

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЭФФЕКТИВНОЙ ДИФФУЗИИ В СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ МОДЕЛИ ОБЩЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ*

С. В. КОСТРЫКИН

Институт вычислительной математики РАН, Москва, Россия

e-mail: kostr@inm.ras.ru

Г. ШМИТЦ

Лейбниц-Институт физики атмосферы, Кюлунгсборн, Германия

e-mail: schmitz@iap-kborn.de

The mixing of a passive tracer in the stratosphere and lower mesosphere is studied on the basis of the coefficient of effective diffusion (CED). In 2D-case this coefficient is analogous to the usual diffusivity, but for the corresponding quantities averaged over contour of constant tracer concentration. The CED distribution is completely defined from the tracer distribution. The data time series describing the evolution of the tracer on the isentropic surfaces was obtained by solving the advection-diffusion equation. We only use the non-divergent isentropic component of wind field, which is obtained after 6-year run of the Middle Atmosphere Global Climate Model of INM RAS. Some results of CED distribution are discussed on the basis of the homogenisation theory and effects of Rossby wave generation and breaking in atmospheric currents.

Введение

Согласно данным спутниковых измерений, распределение малых атмосферных составляющих существенно неоднородно как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Причиной этого является воздействие двух факторов — химическими (фотохимическими) реакциями и атмосферной динамикой. Поскольку роль фотохимических трансформаций существенна только для активных примесей (с коротким временем жизни), долгоживущие примеси, такие как N_2O , H_2O , CH_4 , а для нижней стратосферы — озон, можно считать пассивными трассерами. Для них основным фактором, влияющим на их пространственное распределение, является атмосферная динамика.

Рассмотрим на примере озона как одной из наиболее изученных малых атмосферных примесей характерные черты формирования подобных распределений. Для озона в нижней стратосфере циркуляция Бревера — Добсона приводит к тому, что вблизи тропиков

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 06-05-64916-а).

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2006.

происходит подъем бедных озоном, а вблизи полюсов — опускание насыщенных озоном воздушных масс, т. е. создается положительный среднезональный меридиональный градиент концентрации озона. Но из-за наличия вихревого переноса в меридиональном направлении средний градиент трассера несколько уменьшается. Для большинства долгоживущих атмосферных примесей характерно такое же среднезональное распределение — с одним максимумом (минимумом) на экваторе.

Зачастую процесс перемешивания трассера в вихревых потоках характеризуют термином “хаотическая адвекция”, относящимся к течениям, в которых существуют области с высокой чувствительностью траекторий к начальному положению лагранжевой частицы. А поскольку частицы в реальных течениях всегда испытывают некоторое слабое случайное возмущение из-за наличия молекулярной диффузии, их траектории могут проявлять хаотическое поведение. Показано, что хаотическая адвекция возникает уже в двумерных периодических полях скорости или в трехмерных стационарных [1]. В некоторых случаях движение в области хаоса удается описать некоторым диффузионным процессом. Тогда величину перемешивания примеси удобно описывать коэффициентом эффективной диффузии (КЭД). Чем выше локальное значение КЭД, тем быстрее происходит перемешивание трассера в данной области.

Атмосферные течения в средней атмосфере в хорошем приближении являются двумерными и направлены вдоль изоэнтропических поверхностей, а значит, перемешивание трассера будет происходить вдоль этих поверхностей за счет адвекции планетарными или гравитационными волнами. Обычно для описания вихревого переноса в меридиональном направлении этот процесс описывают как диффузию с некоторым КЭД. Существует несколько подходов по определению этого коэффициента, например, с использованием различных турбулентных замыканий и осреднения по широтному кругу [2, 3]. В действительности распределение трассера зачастую существенно отличается от зонально-симметричного и поэтому результат осреднения может получиться слишком сглаженным. В данной статье рассматривается подход, предложенный в [4], основанный на осреднении вдоль контуров постоянной концентрации трассера и определении КЭД в соответствующих квазилагранжевых координатах.

1. Методика вычисления коэффициента эффективной диффузии

Для пассивной примеси, движущейся в двумерном бездивергентном поле скорости, масса трассера и площадь, заключенные внутри заданной изолинии постоянной концентрации q , будут меняться только за счет диффузии через границу контура. Каждой изолинии q можно сопоставить площадь области, заключенной внутри нее. А саму площадь можно охарактеризовать одним параметром — радиусом равновеликого круга или эквивалентной широтой ϕ_e , если используется сферическая система координат. В результате такого преобразования можно определить функциональную зависимость $q = q(\phi_e, t)$. Тогда в полученной квазилагранжевой системе координат уравнение эволюции для концентрации трассера можно будет записать следующим образом:

$$\frac{\partial q(\phi_e, t)}{\partial t} = \frac{1}{r^2 \cos \phi_e} \frac{\partial}{\partial \phi_e} \left[\kappa_{\text{эфф}}(\phi_e, t) \cos \phi_e \frac{\partial q(\phi_e, t)}{\partial \phi_e} \right],$$

где r — радиус Земли.

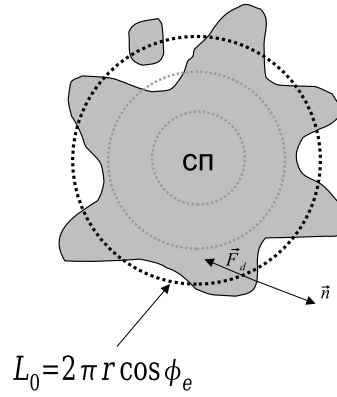


Рис. 1. Для эквивалентной широты площадь внутри закрашенной области и широтного круга, выделенного черной штрихпунктирной линией, совпадают.

При этом коэффициент эффективной диффузии может быть определен как отношение диффузионного потока $\mathbf{F}_d = \kappa \nabla q$, осредненного вдоль контура, к среднему градиенту трассера:

$$\kappa_{\text{eff}} \equiv -\frac{\bar{F}_d}{\frac{1}{r} \frac{\partial q}{\partial \phi_e}},$$

а \bar{F}_d зависит от молекулярной вязкости κ и может быть выражен как

$$\bar{F}_d = -\frac{1}{L_0} \oint \kappa \nabla q \mathbf{n} dl.$$

Здесь $\mathbf{n} = \pm \frac{\nabla q}{|\nabla q|}$ — нормаль к контуру (положительный знак соответствует направлению вне контура).

Существует альтернативное определение эффективной диффузии, которое более удобно для практических расчетов [5]:

$$\kappa_{\text{eff}} = \kappa \left(\frac{L_e}{L_0} \right)^2. \quad (1)$$

Здесь L_e и L_0 — эквивалентная и минимальная длины контура соответственно, которые определяются из уравнений

$$L_e^2 = \oint |\nabla q| dl \oint \frac{1}{|\nabla q|} dl, \quad (2)$$

$$L_0 = 2\pi r \cos \phi_e. \quad (3)$$

Важно отметить, что всегда $L_e \geq L_0$. Поэтому из (1) следует, что $\kappa_{\text{eff}} \geq \kappa$. Для заданного поля трассера можно вычислить коэффициент эффективной диффузии, используя (1)–(3).

Отметим, что существенным преимуществом данного метода расчета КЭД по сравнению с обычными методами является то, что он позволяет определить транспортные барьеры или области с малыми значениями этого коэффициента как зоны, которые естественным образом привязаны к распределению трассера.

2. Результаты расчетов по данным модели общей циркуляции атмосферы ИВМ РАН

Поскольку банк измерений глобальных трехмерных полей малых атмосферных компонентов только начинает формироваться, для расчетов глобального поля КЭД удобно пользоваться данными климатических моделей. В настоящей работе использовались результаты расчетов модели общей циркуляции атмосферы за 1990–1995 гг., разработанной в Институте вычислительной математики РАН (ИВМ РАН) [6]. Проводились off-line вычисления по переносу пассивной примеси с использованием модельного ветра, который был предварительно проинтерполирован на изоэнтропические поверхности, а затем из него отфильтрована дивергентная составляющая. Для расчетов двумерной адвекции вдоль изоэнтропических поверхностей использовалась схема СІР (Cubic Interpolated Profile) [6], которая обладала достаточно большой схемной вязкостью ($\kappa_{\text{num}} \approx 10^4 \text{ м}^2\text{с}^{-1}$), чтобы можно было пренебречь молекулярной диффузией. Пространственное разрешение сетки составляло $1 \times 0.8^\circ$, временной шаг интегрирования численной схемы 1 ч.

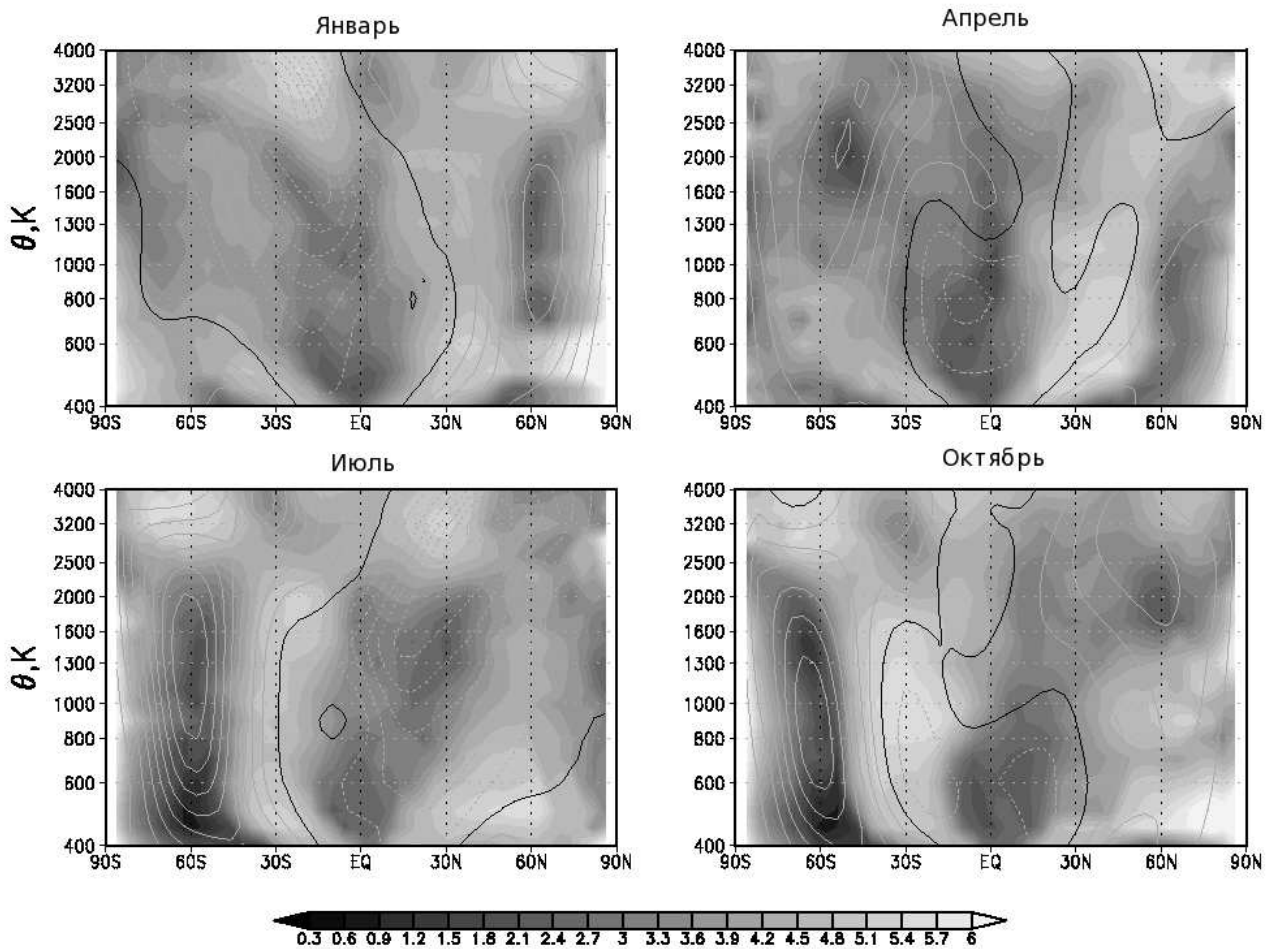


Рис. 2. Климатическое среднemesячное распределение логнормального КЭД (градации серого) и зонального ветра (контур). Жирным выделена нулевая изолиния зонального ветра.

Начальное распределение трассера задавалось линейной функцией от широты. На каждой из 21 изоэнтропических поверхностей из диапазона 400...4000 К интегрировалось уравнение переноса сроком на шесть лет. Полученный временной ряд использовался затем для построения величины логнормированного КЭД $\left(\log \frac{\kappa_{\text{eff}}}{\kappa_{\text{num}}}\right)$ или просто КЭД в дальнейшем. Пятидневные данные КЭД усреднялись по времени с помощью 20-дневного бегущего среднего. На рис. 2 приведены многолетние среднемесячные вертикальные распределения КЭД, а контурной линией на нем изображен осредненный таким же образом зональный ветер.

Для физической интерпретации полученных результатов важно отметить, что, как правило, области с малым КЭД соответствуют транспортным барьерам расположенным в областях с регулярным движением и простой геометрией трассера, а области с большим КЭД — критическим (сепаратрисным) областям с хаотическим движением лагранжевых частиц и, соответственно, весьма запутанными изолиниями трассера [7]. Однако в некоторых случаях регулярному движению лагранжевых частиц может также соответствовать разветвленная структура изолиний трассера.

Последнее утверждение может иметь следующее физическое объяснение. Известно, что скорость гомогенизации трассера вдоль круговой изолинии функции тока определяется зональным сдвигом ветра и коэффициентом молекулярной диффузии [8]. Поэтому если эти два фактора малы, то разветвленная структура трассера как бы вмораживается в среднее течение и может существовать продолжительное время — так называемый “эффект памяти”. Но именно такие условия и существуют в летнем полярном стратосферном вихре. В этом случае разрушение зимнего стратосферного вихря сопровождается интенсивным перемешиванием вблизи критических зон, в которых средняя фазовая скорость волн совпадает со скоростью основного потока. Когда такая зона смещается вместе с основным зональным потоком, на смену ей приходит летняя циркуляция с очень малым зональным сдвигом ветра, соответствующая жесткому вращению вокруг некоторой околополярной оси.

Как видно из рис. 2, в нашем случае распределение КЭД крайне неоднородно как в вертикальном, так и в меридиональном направлении. В нем можно выявить следующие характерные структуры. В стратосфере (400...2000 К) это минимум КЭД, соответствующий полярному барьеру и расположенный в зимнем полушарии, а также тропический барьер, круглогодично существующий вблизи экватора, но имеющий разную меридиональную протяженность на разных высотах. Кроме того, в летнем полушарии в средних широтах существует зона с высоким значением КЭД. Как было показано в работе [9], такая особенность в средней и верхней стратосфере связана с “эффектом памяти”, в то время как в нижней стратосфере она определяется процессом разрушения планетарных волн (вблизи критической линии $\bar{u} = 0$) и соответствующим интенсивным перемешиванием при меси. В нижней мезосфере (2000...4000 К) в летнем полушарии отметим максимум КЭД вблизи ядра струи восточного ветра, расположенный примерно на широте 15° , а в зимнем полушарии — максимум в высоких широтах около 60° , в области больших вертикальных сдвигов восточного ветра. Генерацию подобных структур можно объяснить разрушением планетарных волн, которые образуются в результате неустойчивости среднего течения [9].

Более подробный анализ климатического распределения КЭД можно найти в [9] — для стратосферы и нижней мезосферы по данным модели ИВМ РАН, в [5] — для стратосферы по данным модели ECMWF (European Center Medium Weather Forecast), в [10] — для стратосферы по данным модели UKMO (United Kingdom Meteorological Office).

Заключение

В работе детально описан метод расчета коэффициента эффективной диффузии, который может быть использован для исследования перемешивания пассивной примеси, и дана его физическая интерпретация. На основе указанного метода рассчитаны климатические вертикальные распределения коэффициента эффективной диффузии для стратосферы и нижней мезосферы по данным модели общей циркуляции атмосферы ИВМ РАН. Полученные особенности распределения КЭД интерпретируются в рамках теории хаотической адвекции и теории распространения планетарных волн.

Список литературы

- [1] ЗАСЛАВСКИЙ Г.М. Физика хаоса в гамильтоновых системах. М.; Ижевск.: Институт компьютерных исследований, 2004. 286 с.
- [2] NAKAMURA N. A new look at eddy diffusivity as a mixing diagnostic // J. Atmos. Sci. 2001. Vol. 58. P. 3685–3701.
- [3] MEDVEDEV A.S., GREATBATCH R.J. On advection and diffusion in the mesosphere and lower thermosphere: The role of rotational fluxes // J. Geophys. Res. 2004. Vol. 109.
- [4] NAKAMURA N. Modified Lagrangian-mean diagnostics of the stratospheric polar vortices. Pt I: Formulation and Analysis of GFDL SKYHI GCM // J. Atmos. Sci. 1995. Vol. 52. P. 2096–2108.
- [5] HAYNES P., SHUCKBURGH E. Effective diffusivity as a diagnostic of atmospheric transport 1. Stratosphere // J. Geophys. Res. 2000. Vol. 105. P. 22 777–22 794.
- [6] АЛЕКСЕЕВ В.А., ВОЛОДИН Е.М., ГАЛИН В.Я. и др. Моделирование современного климата с помощью атмосферной модели ИВМ РАН. М., 1998 (Препр. ИВМ РАН. № 2086-B98).
- [7] YABE T., ISHIKAWA T., WANG T. ET AL. A universal solver for hyperbolic equations by cubic polynomial interpolation. II. Two-and three-dimensional solvers // Comput. Phys. Commun. 1991. Vol. 66. P. 233–243.
- [8] SHUCKBURGH E., HAYNES P. Diagnosing transport and mixing using a tracer-based coordinate system // Phys. Fluids. 2003. Vol. 15. P. 3342–3357.
- [9] RHINES P.B., YOUNG W.R. How rapidly is a passive scalar mixed within closed streamlines? // J. Fluid. Mech. 1983. Vol. 133. P. 133–145.
- [10] KOSTRYKIN S.V., SCHMITZ G. Climatology of the effective diffusivity in the middle atmosphere based on the general circulation winds // J. Geophys. Res. 2006. Vol. 111.
- [11] ALLEN D.R., NAKAMURA N. A seasonal climatology of effective diffusivity in the stratosphere // J. Geophys. Res. 2001. Vol. 106. P. 7917–7935.

Поступила в редакцию 9 ноября 2006 г.