

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ
И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.510

О.А. Дубровская¹, В.В. Иванов², А.А. Леженин³, В.М. Мальбахов³,
С.И. Миськив², А.И. Сухинин⁴

**Исследование взаимосвязей структуры облачности
и распределений метеоэлементов с использованием
спутниковых изображений**

¹Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск

²Всероссийский научно-исследовательский институт по делам ГО и ЧС МЧС России, г. Красноярск

³Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск

⁴Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, г. Красноярск

Поступила в редакцию 15.01.2007 г.

Рассмотрены возможности создания информационно-аналитической системы идентификации облаков и облачных скоплений для анализа погодных условий в нижней и средней тропосфере. Предлагается комбинированный подход, состоящий из численного моделирования облачных ансамблей и получения эталонов для сопоставления с реальным распределением облаков.

Введение

Визуальные наблюдения, спутниковые и самолетные фотографии показывают, что поля облачности, как правило, имеют квазиупорядоченную структуру. Иногда кучевые облака объединяются в неправильные шестиугольники, именуемые облачными сотами. Чаще всего конвективные облака выстраиваются в шеренги длиной несколько километров, образуя облачные валы и облачные дорожки. В циклонах облака формируют спиральные структуры протяженностью сотни километров. Движение воздуха направлено вдоль этих спиралей, а скорость ветра пропорциональна их кривизне.

Соты, валы и дорожки возникают не только в атмосферах Земли и других планет, но и при конвекции в движущейся вязкой жидкости, расположенной в полости между двумя плоскими горизонтальными пластинами с разной температурой. Их средний размер составляет несколько сантиметров. Это детально исследованная конвекция Рэлея–Бенара [1]. Одинаковая форма конвективных структур обусловлена схожим механизмом их возникновения, а различные масштабы связаны с турбулентным характером движений в атмосфере и ламинарным — в вязкой среде. В работах [2–4] экспериментальные и теоретические результаты, полученные для конвекции Рэлея–Бенара, использованы при объяснении особенностей структуры атмосферного конвективного пограничного слоя. Наличие сдвига в вертикальном профиле скорости ветра нарушает колмогоровский каскад спектра конвективных пульсаций. При исследовании конвекции в потоке со сдвигом ветра показано, что часть энергии среднего потока и часть энергии

спектра конвективных пульсаций перекачиваются в двумерную турбулентность, характеризующуюся обратным каскадом энергии в сторону длинных волн [3, 4]. Именно этот механизм приводит к образованию облачных сот, валов и дорожек (рис. 1).

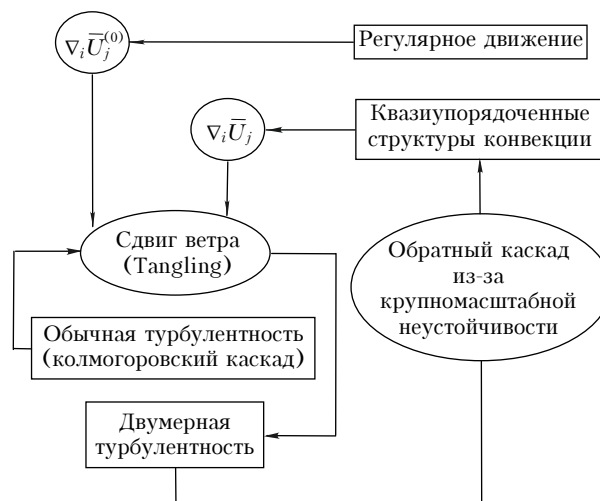


Рис. 1. Схема энергетического каскада для конвекции в потоке с вертикальным сдвигом скорости фоновых ветров [4]

В атмосфере, как и в вязкой жидкости, каждому набору внешних параметров соответствует определенный тип конвекции. При этом в лабораторном эксперименте эти параметры задаются, а в атмосфере условия, при которых реализуется конвекция, определяются природными факторами. Информацию о характере атмосферной конвекции в реальных условиях дают

визуальные наблюдения, спутниковые и самолетные снимки облачности.

Статья посвящена разработке методики восстановления параметров конвективного пограничного слоя в атмосфере, покрытой кучевыми облаками. Для этих целей информация спутниковых снимков облачности сравнивается с теоретическими результатами, полученными в [5]. Качественная оценка поля ветра, соответствующего реальным условиям, осуществляется по дымовым шлейфам лесных пожаров, видимых на фотографиях. Величины потоков тепла и влаги оцениваются по интенсивности облачной конвекции. Основная цель исследований — изучение возможностей создания информационно-аналитической системы идентификации облаков и облачных скоплений для анализа погодных условий в нижней и средней тропосфере. Подобный подход используется синоптиками при составлении краткосрочных прогнозов погоды и сверхкраткосрочных прогнозов опасных гидрометеорологических явлений. Информация об облачности, полученная со спутников, служит своеобразной синоптической картой региона.

Упрощенная модель мезомасштабных ансамблей конвективных ячеек

Механизм образования упорядоченных структур полей облачности исследовался в [5]. Остановимся на основных предположениях, положенных в основу этой модели. Будем считать, что в покоящейся атмосфере каждое облако имеет цилиндрическую форму с восходящим потоком W_+ в центре и компенсационным нисходящим движением W_- на периферии ячейки.

Такое идеализированное облако в неподвижной атмосфере представлено на рис. 2, а, б.

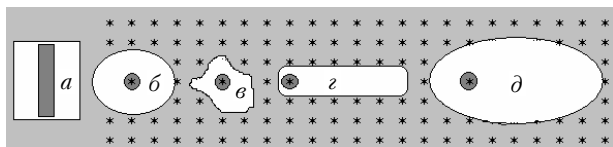


Рис. 2. Схема строения и взаимодействия конвективных ячеек: а, б — в покоящейся атмосфере; в — в «турбулизированной» атмосфере; г — в атмосфере с вертикальным сдвигом основного потока; д — в экмановском пограничном слое; а — вид сбоку; б–д — вид сверху

Более темным цветом выделена область восходящих движений. Область компенсационного опускания воздуха обозначена белым цветом. Вертикальный размер облака пропорционален конвективному потоку тепла и влаги. Нисходящие движения подавляют развитие конвекции в межоблачном пространстве. Одинаковые ячейки инициируют одинаковый нисходящий поток. Действие этого потока может распространяться не более чем на 8 соседних ячеек (сюда включены и 4 ближайших конвективные ячейки, расположенные слева и справа по двум главным диагоналям от материнской ячейки).

Зададим сценарий эволюции конвективного ансамбля. Следуя [5], будем считать, что в начальный

момент времени на нижнем уровне $z = 0$ в узлах регулярной сетки с $\Delta x = \Delta y = \text{const}$ под влиянием постоянного потока тепла и влаги начинается рост статистически значимого числа конвективных ячеек. На рис. 2 они обозначены звездочками на светло-сером фоне. Скорость роста всех конвективных ячеек подбирается таким образом, чтобы за время $\Delta t = \text{const}$ каждая ячейка увеличила свой размер на $\Delta z = \text{const}$. С ростом ячейки увеличивается ширина области нисходящих движений. Как только в эту область попадает одна или несколько соседних ячеек, то продолжает развиваться та из ячеек, которая имеет большие размеры, а остальные исчезают. Соседними в этом случае оказываются ближние из оставшихся ячеек, и процесс эволюции ансамбля может продолжаться.

Для того чтобы не было одинаковых ячеек, в каждый узел сетки, через интервал, равный одному шагу по времени, датчиком случайных чисел подаются пульсации в значения восходящих (w'_+) и нисходящих движений (w'_-). Предполагается, что амплитуда этих пульсаций пропорциональна степени турбулизации конвективного слоя. Каждая из ячеек неустойчива, она разрушается под действием внешних возмущений. В модели [5] чем больше ячейка, тем больше вероятность ее разрушения (исчезновения). Разрушаются ячейки под влиянием w'_- . Если эти значения намного меньше, чем значения W_+ и W_- , то реализуется конвективный ансамбль, в котором ячейки расположены на одинаковом расстоянии друг от друга. Это расстояние тем больше, чем шире область нисходящих движений. Если значения w'_- сравнимы со значениями W_+ и W_- (этому случаю соответствует рис. 2, в), то реализуется ансамбль с хаотическим расположением конвективных ячеек.

Наблюдения показывают, что облака имеют наклон в направлении сдвига фонового ветра и, как правило, около этой стороны облака формируется нисходящий поток W_- . Влияние постоянного по высоте вертикального градиента фонового потока, характерного для термического ветра, моделируется заданием W_- (рис. 2, г). Этому случаю соответствует конвективный ансамбль с сотовой структурой расположения облачных ячеек. Конвекция в экмановском пограничном слое моделируется заданием деформационного поля с максимумом в направлении геострофического ветра (рис. 2, д). В этом случае конвективные ячейки выстраиваются в дорожки, идущие вдоль этого направления. Похожие выводы о структуре облачности теоретически получены в [4], где результаты теории подкреплены лабораторным экспериментом.

Результаты расчетов по модели [5] и данные космических снимков приведены на рис. 3–5.

Спутниковая информация получена отделом приема и обработки космической информации ВНИИ ГОЧС г. Красноярск со спутников NOAA и TERRA. Реальным облакам на всех снимках соответствуют белые пятна на более темном фоне, изображающем подстилающую поверхность. О скорости и направлении ветра можно судить по дымовым шлейфам от лесных пожаров, видимым на всех фотографиях.

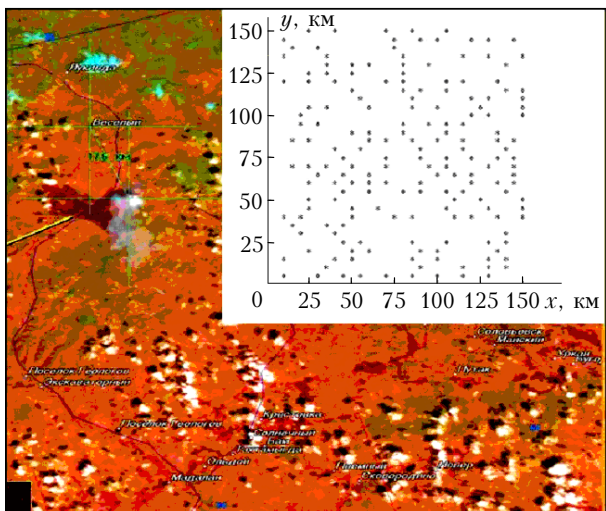


Рис. 3. Сравнение теории с наблюдениями. Облака хорошей погоды

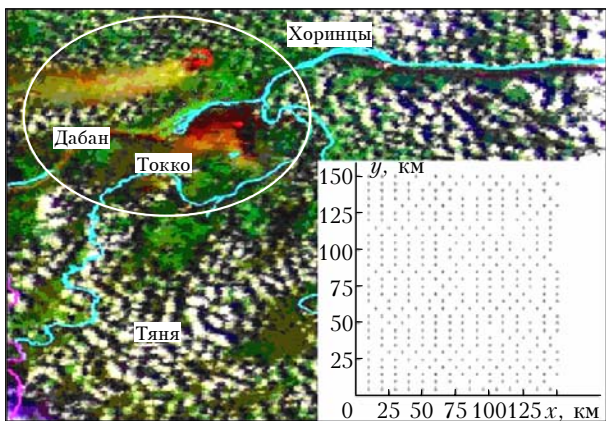


Рис. 4. Сравнение теории с наблюдениями. Облачные соты

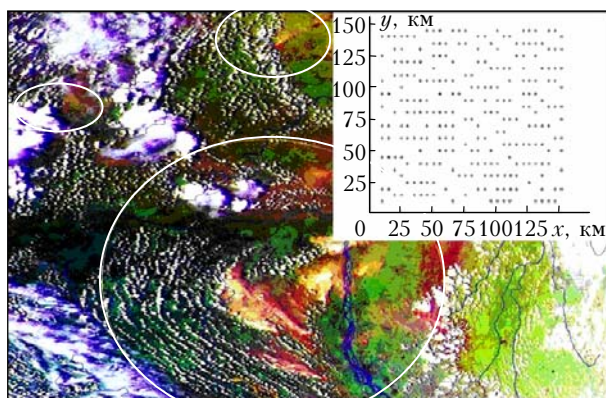


Рис. 5. Сравнение теории с наблюдениями. Облачные дорожки

Чем шире и короче шлейф, тем слабее ветер. Размеры и высоту облаков можно оценить по изображениям их теней (см. рис. 3). Результаты расчетов по модели [5] помещены на врезках. Звездочками обозначены конвективные ячейки. Слабому ветру и слабой конвекции соответствует ансамбль с ячейками, расположенными в шахматном порядке (звездочки на сером фоне на рис. 2). При сильной турбулентности

атмосферы, что соответствует сценарию, изображенному на рис. 2, в, ячейки расположены хаотически (см. рис. 3). Оба случая реализуются в природе. Это так называемые облака хорошей погоды (*Cum hum*, *Cum med*), наблюдаемые летом в утренние часы, когда нет сильного ветра.

По мере нагрева подстилающей поверхности интенсивность конвекции нарастает, увеличиваются количество и размеры облаков. Иногда в середине дня или в его второй половине облака образуют упорядоченные структуры, имеющие форму сот. Этому случаю соответствует сценарий рис. 2, г и рис. 4.

Заметим, что сотовая структура облачности более типична для циклональных условий, в которых часто наблюдается термический ветер.

Если облачный ансамбль начинает формироваться в условиях ветреной погоды, типичной для циклональных условий, то облака группируются в направлении вектора скорости. Этому случаю соответствует сценарий рис. 2, д и рис. 5.

О большой скорости ветра можно судить по узкому и длинному дымовому шлейфу от лесных пожаров. На снимках облачности, соответствующей циклональной циркуляции, часто видны два типа облачных кластеров. В средней тропосфере четко прослеживаются крупные облачные спиралевидные структуры, позволяющие оценить скорость и направление ветра в этом слое. Под ними, в экмановском слое, часто видны облачные дорожки, позволяющие судить о скорости и направлении ветра, потоках тепла и влаги на нижних уровнях. Такая ситуация изображена на рис. 5. В левом нижнем углу видна незначительная часть крупной облачной спиралевидной структуры. Под ней четко прослеживается несколько облачных дорожек. Ориентация дорожек и этой структуры не везде совпадает, особенно в левой части рисунка. Это признак того, что направление ветра на разных высотах может быть различным, и это различие можно оценить при анализе спутниковых фотографий.

На верхней части рис. 5 эллипсом обозначена область, внутри которой прослеживаются облачные соты. Их наличие указывает на термический ветер в этой области. Анализ дымовых шлейфов от лесных пожаров показывает, что в центре области ветер меняет направление с юго-западного на южное. Этот сектор очерчен большим эллипсом. Те же изменения происходят с ориентацией облачных дорожек.

Таким образом, в плоскопараллельном потоке со сдвигом и вращением ветра с высотой возможно возникновение мезомасштабных квазиупорядоченных облачных кластеров. Другой тип облачных структур больших масштабов связан с особенностями атмосферных циклонов.

Облачная конвекция в атмосферных циклонах

При сравнении результатов расчетов с реальными данными в случае циклонической циркуляции была использована программа приема изображений облачности с космических аппаратов NOAA

в формате Analog Picture Transmission (APT) с последующей тематической обработкой. Этот программный продукт позволяет восстанавливать фактические и прогностические значения некоторых метеорологических величин по яркостным характеристикам облачного покрова. К этим параметрам относятся температура и высота верхней границы облачности, скорость и направление ветра на разных изобарических высотах, количество осадков, а также вид облачности и возможные метеорологические явления, связанные с этой облачностью. Метод восстановления поля ветра применяется для облачных кластеров, имеющих вихревую структуру. При этом использовались результаты работы [6], где определена статистическая связь между полями облачности и воздушными течениями (рис. 6).

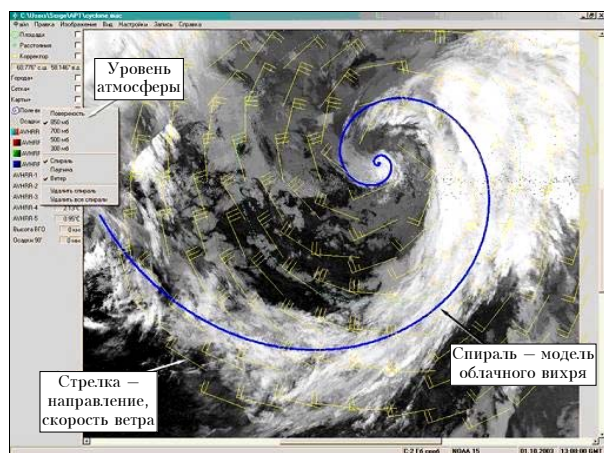


Рис. 6. Восстановление поля ветра по полю облачности вихревой структуры

Синоптические вихри, которые просматриваются на спутниковых изображениях, имеют размеры от 350 до 3500 км в диаметре. Положение облачных спиралей относительно сторон света может быть самым разным. Для установления статистических связей между направлением облачных полос и ветром вводится локальная система координат, начало которой совпадает с центром облачного вихря, причем при анализе облачных вихрей рассматриваются лишь те, в которых облачные полосы имеют вид эллиптических спиралей, так как повторяемость такого рода облачных вихрей оказывается наибольшей.

Принцип определения направления и скорости ветра на стандартных изобарических поверхностях заключается в следующем:

1. На исходном снимке облачности выявляется облачный вихрь с полосами облачности эллиптического вида.

2. Вводится локальная система координат с началом в центре облачного вихря, причем ось абсцисс (x) направляется параллельно асимптоте гиперболической спирали, а ось ординат (y) перпендикулярно к ней таким образом, чтобы получилась «правая система координат»

3. Пространство, занятое вихревой облачностью, делится на 8 секторов с центральным углом 45° и на 5 равных частей вдоль радиуса. За единицу расстоя-

ния принято максимальное значение вдоль оси y от центра вихря до пересечения с внешним краем облачной спирали. Таким образом, облачный вихрь оказывается разделенным на 40 частей. Для каждой части на пяти стандартных уровнях атмосферы (поверхность земли, 850, 700, 500 и 300 мбар) статистическими методами определены наиболее вероятные значения разности направления:

$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{в}} - \varphi_{\text{обл}},$$

где $\varphi_{\text{в}}$ — направление ветра; $\varphi_{\text{обл}}$ — направление облачной полосы, а также скорости ветра. Эти значения получены на большом статистическом материале.

4. По направлению расположения облачной полосы в каждой части системы координат можно определить значения направления и скорости ветра в интересующей части области.

5. Колебания значений среднеквадратического отклонения направления вектора скорости ветра, полученные по вышеизложенной методике, от рассчитанных по данным радиозондирования, невелики и находятся в пределах от 20 до 30° . Это позволяет применять метод для оценки поля ветра в системе циклонов с развитой спиралевидной облачной структурой. К тому же определение характеристик поля ветра интересно как раз в области циклонов, так как с ними связаны наиболее изменчивые скорости и направления воздушных течений.

Изображения формата APT позволяют по характеру рисунка изображения и яркости облачных элементов изучать структуру облачного покрова для классификации типа облачности. Однако для более точного определения характера атмосферных процессов, действующих на исследуемой территории, и их активности в ряде случаев необходима информация о вертикальной протяженности облаков, особенно мощных облаков вертикального развития, с которыми связано большинство опасных метеорологических явлений — гроз, шквалов, града, сильных ливневых осадков и др.

Применение данной методики позволяет по спутниковым APT-изображениям в ИК-диапазоне определять высоту верхней границы облачности (ВГО) (в километрах) путем подведения курсора в любую точку облачного покрова [7].

Метод визуализации высоты ВГО основан на зависимости высоты излучающей поверхности от значения радиояростной температуры, получаемой со спутника. Расчет такой зависимости был сделан при сравнении температуры излучающей поверхности на снимке с данными аэрологического зондирования атмосферы сетью станций Росгидромета. Проводился ряд таких сравнений для разного времени года, широты места, времени суток. В результате выведена эмпирическая зависимость высоты ВГО от значения радиояростной температуры:

$$H_{\text{вго}} = -KT_{\text{ярк}},$$

где $H_{\text{вго}}$ — высота ВГО; K — эмпирический коэффициент зависимости, меняющийся при использовании приемного модуля станции в разной местности

и в разное время года; $T_{\text{ярк}}$ — значения радиояростной температуры. Точность измерения ВГО данным методом имеет погрешность до 1 км, что близко к погрешности измерения при помощи радиолокационной станции. Наиболее достоверно высота ВГО измеряется при наличии плотной перистой облачности, мощных облаков вертикального развития или плотной облачности среднего яруса. В случае полупрозрачной, оптически неплотной облачности интерпретация ВГО затрудняется.

Основные выводы

1. Согласно теории [5] и наблюдениям облачные кластеры подразделяются на мезомасштабные и циклонические.
2. Облака хорошей погоды, облачные дорожки и облачные соты относятся к мезомасштабным структурам. Наличие на снимках *Cum hum*, *Cum med* и *Cum cong* указывает на внутримассовый характер конвекции при слабом ветре.
3. Облачные дорожки на снимках показывают, что в экмановском пограничном слое присутствуют сильный ветер и значительные запасы тепла и влаги.
4. Облачные дорожки являются основным элементом циклонической циркуляции.
5. Другим основным элементом циклонов являются облачные вихревые структуры, имеющие размеры в несколько сот километров и расположенные во втором конвективном ярусе.
6. Форма и ориентация облачных дорожек и облачных спиралей позволяют оценить силу и направление ветра в нижней и средней тропосфере.

7. Наличие облачных сот указывает на термический ветер в этой области.

Выявленные закономерности послужат основой при разработке информационно-аналитического программного комплекса, предназначенного для использования космической информации в задаче диагностики метеорологических параметров в нижней и средней тропосфере. Для этих целей необходима более детальная проработка вопроса о связи ориентации облачных сот с силой и направлением термического ветра.

1. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972. 392 с.
2. Вельтищев Н.Ф., Геохлаян Т.Х. Ячейковая конвекция: лабораторные измерения и наблюдения в атмосфере // Тр. Гидрометцентра СССР. 1974. Вып. 132. С. 71–87.
3. Elperin T., Kleerorin N., Rogachevskii I., Zilitinkevich S. Formation of large-scale semi-organized structures in turbulent convection // Phys. Rev. E. 2002. V. 66. 066305 15 p.
4. Elperin T., Kleerorin N., Rogachevskii I., Zilitinkevich S. Tangling turbulence and semi-organised structure in convective boundary layers // Boundary-Layer Meteorol. 2006. V. 119. P. 449–472.
5. Мальбахов В.М. Упрощенная модель квазипорядоченных ансамблей конвективных ячеек // Метеорол. и гидрол. 1997. № 11. С. 33–40.
6. Герман М.А. Космические методы исследования в метеорологии. Л.: Гидрометеонздат, 1985. 286 с.
7. Болдырев Г.А. и др. Некоторые результаты определения верхней границы облаков по спутниковым измерениям инфракрасной радиации // Тр. ГМЦ СССР. 1971. Вып. 1973.

O.A. Dubrovskaya, V.V. Ivanov, A.A. Lezhenin, V.M. Mal'bakhov, S.I. Mis'kiv, A.I. Sukhinin.
Space image study of interlinks between the cloudiness structure and the distribution of meteorological elements in low and middle stratospheres.

Possibilities of constructing of information-analytical system for identification of clouds and cloud ensembles, aiming at analysis of weather conditions in low and middle stratospheres, are considered. A combined approach is proposed, including the numerical simulation of cloud ensembles and obtaining standards for comparison with actual cloud distribution.