

В.М. Мальбахов, В.А. Шлычков*

Использование вихреразрешающих моделей в задачах вертикального переноса аэрозолей

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск

**Институт водных и экологических проблем СО РАН (Новосибирский филиал)*

Поступила в редакцию 24.07.2002 г.

На основе анализа двух численных моделей конвективного ансамбля – вихреразрешающей и упрощенной – изучаются особенности вертикального переноса тепла, влаги и аэрозолей в конвективных условиях. Дан обзор разработанных авторами моделей, пригодных для решения задач распространения аэрозоля и построения процедур параметризации конвекции в моделях общей циркуляции атмосферы. Представлены рекомендации по применению моделей к решению ряда прикладных задач.

Введение

Согласно данным наблюдений, при устойчивой стратификации частицы аэрозоля, поступающие с подстилающей поверхности, не поднимаются выше приземного слоя толщиной несколько десятков метров. Однако в условиях развитой конвекции, типичной для летнего сезона, создаются условия для вертикального переноса аэрозоля до высот 1–2 км, а при конвективной облачности аэрозоль проникает до верхней границы тропосферы. Попав на такие высоты, примесь может уноситься на тысячи километров от источника выброса. Кроме того, в конвективных условиях существенно возрастает скорость вертикального переноса аэрозолей, что объясняется свойством атмосферной конвекции генерировать относительно крупные квазиупорядоченные структуры – термики и кучевые облака с размерами до нескольких километров и скоростями вертикального подъема до нескольких метров в секунду. В настоящее время такие структуры принято называть когерентными.

Отметим, что традиционные модели турбулентной диффузии – как статистические, так и гидродинамические – не описывают явно развитие когерентных структур и поэтому не объясняют многих особенностей распространения аэрозолей в конвективных условиях. Этим недостатком лишен LES (Large Eddy Simulation) – подход, в котором возмущения размером более 100 м разрешаются явно с помощью уравнений термогидродинамики, учитывающих процессы облако- и осадкообразования, а меньшие возмущения параметризуются как подсеточная турбулентность [1–3]. Цели настоящей статьи заключаются в следующем:

– продемонстрировать возможности использования разработанных нами вихреразрешающей [1, 4] и упрощенной LES [5–7, 11, 12] моделей для воспроизведения различных типов конвективных ансамблей;

– исследовать некоторые типичные сценарии обмена аэрозолями между подстилающей поверхностью и атмосферой и вертикального транспорта этих аэрозолей в условиях развитой конвекции [4–6];

– сравнить результаты расчетов с данными наблюдений и с некоторыми известными LES.

1. Физические процессы и математическая модель

Общеизвестно, что источником большей части атмосферного аэрозоля является подстилающая поверхность. Это пыль и песок с территорий, лишенных растительности, частицы соли из испарившихся капель воды, попавших в атмосферу с поверхности водоемов, и другие аэрозоли естественного и антропогенного происхождения. Таким образом, составной частью модели является блок, учитывающий процессы обмена между сушей или водной поверхностью и атмосферой. Над подстилающей поверхностью расположен слой постоянных потоков толщиной 10–100 м, в котором турбулентное перемешивание описывается параметрически на основе теории подобия Монина–Обухова. В вышележащем пограничном слое атмосферы развиваются процессы проникающей турбулентной конвекции, обуславливающие высокоскоростной перенос аэрозоля на значительную (до 10 км) высоту.

Причиной возникновения конвекции является поток тепла от подстилающей поверхности за счет инсоляции. Конвективный обмен реализуется в виде ансамбля когерентных структур, представляющего неупорядоченную совокупность термиков различных размеров и интенсивности и кучевых, либо кучево-дождевых облаков разных типов. В вихреразрешающих моделях структурные элементы конвективного ансамбля интерпретируются как крупные вихри

в поле турбулентности и являются объектом прямого численного воспроизведения.

Математическая постановка задачи описания стохастического ансамбля крупных вихрей представлена в [1, 6]. Исходные дифференциальные уравнения описывают упорядоченный перенос и турбулентную диффузию воздуха, тепла, водяного пара, аэрозолей и водных капель. Рассмотрены две фракции жидкой атмосферной влаги: взвешенная облачная и тяжелая дождевая с собственной скоростью выпадения. Уравнения учитывают процессы конденсации пара и рост капель за счет конденсации, испарение облачной и дождевой воды. Капли могут расти также под влиянием коагуляции, происходящей при их столкновении.

2. Типы конвективных ансамблей

В зависимости от вертикального распределения среднего ветра, температуры и влажности модель [1] описывает разные типы атмосферной конвекции. Детальное исследование конвективных режимов на основе расчетов по двумерному варианту модели было проведено в [6]. Оказалось, что обе модели [1, 6] описывают, по существу, одни и те же типы конвекции, среди которых можно выделить одноярусную и двухъярусную конвекцию. Облачная одноярусная конвекция развивается в форме термиков и небольших кучевых облаков и наблюдается обычно над тропическим океаном при небольших амплитудах суточного хода температуры и высоком содержании пара в воздухе. В результате конвективной деятельности формируется слой перемешивания толщиной порядка 1 км, в котором относительная влажность близка к насыщающей. Над перемешанным слоем расположен тонкий инверсионный подслоя, выше которого влажность гораздо меньше насыщающего значения.

Облака при одноярусной конвекции обычно не дают осадков; при этом пар и жидкая влага выносятся в средние широты. В связи с этим такой тип конвекции вносит значительный вклад в круговорот воды в глобальном масштабе. Моделированию одноярусной конвекции посвящено большое количество публикаций [1–9]. Взаимное сопоставление характеристик конвекции, полученных по разным моделям, а также с данными наблюдений приведено на рис. 1.

В континентальных условиях средних широт, характеризующихся большей амплитудой суточного хода и меньшим количеством пара в нижних слоях, облака уже на начальной стадии отрываются от материнских термиков и образуют второй конвективный ярус (двухъярусная конвекция). Облачные ячейки, как правило, гораздо крупнее термиков. Если вертикальный размер облаков второго яруса превосходит один километр, то они могут давать осадки.

В обычных условиях термики и конвективные облака часто образуют более крупные квазиупорядоченные конгломераты, именуемые суперъячейками с большим временем существования. Модель [1] описывает основные типы суперъячеек, которые представлены на рис. 2.

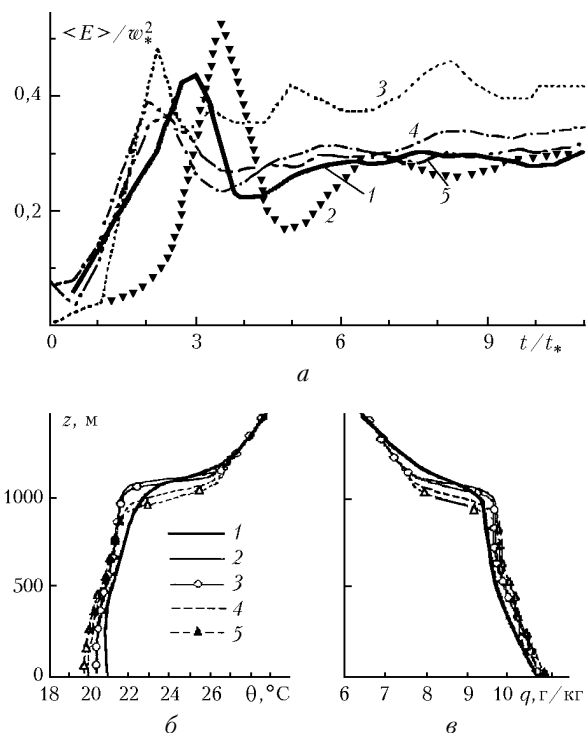


Рис. 1. Сравнение результатов модельных расчетов с данными наблюдений: *a* – временной ход кинетической энергии в модели [1] (кривая 1) и в четырех LES по данным [2] (кривые 2–5); *б* – вертикальные профили эквивалентной потенциальной температуры в модели [1] (кривая 1) и LES по данным [3] (кривые 2–5); *в* – профили влажности

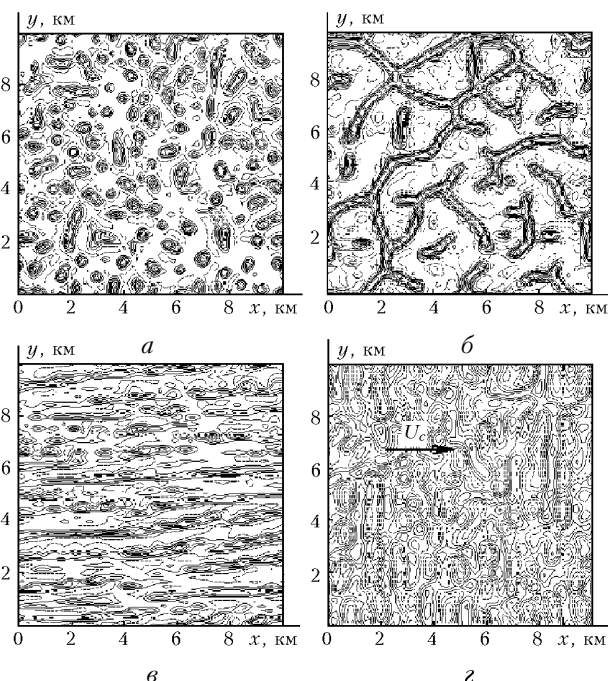


Рис. 2. Горизонтальное сечение поля вертикальной скорости на высоте 500 м: *a* – хаотическое расположение конвективных ячеек; *б* – гексагональные структуры при слабом ветре; *в* – конвективные дорожки, ориентированные вдоль вектора скорости; *г* – поперечные структуры при сильном сдвиге ветра

Сравнение расчетных и фактических распределений облачных ячеек и суперъячеек приведено на рис. 3.

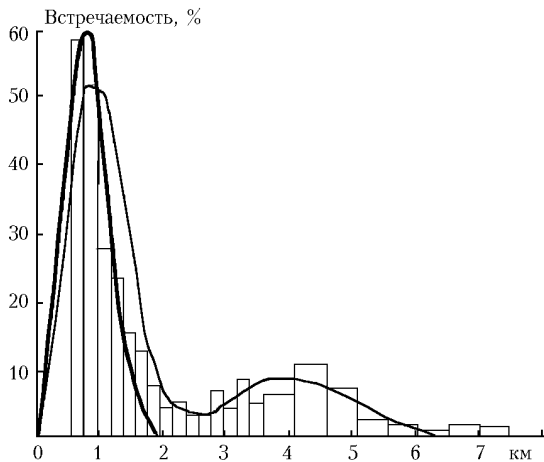


Рис. 3. Встречаемость размеров облаков по диаметру D : прямоугольники — измерения [10]; жирная линия — расчетное распределение при хаотическом расположении облаков; тонкая линия — расчетное распределение в системе с суперъячейками. Левый максимум соответствует мелким облакам, правый — конвективным суперъячейкам

3. Обмен аридным аэрозолем между сушей и атмосферой

Изучение массообмена между подстилающей поверхностью и атмосферой проведено в [4]. Источником аэрозоля служит покрытая мелкими частицами пыли или песка подстилающая поверхность. В [4] показано, что примесь концентрируется в зонах восходящих токов суперъячеек, размеры и время существования которых больше, чем у одиночных термиков. Этот результат подтверждают измерения, проведенные Институтом физики атмосферы РАН в полупустынях Калмыкии [8]. В натурных данных и в расчетах характерный масштаб областей повышенной концентрации примеси приблизительно одинаков, удовлетворительно согласуются и экстремальные значения концентраций. Вертикальный профиль осредненной по горизонтали концентрации примеси имеет максимум у поверхности земли, быстро убывает в слое постоянных потоков и почти не меняется в слое конвективного перемешивания. Отметим, что замутненность всего конвективного слоя — хорошо известный факт. Концентрация частиц аэрозоля в конвективном слое приблизительно обратно пропорциональна собственным скоростям падения частиц [6], что также подтверждают измерения. Небольшая часть аэрозоля попадает во второй конвективный ярус, где частицы примеси служат ядрами конденсации для дождевых капель и ядрами кристаллизации при образовании градин [5, 6].

4. Вымывание аэрозоля

Следует отметить, что конвекция не только является весьма эффективным механизмом вертикального переноса загрязняющих примесей, но одновременно

может влиять на процессы очищения воздуха. В работе [9] показано, что дождь средней интенсивности очищает атмосферу от аридного аэрозоля в течение 15–20 мин, что подтверждается данными наблюдений.

5. Обмен аэрозолем между океаном и атмосферой

Весьма значимым для климата планеты является механизм поступления аэрозоля с поверхности океана в атмосферу. При сильном ветре вследствие обрушения волн образуется пена, состоящая из огромного числа воздушных пузырьков, которые, лопаясь, поставляют в атмосферу большое количество водяных капель. В условиях устойчивой стратификации большая часть этих капель возвращаются в воду, однако конвекция создает условия для выноса частиц воды в нижнюю и среднюю тропосферу. Капельная влага быстро испаряется, и в атмосфере оказывается огромное количество солевых частиц. Эти частицы являются основным источником ядер конденсации водяного пара при облако- и осадкообразовании. Этот механизм поступления аэрозоля в атмосферу изучался в [5], качественная картина распределения «морского» аэрозоля аналогична закономерностям распределения аридного аэрозоля.

6. Параметрический учет атмосферной конвекции

В силу требований детальности пространственно-временного разрешения, предъявляемого к вихреразрешающим моделям, LES-подход не может служить основой при расчете крупномасштабных течений — например, в моделях общей циркуляции атмосферы (МОЦА) или моделях глобального климата. Процессы конвективного обмена в этом случае учитываются с помощью сравнительно простых моделей, не требующих значительных вычислительных ресурсов. Последнему критерию удовлетворяет предложенная в [6, 7, 11, 12] упрощенная модель конвективного ансамбля. С целью получения диапазонов применимости было проведено сравнение результатов расчетов, полученных по вихреразрешающей [1] и упрощенной моделям. Выяснилось, что в одинаковых условиях обе модели описывают одни и те же типы конвективных суперъячеек (см. рис. 2). Правильность теории подтверждают спутниковые фотографии облачности. Это обстоятельство дает основание для использования упрощенной модели в качестве параметризации атмосферной конвекции в МОЦА. Укажем аспекты возможного использования упрощенной модели:

- расчет конвективных потоков импульса, тепла и влаги в МОЦА;
- численная интерпретация крупномасштабных прогностических полей путем детализации инфраструктуры облачных ансамблей;
- восстановление вертикальной структуры средних полей ветра, температуры и влажности по спутниковым

фотографиям облачного покрова при конвекции. Теория показывает, что каждому типу конвективных суперъячеек, легко идентифицируемых по спутниковым фотографиям облачности, соответствует весьма узкий диапазон метеорологических параметров.

Заключение

В условиях развитой конвекции вихреразрешающий подход имеет неоспоримые преимущества по сравнению с традиционными диффузионным и статистическим подходами при расчете вертикального переноса аэрозоля. Модели [1, 6] представлены здесь как гидродинамическая база, служащая для решения задач мониторинга и прогноза аэрозольного загрязнения пограничного слоя атмосферы. Так, учет процессов химической трансформации примесей позволяет расширить круг рассматриваемых задач за счет описания кислотных дождей, распространения опасных загрязнений от источников в городской черте и решать другие задачи ближнего переноса. Применительно к Сибирскому региону наиболее актуальными являются задачи конвективного переноса аэрозолей над промышленными зонами, лесными пожарами, задачи вертикального транспорта парниковых газов, источником которых являются болота тайги, тундры и лесотундры Сибири.

Авторы выражают благодарность проф. П.Ю. Пушистову за полезные обсуждения.

1. Шлычков В.А., Мальбахов В.М., Пушистов П.Ю. Атмосферная конвекция и её роль в вертикальном массопереносе // Оптика атмосфер. и океана. 2001. Т. 14. № 10. С. 957–960.
2. Khairoutdinov M.F., Kogan E.L. A Large Eddy Simulation Model with Explicit Microphysics: Validation against

- Aircraft Observations of a Stratocumulus-Topped Boundary Layer // J. Atmos. Sci. 1999. V. 56. N 13. P. 2115–2130.
3. Niestad F.T.M., Mason P.J., Moeng C.-H., Schuman U. Large eddy simulation of the convective boundary layer: a comparison of four computer codes // Selected Paper from the 8-th Symposium on turbulent shear flow. Springer-Verlag, 1991. P. 343–367.
 4. Шлычков В.А., Пушистов П.Ю., Мальбахов В.М. Влияние атмосферной конвекции на вертикальный перенос аридных аэрозолей // Оптика атмосфер. и океана. 2001. Т. 14. № 6–7. С. 578–582.
 5. Мальбахов В.М., Пушистов П.Ю. Теоретическое изучение некоторых особенностей распространения примесей в конвективных условиях // Оптика атмосфер. и океана. 1998. Т. 11. № 8. С. 919–923.
 6. Мальбахов В.М. Гидродинамическое моделирование эволюции атмосферных конвективных ансамблей. Новосибирск: Изд-во ИВМиМГ СО РАН, 1997.
 7. Malbackov V.M. Instability of convective cells and genesis of convective structures of different scale // J. Fluid Mech. 1998. V. 365. N 1. P. 1–22.
 8. Горчаков Г.И., Шишков П.О., Копейкин В.М. Лидарно-нефелометрическое зондирование аридного аэрозоля // Оптика атмосфер. и океана. 1998. Т. 11. № 10. С. 1118–1123.
 9. Мальбахов В.М., Пушистов П.Ю., Шлычков В.А. Гидродинамическое моделирование вымывания аридного аэрозоля при облачной конвекции // Тез. докл. VIII рабочей группы «Аэрозоли Сибири». Томск, 2001. С. 61–62.
 10. LeMone M.A., Chang T.C., Lucas C. On the effects of filtering on convective-core statistics // J. Atmos. Sci. 1994. V. 51. N 22. P. 3344–3350.
 11. Мальбахов В.М. Упрощенная модель квазиупорядоченных ансамблей конвективных ячеек // Метеорол. и гидрол. 1997. № 11. С. 30–39.
 12. Мальбахов В.М., Перов В.А. Параметризация конвекции в моделях крупномасштабной циркуляции атмосферы // Вычислительные процессы и системы / Под ред. Г.И. Марчука. М.: Наука, 1993. Вып. 10. С. 96–136.

V.M. Malbakhov, V.A. Shlychkov. Eddy resolving models in problems of vertical transport of aerosols.

Peculiarities of the vertical transport of heat, moisture, and aerosol under convective conditions are investigated based on analysis of two numerical models of a convective ensemble: eddy resolving and simplified ones. The models developed by us and suitable for solving the problems of aerosol diffusion and constructing the convection parameterization procedures in global circulation models are reviewed. Some recommendations are given for usage of the models in solution of applied problems.