, atmospheric trace gases, mass conservation.

Введение

Адвективный перенос химически активных примесей в геосфере наряду с химическими процессами определяет как концентрации компонентов в местах их попадания в геосферу, так и оказывает воздействие на формирование содержания загрязнителей вдали от источника [5,3,2]. Для корректного описания адвективного переноса химически активных малых газовых составляющих и аэрозольных частиц геосферы в численных моделях химического состава геосферы крайне важны глобальное и локальное сохранение массы и минимизация вычислительных погрешностей типа искусственной диффузии и дисперсии [4,8]. Также крайне необходимо обеспечить отсутствие отрицательной массы, неизбежно возникающей по причине сильной неоднородности полей трассеров, часто имеющих зоны скачкообразного изменения производной по пространству от концентрации.

В решения проблемы положительной определенности в глобальных и региональных атмосферных моделях чаще всего используют специальные монотонные алгоритмы адвективного переноса, ориентированные на сохранение массы и минимизацию

вычислительных шумов [8,9,7,10]. Однако при этом алгоритмы моделей существенно усложняются, что при высоком разрешении модельной сетки может привести к падению вычислительной эффективности. В настоящей работе сделана попытка создания несложного, вычислительно эффективного, но при этом достаточно точного алгоритма подавления осцилляций отрицательной массы в областях разрывов функции концентрации трассера, предназначенного для использования в глобальных и региональных моделях химического состава атмосферы [6].

При рассмотрении адвективного переноса химически активных примесей геосферы необходимо учитывать ветровой перенос массы по всем трем пространственным направлениям, однако принципы подавления отрицательных концентраций одинаковы для всех направлений. Поэтому в настоящей работе рассматривается перенос только по одному направлению, предполагая принцип расщепления алгоритма по пространственным направлениям [1]. Рассмотрим задачу одномерного переноса облака пассивного трассера на А-сетке Аракавы [9] с шагом 15 км полулагранжевым методом с использованием одномерного кубического сплайна. Начальное поле намеренно зададим имеющим разрывы первого рода от функции концентрации трассера (рис. 1). Скорость переноса положим равной 5 м/с. Шаг по времени зададим 1800 с.

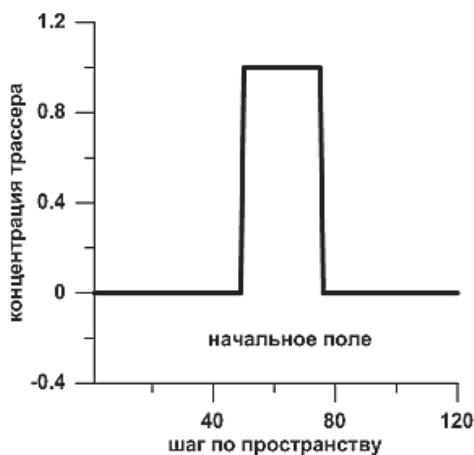


Рис. 1. Начальное поле концентрации трассера.

Сделаем один шаг по времени.

Рассмотрим область левого фронта облака трассера (рис. 2). В результате работы схемы переноса в области скачка функции образовалась затухающая 4-шаговая, симметричная относительно центрального узла с номером 50, осцилляция. В левой части данного колебания можно выделить четко выраженную полуволну отрицательной массы. В правой части данного колебания можно выделить четко выраженную полуволну положительной массы. Рассмотрим, как подобные эффекты интегрально проявляют себя на больших интервалах интегрирования по времени. Дадим прогноз эволюции, описанного выше поля, на полгода (рис. 3).

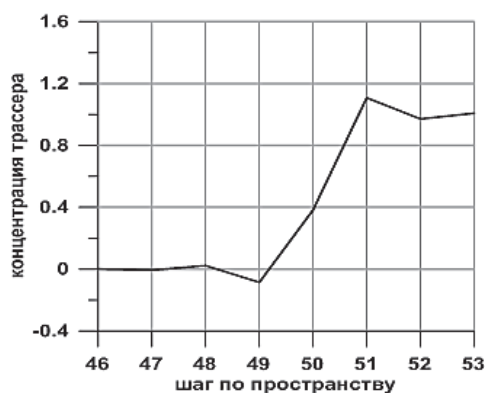


Рис. 2. Осцилляция массы в области левого фронта облака трассера.

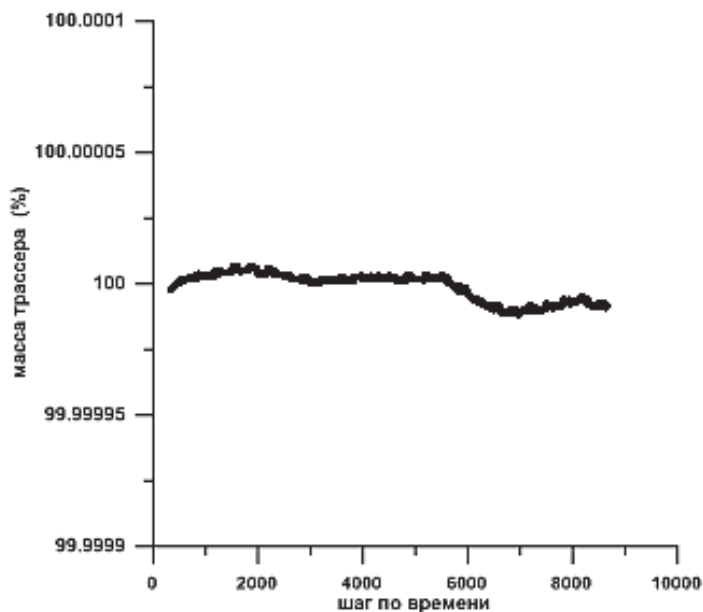


Рис. 3. Изменение массы трассера во времени.

Как видно из рисунка, масса практически не меняется. Таким образом, рассмотренные нами выше осцилляции отрицательной массы полностью компенсируют положительный прирост массы.

Нам необходимо погасить отрицательную полуволну массы. Попробуем обнулять отрицательную массу на каждом шаге интегрирования. Дадим прогноз эволюции, описанного выше поля, на полгода (рис. 4).

Как видно из рис. 4, получаем значительный прирост массы.

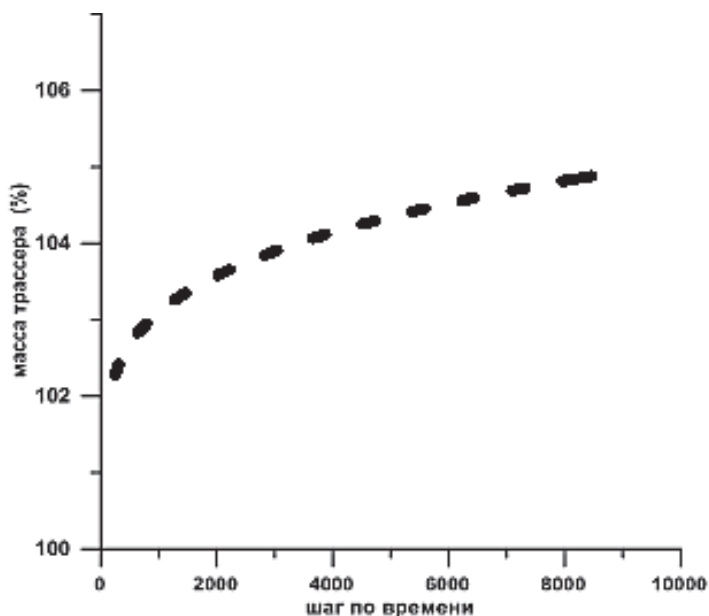


Рис. 4. Изменение массы трассера во времени.

Исходя из выводов, сделанных по рис. 3, 4, попробуем зеркально, относительно центральной точки, наложить эти две полуволны, находящиеся в противофазе. Причем, будем накладывать отрицательную полуволну слева на положительную полуволну, справа от центральной точки (рис. 2). При этом не будем трогать положительную полуволну слева и отрицательную полуволну справа от центральной точки. Назовем этот подход к задаче борьбы с отрицательной массой и вычислительными шумами — методом «Симметричной компенсации осцилляций массы» (СКОМ). Сделаем один шаг по времени.

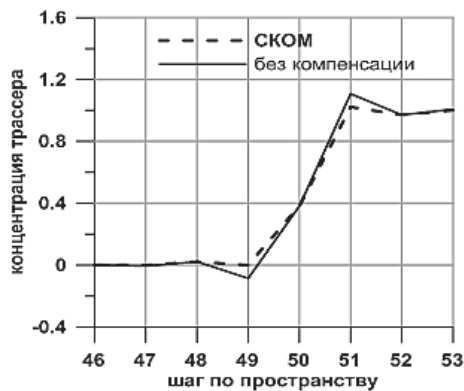


Рис. 5. Осциляция массы в области левого фронта облака трассера.

Как видно из рис. 5, произошло подтягивание к нулю слева от центра и ослабление максимума справа. Продолжим интегрировать уравнение модели на полгода вперед (рис. 6).

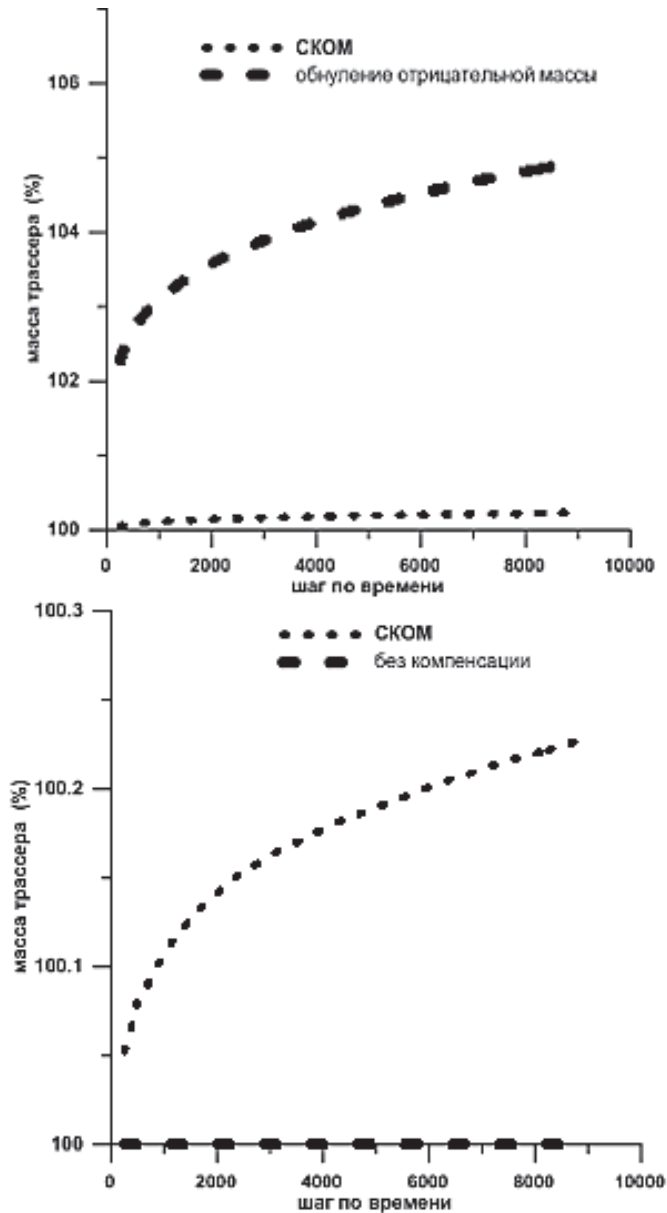


Рис. 6. Изменение массы трассера во времени (прогноз на полгода).

Как видно из рис. 6, метод дал положительный результат. Прирост массы, хотя и устойчив, но незначителен.

Оценим влияние метода СКОМ на фазу волны и крутизну фронтов облака трассера. Дадим прогноз перемещения облака на 140 шагов по времени (рис. 7, 8).

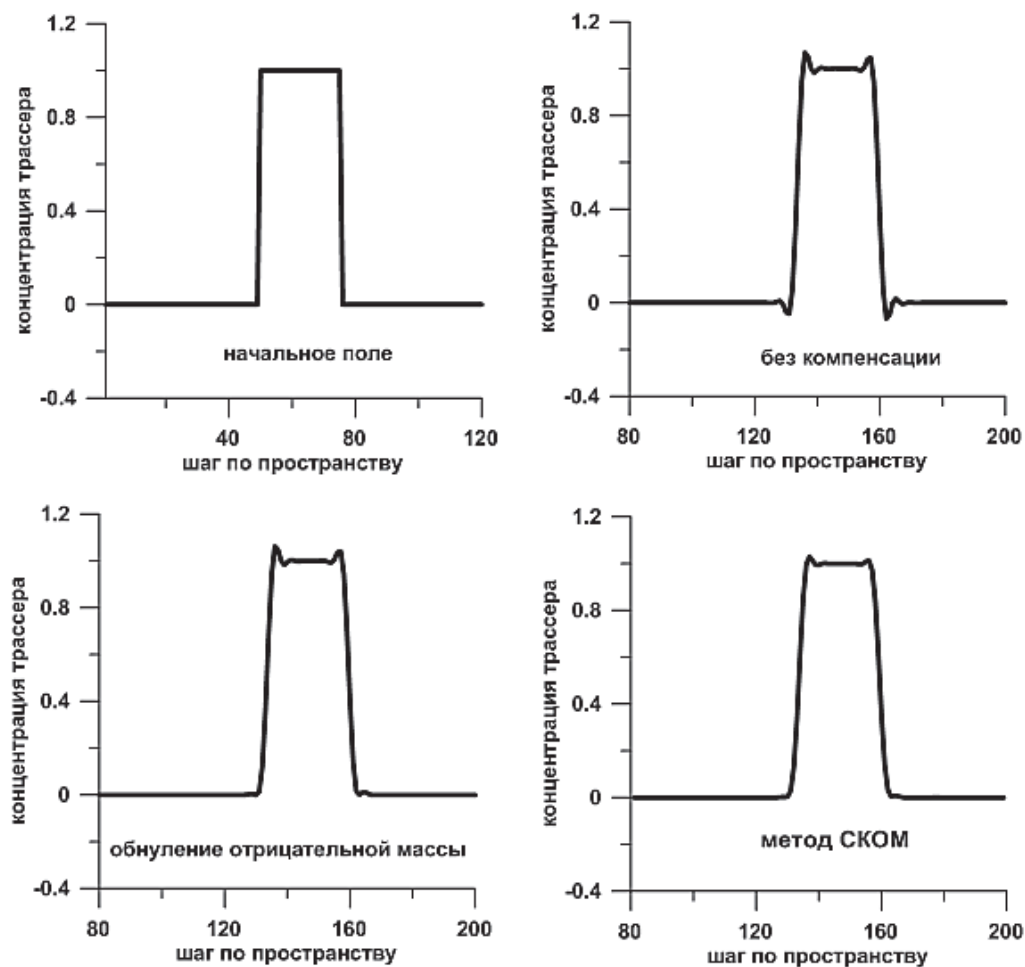


Рис. 7. Прогноз поля концентрации трассера на 140 шагов по времени.

Как видно из рис. 7, 8, метод СКОМ не искажает фазу волны массы трассера. Также метод хорошо сохраняет крутизну фронтов и амплитуду облака, подавляя вычислительную диффузию.

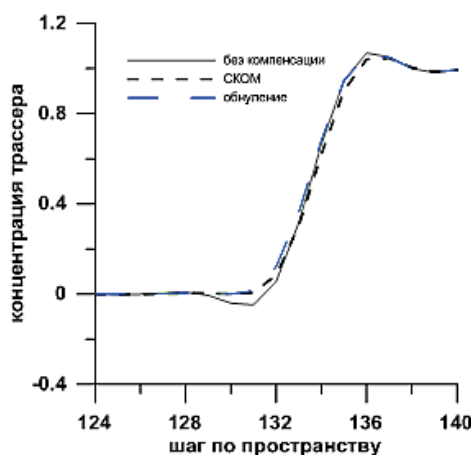


Рис. 8. Осцилляция массы в области левого фронта облака трассера. По результатам прогноза на 140 шагов по времени.

Алгоритм метода

1. Рассчитываем прогноз на один шаг по времени.
2. Определяем области отрицательных осцилляций массы с учетом заданного заранее ограничения на порядок учитываемых отрицательных осцилляций. Все отрицательные осцилляции выше пороговой обнуляем. Строим маску поля, однозначно определяющую границы и протяженность зон отрицательной массы.
3. Определяем взаимное расположение каждой области относительно фронта облака. Исходя из чего, выделяем два типа фронтов - левые и правые (рис. 1). Критерием типа фронта будет - соотношение абсолютных значений второй производной по пространству от концентрации на границах отрицательных областей. Добавляем полученную информацию о типе фронтов функции концентрации в маску поля.
4. Формируем массив значений функции поправок массы исходя из полученной маски поля.
5. Накладываем функцию поправок на поле прогноза концентрации.
6. Выполняем пункт номер один.

Заключение

Рассмотренный в данной публикации подход к решению задачи подавления осцилляций отрицательной массы прост в практической реализации, дешев с точки зрения потребляемых вычислительных ресурсов. Метод применим для построения глобальных моделей переноса примеси, предназначенных для исследования состава атмосферы [7,10].

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках мероприятий Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (соглашение 14.В37.21.0880), а также в рамках гранта Правительства РФ (Договор № 11.Г34.31.0078) для поддержки исследований под руководством ведущих ученых.

Литература

1. Белов Н.П., Борисенков Е.П., Панин Б.Д. Численные методы прогноза погоды. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 375 с.
2. Блаkitная П.А., Смышляев С.П., Атласкин Е.М., Шаарйбу Г. Модельное исследование влияния солнечной активности на газовый состав и тепловой режим атмосферы. // Ученые записки РГГМУ, 2010, № 12, с. 25-36.
3. Боровская О.П., Блаkitная П.А., Смышляев С.П., Галин В.Я., Хорева Е.И. Моделирование взаимосвязанных изменений температуры и газового состава атмосферы в будущем. // Ученые записки РГГМУ, 2011, № 23, с. 75-89.
4. Моцаков М.А., Курганский А.Р., Смышляев С.П. Полулагранжев алгоритм адвективного переноса атмосферных примесей на сфере с использованием интерполяции одномерным сплайном. // Ученые записки РГГМУ, 2012, № 26.
5. Смышляев С.П., Кароль И.Л., Зубов В.А., Юдин В.А., Геллер М.А. Двумерное моделирование сезонно-широтной изменчивости общего содержания атмосферного озона с использованием параметров крупномасштабного переноса из модели общей циркуляции атмосферы. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 2002, т.38, № 1, с. 81-94.
6. Смышляев С.П., Галин В.Я., Володин Е.М. Модельное исследование межгодовой изменчивости содержания атмосферного озона в средних широтах. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 2004, т. 40, № 2, с. 210-221.
7. Lin S.J., Rood R. Multidimensional flux-form semi-lagrangian transport schemes. // Mon. Weather Rev., 1996, vol. 124, p. 2046-2070.
8. Prather M. Numerical advection by conservation of second-order moments, J. Geophys. Res., 91, 6671-6681, 1986.
9. Rood R.B. Numerical advection algorithms and their role in atmospheric transport and chemistry models. // Rev. Geophys, 1987, vol. 25, no. 1, p. 71-100.
10. Zubov V., Rozanov E., Schlesinger M. Hybrit scheme for three-dimensional advective transport. // Mon. Wea. Rev, 1999, vol. 127, p.1335-1346.