

На правах рукописи

ИГНАТЬЕВ Алексей Алексеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЕЙ
КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ЧИСЛЕННОЙ ТРЕХМЕРНОЙ LES МОДЕЛИ**

Специальность 25.00.29 - физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург - 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении
«Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова»

Научный консультант: канд.физ.-мат.наук, ст.науч.сотр.,
Довгалюк Юлия Александровна.

Официальные оппоненты: д-р.физ.-мат.наук, профессор,
ФГБУ ГГО им. А.И.Воейкова, зав.лаб.,
Кароль Игорь Леонидович.

канд.физ.-мат.наук,
ФГБОУВПО ВКА им. А.Ф. Можайского,
ст.науч.сотр.,
Михайловский Юрий Павлович.

Ведущая организация: Российский государственный
гидрометеорологический университет

Защита состоится 14 ноября 2012 г. в 14 часов на заседании
диссертационного совета Д 327.005.01 по защите докторских и кандидатских
диссертаций в ФГБУ "ГГО им. А.И. Воейкова" по адресу: 194021 Санкт-
Петербург, ул. Карбышева, д. 7. С диссертацией можно ознакомиться в
библиотеке федерального государственного бюджетного учреждения
"Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова".

Автореферат разослан 11 октября 2012 г.

Ученый секретарь по защите
докторских и кандидатских диссертаций,
доктор географических наук

А.В.Мещерская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы и состояние вопроса.

Поля кучевых конвективных облаков разной вертикальной и горизонтальной протяженности оказывают существенное влияние на распределение тепла на земном шаре, общую циркуляцию атмосферы, круговорот воды и являются важным погодо- и климатообразующим фактором. Знание характеристик облачных полей важно с точки зрения параметризации конвекции, определяющей вертикальные потоки тепла и влаги и оказывающей влияние на радиационный баланс в глобальных климатических моделях и моделях прогноза погоды. Физические процессы, происходящие при образовании полей кучевых облаков, носят турбулентный, стохастический характер. До эпохи появления мощной вычислительной техники и современных численных методов считалось, что практически невозможно адекватно учесть влияние каждого отдельного облака на поля крупномасштабных переменных (температуры, скорости, влажности и других), так как такие поля и ансамбли неоднородны и имеют чрезвычайно нерегулярную структуру в широком диапазоне размеров. В связи с этим традиционные методы исследования облачных полей основаны в основном на упрощенных моделях (метод частицы, метод слоя, полуторамерные модели и т.д.), которые не в состоянии реалистично учитывать турбулентную динамику облачных полей.

Однако с появлением суперкомпьютеров и развитием вычислительных методов появилась возможность исследовать в численном эксперименте детальную турбулентную структуру полей облаков, проследить за рождением, развитием и распадом каждого отдельного облака и всего поля в целом. Одним из таких методов является LES моделирование (Large Eddy Simulation – метод больших вихрей), применению которого в качестве инструмента исследования полей облаков посвящена данная работа.

Основная идея метода – разделить все турбулентные пульсации на явно разрешаемые (большие вихри – отсюда название метода) и на подсеточные. Такой процесс фильтрации мелкомасштабных турбулентных движений приводит к тому, что турбулентные потоки моделируются в виде суммы двух составляющих:

$$\overline{\varphi'u'_i} = (\overline{\varphi'u'_i})_{RESOLVED} - K_{SUBGRID} \frac{\partial \varphi}{\partial x_i},$$

где первое слагаемое в правой части представляет собой турбулентный поток, явно разрешаемый на сетке без осреднения (resolved), а второе – подсеточный (subgrid) поток, осредненный на масштабах, меньших характерного размера ячейки. При этом подсеточный коэффициент турбулентного переноса $K_{SUBGRID}$ параметризуется. LES моделирование является компромиссом между полным осреднением (RANS – Reynolds Average Navier-Stokes) и прямым численным моделированием турбулентных пульсаций всех масштабов (DNS – Direct Numerical Simulation) и позволяет успешно моделировать непосредственно средние и крупные турбулентные вихри. А так как основная часть энергии турбулентных пульсаций лежит именно в крупномасштабной части спектра, то использование LES моделей позволяет получить более реалистичную и точную картину турбулентного обмена, так как именно крупные и средние вихри, явно разрешаемые во времени и пространстве, определяют форму, размер облаков и вертикальные турбулентные потоки тепла, влаги и импульса.

Концепция LES моделирования имеет преимущество перед натурными наблюдениями в том отношении, что она дает возможность исследователю гибко управлять вычислительным экспериментом, воспроизводить в расчетах желаемые условия с изменением только тех параметров, влияние которых исследуется, что практически недостижимо в натурном эксперименте.

В отечественной литературе, к сожалению, имеются крайне мало работ, в которых используется LES методика для исследования атмосферных

процессов, и практически отсутствуют статьи, посвященные LES моделированию облаков. Можно надеяться, что разработка и использование LES моделирования в данной работе будет способствовать развитию этой методики и поможет точнее представить физическую картину облачных полей.

Цель работы состоит в проведении исследований физических закономерностей формирования полей конвективных облаков и динамики их характеристик в пограничном слое тропосферы с помощью вычислительного эксперимента и использования LES метода. Цель работы включает в себя выполнение следующих подзадач:

- Разработка математической модели полей конвективных облаков на основе метода больших вихрей (LES) и компьютерной программы для ЭВМ с параллельной архитектурой;
- Проведение тестовых и верификационных расчетов: сравнение полученных расчетных данных с экспериментальными и расчетными данными, имеющимися в литературе.
- Определение функции распределения плотности вероятности влажности в облачном слое и ее анализ;
- Определение влияния облаков на вертикальный профиль коэффициента турбулентной диффузии;
- Анализ вертикальных движений насыщенных и ненасыщенных участков в облачном слое.

Научная новизна заключается в следующем.

Разработана новая математическая модель полей конвективных облаков на основе LES моделирования, в которой использованы более совершенные и точные алгоритмы по сравнению с аналогичными моделями. Адекватность модели была показана путем сравнения с результатами натурных измерений. По результатам LES моделирования получены новые

физические закономерности, касающиеся функции плотности вероятности водности в облачном слое. Предложены новые аппроксимации этой функции.

Получены новые физические закономерности, касающиеся влияния количества облаков на профиль коэффициента турбулентного переноса для скалярной примеси в подоблачном конвективном слое. Предложена новая аппроксимация профиля этого коэффициента, учитывающая количество облаков. Впервые проведен анализ вертикальных движений насыщенных и ненасыщенных участков в облачном слое на основе LES моделирования, обнаружена зона инверсии воздушных потоков, где насыщенные и ненасыщенные участки меняют направление своего движения.

Практическая ценность результатов.

Полученные в диссертации новые данные, касающиеся функции распределения водности, позволяют полнее представить физическую картину динамики полей кучевых облаков и дают возможность усовершенствовать более простые параметрические модели для их последующего использования в глобальных и региональных моделях. Обнаруженная особенность движения насыщенных и ненасыщенных воздушных масс вблизи верхней границы облачного слоя может быть использована для уточнения метода слоя.

Результаты диссертации нашли свое внедрение при выполнении НИР в ОАО СПБАЭП в части разработки параллельной программы для расчета переноса и осаждения аэрозольных частиц на основе LES метода, позволившей существенно ускорить расчеты. Суть внедрения состояла в использовании параллельного численного алгоритма для решения уравнений гидродинамики несжимаемой жидкости, где важную часть составлял оригинальный параллельный алгоритм для решения уравнения Пуассона, разработанный при личном участии автора диссертации.

Результаты диссертации нашли свое внедрение также при выполнении НИР в отделе физики облаков и атмосферного электричества ГГО им. А.И.Воейкова в части разработки квазимонотонного алгоритма высокого порядка точности для описания переноса микрофизических величин в трехмерной модели грозового кучево-дождевого облака, разработанного при личном участии автора диссертации. Внедрение этого алгоритма позволило повысить точность расчетов.

Достоверность научных положений. Достоверность полученных результатов основана на тщательном тестировании разработанной модели путем сравнения с данными наблюдений (самолетные наблюдения пассатных облаков в районе острова Пуэрто-Рико) и расчетами других авторов, имеющихся в литературе.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Теоретическая модель развития полей кучевых конвективных облаков малой мощности, основанная на методе LES моделирования.
2. Результаты исследования динамики формирования и развития полей конвективных облаков малой мощности:
 - статистические данные о динамике водности полей конвективных облаков, описываемые экспоненциально убывающей функцией распределения водности.
 - наличие характерной точки излома на оси водности, характеризующей скачкообразное возрастание скорости убывания функции распределения.
3. Новые данные о структуре движений воздуха в зоне верхней границы облачного поля, где крупномасштабные турбулентные вихри проникают в вышележащие устойчивые слои и движение воздушных

масс в среднем меняет свое направление: насыщенный облачный воздух опускается, а ненасыщенный безоблачный воздух поднимается.

4. Новые данные о влиянии облаков на коэффициент турбулентного переноса скалярной примеси в подоблачном слое.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались:

1. на семинарах отдела физики облаков ГГО им. Воейкова.
2. на итоговой сессии ученого совета РГГМУ за 2011 год.
3. на международной конференции “Параллельные вычислительные технологии” (ПАВТ 2009), Нижний Новгород, 30 марта - 3 апреля 2009 г.
4. на XV Всероссийской научно методической конференции “Телематика 2008”. 23-26 июня 2008 года, Санкт-Петербург
5. на Европейской Аэрозольной конференции 2008, 24- 29 августа 2008 г., Фессалоники, Греция.
6. на V Международной Конференции "Естественные и антропогенные аэрозоли". С.Петербург, 22-26 мая 2006 г.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Материал изложен на 151 странице, содержит 62 рисунка, 2 таблицы и список литературы из 149 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, показываются особенности и преимущества LES моделирования, определяется цель работы и кратко излагается ее содержание.

В первой главе приведен краткий обзор некоторых важных аспектов исследования полей кучевых облаков и современное состояние вопроса по литературным данным. Рассмотрены классические математические модели полей облаков и проблемы, связанные с численными методами исследований. Обсуждены вопросы выбора температурного инварианта при

моделировании течений с фазовыми переходами. Описаны общие подходы моделирования турбулентности. Рассмотрены вопросы параметризации потока вовлечения и некоторые проблемы, связанные с распределением облаков по размерам.

Во второй главе построена математическая модель на основе LES моделирования, включающая уравнение движения вязкой жидкости для трех компонент скорости во вращающейся системе координат в приближении Буссинеска

$$\frac{\partial \bar{u}_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_1 \bar{u}_j - \tau_{1j}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\bar{p}^* + \frac{2}{3} E \right) + f_c (\bar{u}_2 - U_{2g}),$$

$$\frac{\partial \bar{u}_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_2 \bar{u}_j - \tau_{2j}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\bar{p}^* + \frac{2}{3} E \right) - f_c (\bar{u}_1 - U_{1g}),$$

$$\frac{\partial \bar{u}_3}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_3 \bar{u}_j - \tau_{3j}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\bar{p}^* + \frac{2}{3} E \right) + g \frac{\bar{\theta}_v - \theta_0}{\theta_0},$$

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0,$$

уравнение сохранения температурного инварианта $\bar{\theta}_l$

$$\frac{\partial \bar{\theta}_l}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\theta}_l \bar{u}_j + \overline{\theta'_l u'_j}) = -\frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial F}{\partial x_3},$$

и уравнение сохранения полного влагосодержания \bar{q}_t

$$\frac{\partial \bar{q}_t}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{q}_t \bar{u}_j + \overline{q'_t u'_j}) = 0,$$

где x_j – координата в направлении j ($j=1,2$ – горизонтальные направления, 3 – вертикальное), \bar{u}_i – компоненты скорости ($i=1,2,3$), \bar{p} – давление, $\bar{p}^* = \bar{p} - \bar{p}_0$ – динамическое давление и $\bar{p}_0 = \bar{p}_0(z)$ – его гидростатическая часть, ρ – постоянная плотность среды, g – ускорение свободного падения, $\bar{q}_t = \bar{q}_v + \bar{q}_l$ – полное влагосодержание, \bar{q}_v, \bar{q}_l – массовые

концентрации водяного пара и облачных капель, соответственно, F – уходящий радиационный поток и c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, $\bar{\theta}_v = \bar{\theta}(1 + 0.61\bar{q}_v - \bar{q}_l)$ – виртуальная потенциальная температура, $\bar{\theta}$ – потенциальная температура, $\theta_0 = const$ – некоторая фоновая постоянная потенциальная температура, $f_c = 2\Omega \sin \varphi$ – параметр Кориолиса (φ – широта, Ω – угловая скорость вращения Земли) и U_{1g}, U_{2g} – компоненты геострофического ветра. Потенциальная температура с учетом жидкой влаги $\bar{\theta}_l$ (liquid water potential temperature) в рассматриваемой постановке сохраняется при фазовом переходе и определяется следующим образом:

$$\bar{\theta}_l = \bar{\theta} - \left(\frac{L\bar{\theta}}{c_p T} \right) \bar{q}_l,$$

где L – удельная теплота фазового перехода и \bar{T} – абсолютная температура. Подсеточные турбулентные потоки $\tau_{ij}, \overline{\theta'_i u'_j}, \overline{q'_i u'_j}$ параметризуются с помощью турбулентной модели Дирдорфа, содержащей одно дифференциальное уравнение для кинетической энергии турбулентных подсеточных пульсаций $E = \frac{1}{2} \left(\overline{(u'_1)^2} + \overline{(u'_2)^2} + \overline{(u'_3)^2} \right)$. Для определения влажности \bar{q}_l используется специальная конденсационная схема.

В данной главе также описаны граничные условия на подстилающей поверхности на основе параметризации Мони́на-Обухова, численный алгоритм решения системы уравнений и рассмотрены особые требования к нему, необходимые для LES моделирования – малая схемная вязкость и способность сохранять кинетическую энергию в бездиссипативном течении. На основе описанной модели был разработан компьютерный код для проведения расчетов на параллельных суперкомпьютерах. Проведена проверка кода на основе модельной задачи распада вихря Тейлора-Грина, имеющей аналитическую аппроксимацию, а также на примере развития конвективного слоя смешения в баке с водой (Deardorff et al, 1969).

В третьей главе проведена верификация модели и программы на основе самолетных наблюдений поля облаков, выполненных в районе пассатных ветров к северу от острова Пуэрто-Рико 15 декабря 1972 года, результаты которых были опубликованы в литературе. Расчетная область имела размеры 5 км в горизонтальных направлениях и 3,5 км в вертикальном. Настилающей поверхности задавались потоки тепла, влаги и импульса, рассчитанные с помощью параметризации Монина-Обухова. На боковых границах задавались периодические условия. Верхняя граница – непроницаемая поверхность без трения. Задавалась также соответствующая стратификация атмосферы и геострофический ветер. В качестве начальных данных задавался однородный (на каждом горизонтальном уровне) поток воздуха за исключением нижнего сеточного слоя, где к температуре добавлялись небольшие случайные возмущения для более быстрой инициализации турбулентных пульсаций. Был проведен ряд расчетов с использованием трех равномерных сеток: $40 \times 40 \times 70$, $96 \times 96 \times 140$ и $192 \times 192 \times 280$ с размерами ячеек, соответственно: $\Delta x = \Delta y = 125$ м, $\Delta z = 50$ м; $\Delta x = \Delta y = 52$ м, $\Delta z = 25$ м и $\Delta x = \Delta y = 26$ м, $\Delta z = 12.5$ м. В начальный момент, когда облаков еще нет, все параметры (скорость, температура, влажность) горизонтально однородны и полное влагосодержание меньше насыщения. Решение постепенно эволюционирует к развитому турбулентному состоянию. Примерно через час физического времени появляются первые облака в областях, где явно разрешаемые турбулентные флуктуации влажности и температуры приводят к появлению насыщенной среды – первых облаков. На рисунке 1 показана мгновенная изоповерхность водности к моменту физического времени 2.5 часа. На рисунке хорошо видны отдельные облачка различных размеров, достаточно отчетливо виден уровень конденсации. Облака имеют вид наклонных башенок, обусловленных сдвигом ветра, что характерно для пассатной облачности.

Результаты расчетов – степень закрытия небосвода и вертикальные профили турбулентных потоков тепла, влаги и импульса, полученных на разных сетках, в целом удовлетворительно согласуются как с данными наблюдений, так и с результатами расчетов других авторов, имеющихся в литературе. Некоторые сравнения приведены на рисунках 2 и 3.

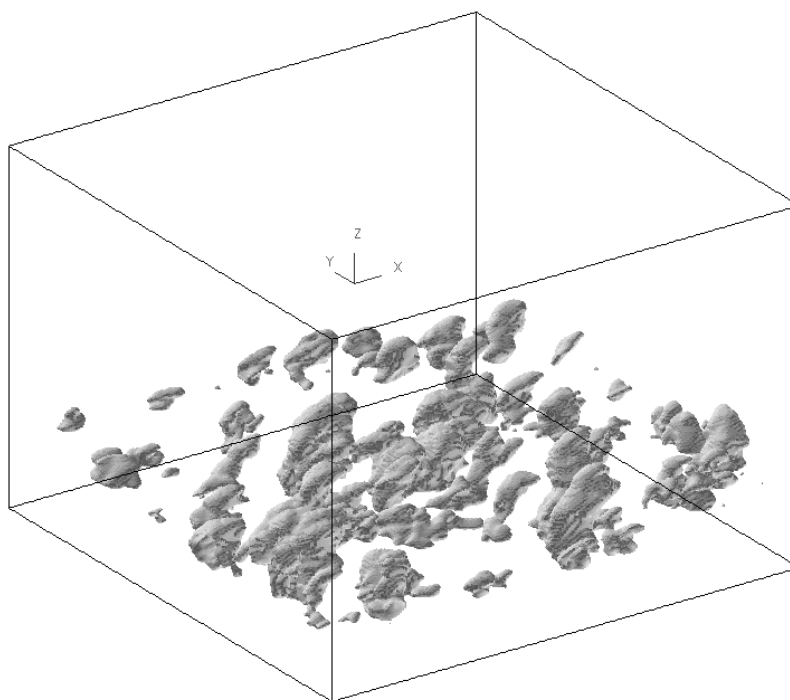


Рис. 1 – Расчетная изоповерхность водности (10^{-5} кг/кг) в момент времени 2,5 часа (сетка 192x192x280).

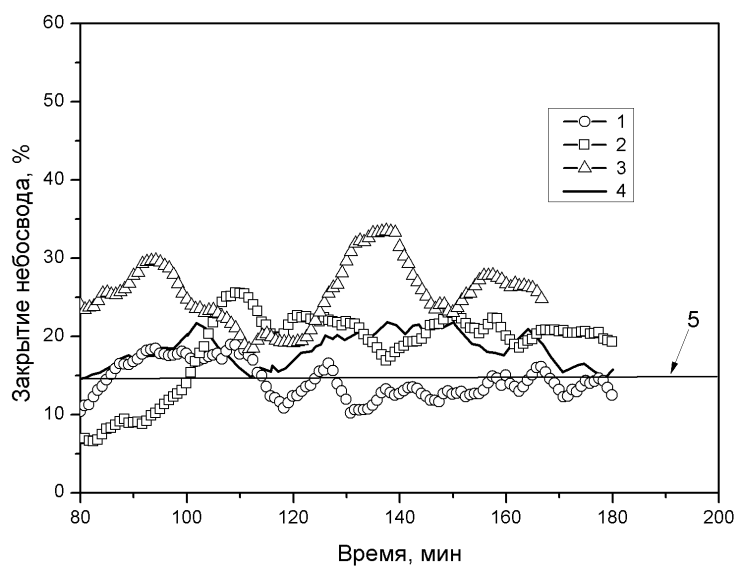


Рис. 2 – Временная эволюция степени закрытия небосвода.

Обозначения: (1) – сетка 40x40x70, (2) – сетка 96x96x140, (3) – сетка 192x192x280, (4) – расчет (Cuijpers & Duynkerke, 1993), (5) – наблюдаемое значение (Pennel & LeMone, 1974).

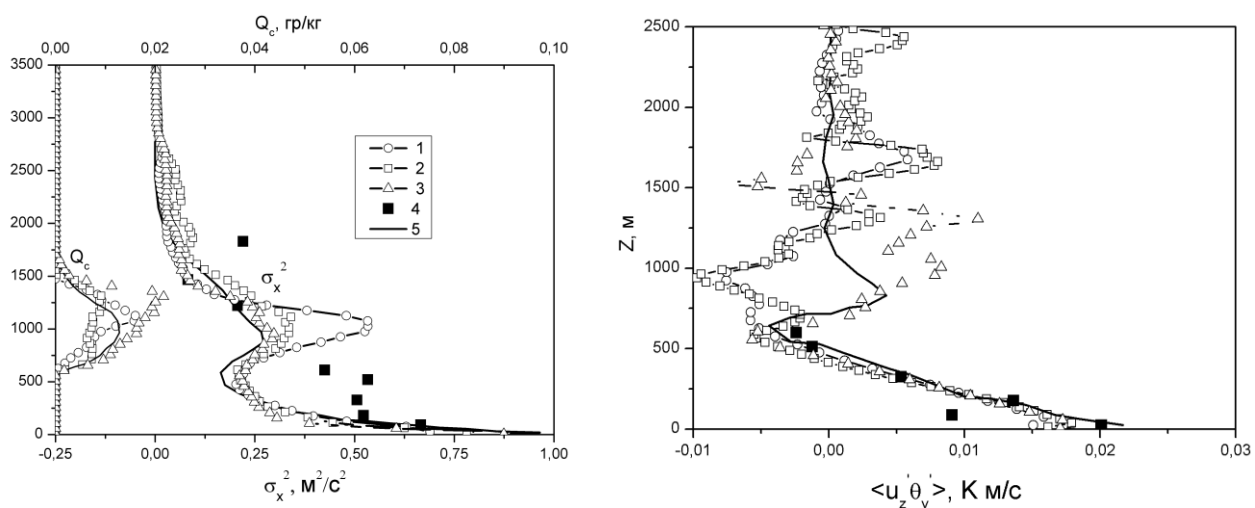


Рис. 3 – Профили средней водности Q_c и дисперсии продольной скорости σ_x^2 (слева) и профиль вертикального потока плавучести (справа) в момент времени 2 ч. 35 мин. Обозначения: 1,2,3 – как на рис. 2, (4) – наблюдаемые значения (Pennel & LeMone, 1974) и (5) – расчет (Cuijpers & Duynkerke, 1993).

По профилю водности (рис. 3) видно положение нижней и верхней кромок облачного поля: около 600 м и 1500 м, соответственно, что также согласуется с данными наблюдений.

Приведен анализ чувствительности модели к изменениям некоторых параметров, в частности, к изменениям скорости ветра, температуры подстилающей поверхности и удельной влажности. Проведена также верификация модели и программы на основе Барбадосского эксперимента (BOMEX) и показано удовлетворительное согласие с другими расчетами, имеющимися в литературе.

В четвертой главе с целью выяснения влияния физико-географических условий на облачные поля и их характеристики приведены

результаты расчета поля кучевых облаков для условий средних широт (Ленинградская область 4 сентября 2011 года).

Проведено сравнение вертикальных профилей турбулентных потоков с аналогичными данными для поля пассатных облаков. Из анализа полученных данных сделаны следующие выводы, обусловленные разными физико-географическими условиями:

1) Облачное поле в Ленинградской области расположено несколько выше – от 1000 до 1700-1800 метров, в отличие от более низких облаков над морем в пассатной зоне (от 600 до 1500 м), что обусловлено различной стратификацией атмосферы.

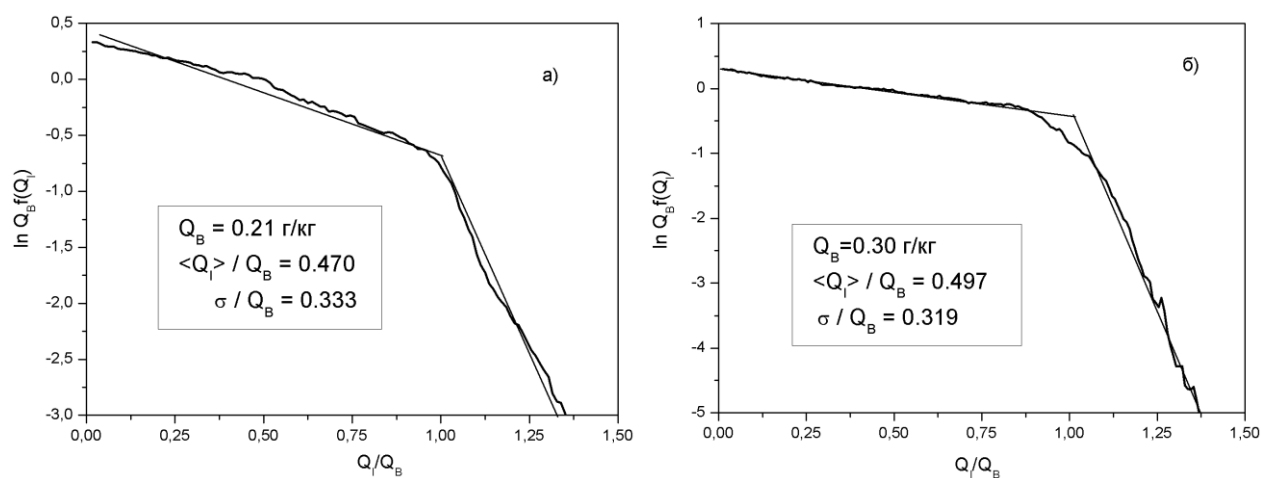
2) Профили тепловых потоков для обоих вариантов имеют одинаковый характер: линейно уменьшаются с высотой вплоть до нуля, затем меняют знак, достигая минимума. Высота этого минимума совпадает с высотой нижней кромки облаков. Минимум теплового потока (который, как известно, также имеет место и для безоблачного конвективного слоя) является потоком вовлечения. Потоки вовлечения оказываются для рассмотренных случаев достаточно близкими и равными -0.012 К м/с и -0.010 К м/с, соответственно, для поля в средних широтах и для поля пассатных облаков. Здесь необходимо отметить, что внутри облачного слоя имеет место еще один локальный минимум теплового потока, равный -0.070 К м/с и -0.025 К м/с, соответственно, для поля в средних широтах и для поля пассатных облаков.

3) Поток влаги на подстилающей поверхности для случая облаков в Ленинградской области меньше приблизительно в два с половиной раза, чем для пассатных облаков. Это объясняется тем фактом, что концентрация пара на поверхности для этого расчета тоже была почти в два раза меньшей.

4) Потоки продольного импульса имеют для рассмотренных вариантов различный знак на поверхности. Это различие связано с разным сдвигом геострофического ветра – для варианта поля в Ленинградской области

скорость ветра уменьшается при приближении к подстилающей поверхности, а для случая поля около Пуэрто-Рико увеличивается. Несмотря на это, оба профиля имеют один локальный минимум одинакового (отрицательного) знака на высоте приблизительно совпадающей с высотой нижней кромки облаков и равный $-0.087 \text{ м}^2/\text{с}^2$ и $-0.05 \text{ м}^2/\text{с}^2$, соответственно, для поля в средних широтах и для поля пассатных облаков.

Исследована статистическая структура поля влажности в облачном слое. В литературе предложен ряд аппроксимаций функции распределения плотности вероятности влажности, в основном на основе функции Гаусса (одной или двух). В настоящей диссертации впервые показано, что функция распределения влажности в облачном слое близка к убывающей экспоненте. Кроме того, профиль этой функции имеет одну характерную точку излома профиля Q_B на оси влажности, где скачком увеличивается скорость убывания экспоненты.



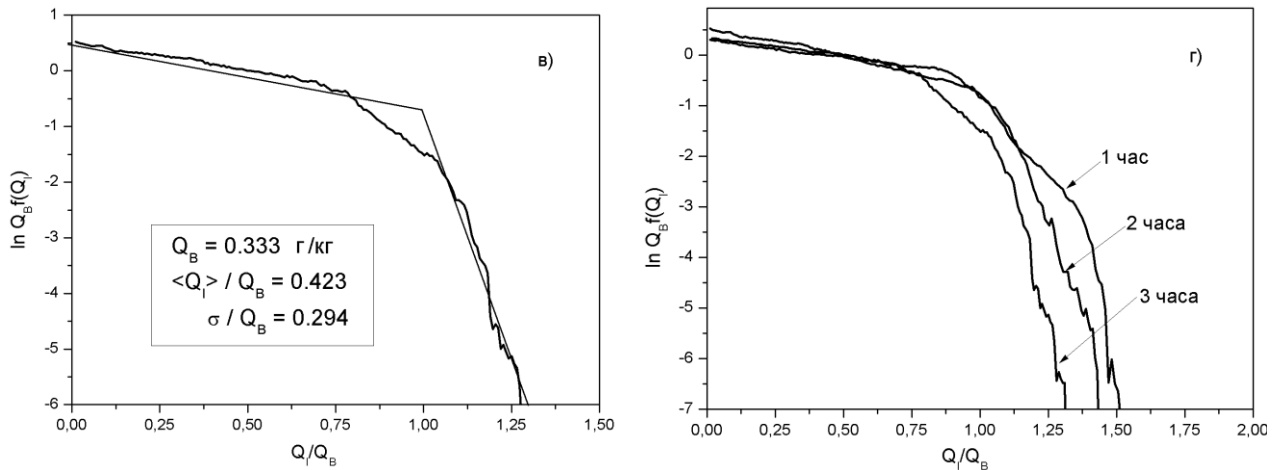


Рис. 4 – Функция распределения плотности вероятности влажности.

Расчет поля пассатной зоны на различные моменты времени: а) 1 час после начала появления облаков, б) 2 часа, в) 3 часа и г) динамика изменения функции распределения во времени. На графиках приведены также средние безразмерные значения влажности (в угловых скобках) и среднеквадратичные отклонения σ .

Для рассмотренных в диссертации полей облаков пассатной зоны точка излома $Q_B = 0.2..0.3$ г/кг и для полей облаков в средних широтах $Q_B = 0.45..0.65$ г/кг. Точка Q_B может быть выбрана в качестве характерного масштаба влажности в облачном поле, который можно использовать для приведения к безразмерному виду всех статистических характеристик (функции распределения плотности вероятности, среднего значения и дисперсии) (рис. 4). На рисунке 5 показаны гистограммы накопленных повторяемостей влажностей ниже и выше точки излома Q_B для различных моментов времени.

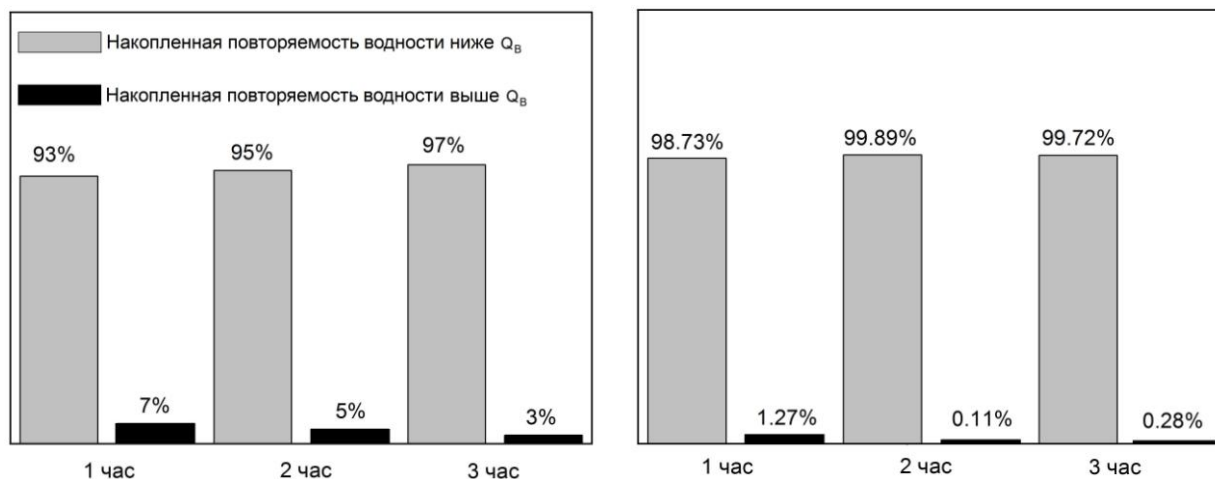


Рис. 5 – Накопленные повторяемости водности ниже и выше Q_B в облаках пассатной зоны (слева) и в средних широтах (справа) в различные моменты времени.

Необходимо отметить, что имеющиеся в литературе функции распределения водности (полученные экспериментально) часто приведены в виде интегральной функции распределения $F(Q_i) = \int_0^{Q_i} f(z) dz$ (накопленной повторяемости). Так как накопленная повторяемость водности выше точки излома Q_B очень мала, как это видно из рисунка 5, то этот излом не может быть обнаружен на таких графиках, особенно учитывая невысокую точность самолетных изменений водности (погрешность около 10%). Так, на рисунке 6 показано сравнение расчетных и экспериментальных интегральных функций распределения (накопленных повторяемостей). Как видно из рисунка точки излома практически неразличимы на профилях повторяемости, особенно на экспериментальных. LES моделирование дает возможность получать гораздо более подробную статистику и большую точность, и поэтому позволяет в вычислительном эксперименте обнаружить отмеченную особенность (точку излома) на профиле функции распределения плотности вероятности.

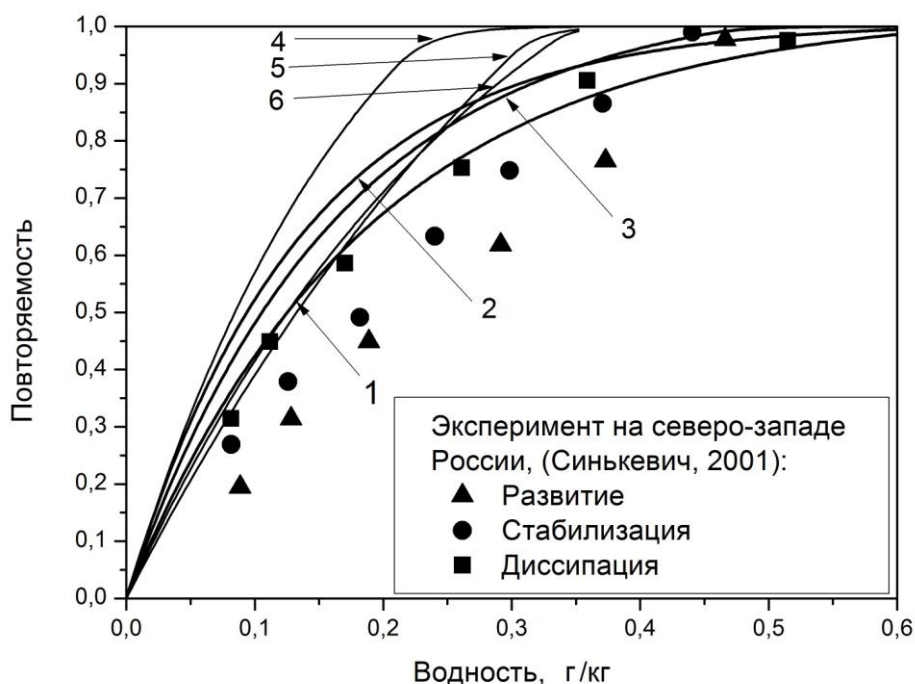


Рис. 6 – Накопленные повторяемости водности. Сравнение расчетных и экспериментальных значений. Обозначения: 1,2,3 – расчет поля облаков в средних широтах на моменты времени 1, 2 и 3 часа, соответственно, и 4,5,6 – те же моменты времени для поля пассатных облаков.

В окончательном виде функцию распределения плотности вероятности водности можно записать в безразмерном виде:

$$f(Q)Q_B = \begin{cases} f_{01} \exp\left(-a_1 \frac{Q}{Q_B}\right), & \text{при } Q < Q_B \\ f_{02} \exp\left(-a_2 \frac{Q}{Q_B}\right), & \text{при } Q > Q_B \end{cases}$$

Константы этой аппроксимации приведены в следующей таблице.

Таблица 1. Константы аппроксимации для функции распределения водности.

	Пассатная зона			Средние широты		
	1 час	2 часа	3 часа	1 час	2 часа	3 часа
Q_B , г/кг	0.210	0.300	0.333	0.453	0.659	0.659

a_1	1.1151	0.6864	1.1458	2.7633	4.8238	3.5045
a_2	7.1841	12.882	20.063	14.505	37.4905	40.848
f_{01}	1.5423	1.3113	1.6365	2.9120	4.8578	3.6034
f_{02}	666.33	$0.2595 \cdot 10^6$	$0.2684 \cdot 10^9$	$0.3657 \cdot 10^6$	$7.4598 \cdot 10^{14}$	$5.9536 \cdot 10^{16}$

Для выяснения физической картины и характера турбулентного обмена в подоблачном слое были проведены расчеты облачного поля, где дополнительно задавалась пассивная примесь, играющая роль маркера (M), равного в начальный момент нулю в подоблачном слое и единице в остальной части области. Зная вертикальный профиль маркера и его поток (осредненных по горизонтали), можно оценить полный коэффициент турбулентной диффузии для пассивного скаляра, как отношение $K_{turb} = -\langle u'_z M' \rangle_{TOTAL} / \partial \langle M \rangle / \partial z$ на тех участках, где вертикальная производная $\partial \langle M \rangle / \partial z$ не слишком близка к нулю. На рисунке 7 показан вертикальный профиль K_{turb} , полученный в LES расчетах поля пассатных облаков на трех различных сетках и профиль коэффициента турбулентной диффузии для полного влагосодержания, полученный также в LES расчетах для аналогичных полей облаков в работе (Stevens et al. 2001).

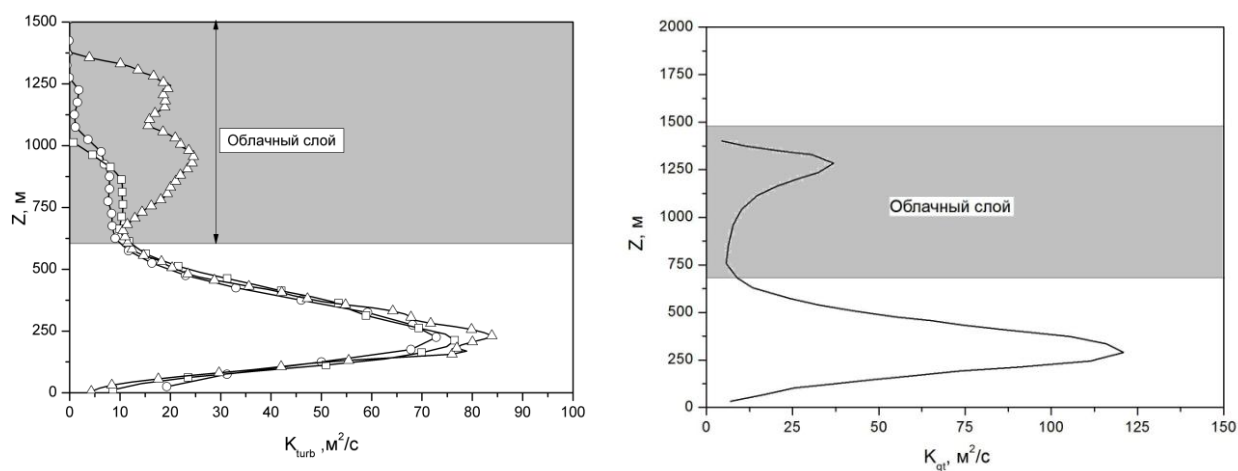


Рис. 7 – Профиль коэффициента турбулентной диффузии к моменту времени 2 ч. 35 мин по результатам LES моделирования поля пассатных облаков (слева) и профиль коэффициента турбулентной диффузии для полного влагосодержания, полученный в работе (Stevens et al. 2001) (справа).

Обозначения как на рисунке 3.

Из рисунка видно, что в подоблачном слое коэффициент турбулентного переноса имеет характерный локальный максимум с довольно большой величиной, находящийся приблизительно на $1/3$ высоты подоблачного слоя.

В облачном слое коэффициент турбулентной диффузии, полученный на самой грубой и средней сетке, приблизительно постоянен и составляет величину порядка $10-15 \text{ м}^2/\text{с}$, но для самой мелкой сетки (с вертикальным шагом $12,5 \text{ м}$) этот коэффициент в облачном слое имеет второй локальный максимум с величиной около $20-25 \text{ м}^2/\text{с}$. Аналогичное поведение коэффициента турбулентной диффузии наблюдалось также и ряде других LES расчетов, имеющих в литературе. Разумно предположить, что второй максимум K_{turb} в облачном слое, обнаруженный в расчетах на самой мелкой сетке, отражает физическую реальность, которая просто не обнаруживается на более грубых сетках. Для окончательного выяснения этого вопроса требуются дополнительные расчеты на еще более подробных сетках.

Тем не менее, в подоблачном слое все сетки дают практически одинаковый результат. Также было обнаружено, что при отсутствии облаков коэффициент турбулентного переноса в подоблачном слое имеет заметно отличающийся характер (он приблизительно постоянен) в отличие от вариантов с облаками, где имеет место отчетливый локальный максимум. Причем этот максимум имеет наибольшую величину при степени закрытия небосвода около 8% . При большем количестве облаков величина локального максимума K_{turb} несколько снижается. Отсюда следует, что турбулентная

динамика в подоблачном слое носит нетривиальный характер и зависит, кроме всего прочего, и от процессов облакообразования.

Если через H обозначить высоту подоблачного слоя, то профиль K_{turb} в этой области можно аппроксимировать двумя линейными функциями вида:

$$K_{turb}(z) = \begin{cases} K_1 + (K'_2 - K_1) \frac{z}{H/3}, & 0 < z < H/3 \\ K'_2 + (K_3 - K'_2) \frac{(z - H/3)}{2H/3}, & H/3 < z < H \end{cases},$$

где $K_1 \approx 10..30 \text{ м}^2/\text{с}$, $K_3 \approx 10..30 \text{ м}^2/\text{с}$,

$$K'_2 \approx \frac{K_1 + K_3}{2} + \left(K_2 - \frac{K_1 + K_3}{2} \right) f_{3H}(C_{3H})$$

и функция $f_{3H}(C_{3H})$ зависит от степени закрытия небосвода C_{3H} (в процентах) следующим образом:

$$f_{3H}(C_{3H}) = \begin{cases} \frac{C_{3H}}{8}, & C_{3H} < 8 \\ 1 - 0.3 \frac{C_{3H} - 8}{12}, & 8 \leq C_{3H} < 20 \\ 0.7, & C_{3H} > 20 \end{cases},$$

где $K_2 \approx 80..200 \text{ м}^2/\text{с}$.

При построении аппроксимации учтены также расчеты поля облаков, характерных для средних широт. Следует отметить, что определить полный коэффициент турбулентного переноса для температуры не удастся в силу нелокального характера процесса переноса тепла в конвективном слое (вертикальный градиент температуры близок к нулю).

Проведен анализ вертикальных движений воздуха в облачном слое. По результатам LES моделирования получено, что картина вертикальных движений внутри облачного слоя в среднем находится в неплохом согласии с выводами классического метода слоя с небольшим отличием. Отличие это связано с тем, что в верхней части слоя обнаружена зона (толщиной приблизительно 1/5 от всей мощности), где имеет место инверсия движения

воздушных потоков: насыщенный облачный воздух опускается, а ненасыщенный воздух поднимается (рис. 8).

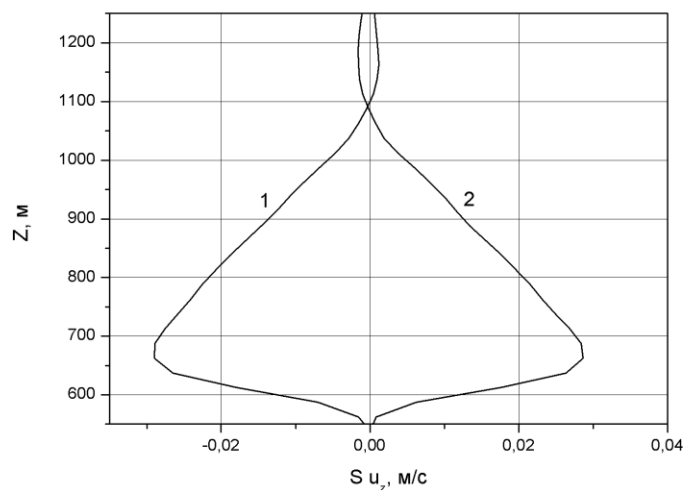


Рис. 8 – Средние профили вертикальных расходов воздуха, приходящихся на: 1 – ненасыщенные потоки (нисходящие+восходящие), 2 – насыщенные облачные потоки (нисходящие+восходящие). LES расчет пассатного поля облаков.

При этом отношение максимальных значений средних расходов в зоне инверсии и вне ее равно приблизительно 0.05. Эту зону можно характеризовать как зону вовлечения, где крупномасштабные турбулентные вихри проникают в вышележащие устойчивые слои. Обнаруженная особенность может быть использована для уточнения метода слоя.

Заключение.

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Разработана математическая модель полей кучевых конвективных облаков.

2. Проведена верификация модели на основе сравнения с данными наблюдений поля пассатных облаков.

3. Приведен анализ чувствительности модели к изменениям некоторых параметров, в частности, к изменениям скорости ветра, температуры

подстилающей поверхности и изменению стратификации удельной влажности.

4. Определено влияние физико-географических условий на характеристики полей облаков в пассатной зоне и в средних широтах.

5. Выявлены физические закономерности функции распределения водности в облачном слое.

6. С помощью метода маркера выявлены физические закономерности распределения профиля коэффициента турбулентного переноса в подоблачном слое с учетом количества облаков.

7. Проведен анализ вертикальных турбулентных движений воздуха в облачном слое. Выявлены особенности этих движений, не учитываемые методом слоя.

Разработанная модель и программа могут послужить основой для дальнейших исследований облачных полей с учетом физических факторов, неучтенных в рамках данной диссертации, таких как влияние длинноволновой солнечной радиации на динамику облаков и образование осадков. Использование уравнений движения сжимаемого газа или применение неупругого приближения позволит обобщить разработанную модель на область глубокой облачной конвекции.

Расчеты были выполнены на параллельном кластере МГУ “Чебышев”.

Основные положения диссертации представлены в следующих публикациях:

1. А.А.Игнатьев. LES модель полей конвективных облаков. // Труды ГГО. 2011. Вып. 564, с. 104-125.

2. Ю.А. Довгалоук, А.А. Игнатьев. К использованию LES модели для исследования характеристик полей кучевых облаков. // Труды ГГО, 2011. Вып. 564, с. 126-146.

3. *Игнатьев А. А. ENO и WENO версии схемы Ботта для уравнения переноса // Математическое моделирование. 2008, № 10. с. 86–98.*

4. *Ignatiev, A.A., Zatevakhin, M. A., Piskunov, V.N. Large-eddy simulation of particle deposition onto rough walls. // 2010 International Aerosol Conference. Helsinki. 29 August - 3 September 2010. Abstract P3U26.*

5. *А.А. Игнатьев, М.А. Затевахин. Параллельный метод для решения уравнения Пуассона. Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2009): Труды международной научной конференции (Нижний Новгород, 30 марта - 3 апреля 2009 г.). - Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2009. стр. 491-495.*

6. *М.А. Затевахин, А.А. Игнатьев, Р. Рамаросон. Влияние турбулентного перемешивания на коагуляцию аэрозольных частиц: расчет с использованием метода моделирования крупных вихрей.// V Международная Конференция "Естественные и антропогенные аэрозоли". С.Петербург, 22-26 мая 2006 г. Сборник трудов. С.Петербург. 2008. с. 30-41.*

7. *M.A. Zatevakhin, A.A. Ignatyev and R. Ramaroson. Effect of turbulent mixing on aerosol particles coagulation: numerical study using Large-Eddy Simulation. European Aerosol Conference 2008, Thessaloniki, Abstract TO5A038P. 2008.*