

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"
(РГГМУ)

На правах рукописи

Войнов Никита Евгеньевич

**МЕТОДЫ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ МНОГОЗОНАЛЬНЫХ
СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ В ЗАДАЧАХ АНАЛИЗА
МЕЗОМАСШТАБНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ АТМОСФЕРНЫХ
ДВИЖЕНИЙ**

25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Санкт-Петербург
2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Российский Государственный гидрометеорологический университет».

Научный руководитель	–	доктор физ.-мат. наук, профессор А.Д. Кузнецов
Научный консультант	–	кандидат физ.-мат. наук, доцент Т.Е. Симакина
Официальные оппоненты	–	доктор физ.-мат. наук, профессор Л.С. Ивлев, кандидат физ.-мат. наук, доцент В.Д. Еникеева
Ведущая организация	–	Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена

Защита состоится « » декабря 2013 г. в 15³⁰ на заседании диссертационного совета Д212.197.01 при Российском Государственном гидрометеорологическом университете.

Адрес: 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского Государственного гидрометеорологического университета.

Автореферат разослан « » ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.197.01,
кандидат физ.-мат. наук

Кашлева Л.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Совершенствование аппаратурно-технической базы средств наблюдения за атмосферой Земли и происходящими в ней процессами с помощью метеорологических спутников Земли (МСЗ) требуют адекватного совершенствования методов и алгоритмов извлечения метеорологической информации из данных таких наблюдений. Без такого «взаимодействия» средств наблюдения и методов их обработки значительная часть получаемой из космоса информации останется не использованной, что уже неоднократно происходило в прошлом. Поэтому разработка методов автоматизированной обработки спутниковых изображений, базирующихся на вычислительной математике и учитывающих большую размерность исходных данных, становится особенно актуальной в настоящее время, когда наблюдается значительный рост метеорологической информации, поставляемой развернутой в космосе группировкой МСЗ.

Спутниковое дистанционное зондирование играет решающую роль в исследовании мезомасштабных конвективных систем, которые из-за редкой сети стандартных метеорологических наблюдений, особенно над морями, быстрого формирования, небольших размеров и короткого жизненного цикла обычно не выявляются в поле давления и наносятся на приземные синоптические карты по спутниковым данным. Оперативная идентификация таких систем, а также определение стадии их «жизненного» цикла позволяет осуществлять диагноз и сверхкраткосрочный прогноз.

Предмет исследования

Предметом исследования данной работы являются спутниковые изображения в различных спектральных диапазонах, содержащие мезомасштабные конвективные системы, включающие спектр форм и масштабов систем глубокой и мелкой конвекции от линий шквалов, мезомасштабных конвективных комплексов до систем конвективных ячеек открытого и закрытого типов.

Цель исследования

Целью настоящей работы являются:

- разработка и исследование методов и алгоритмов решения задач комплексования спектральных диапазонов дистанционного зондирования для автоматической идентификации изображенных объектов на спутниковых снимках и определения характеристик состояния атмосферы;
- разработка метода идентификации облачности и стадий развития конвективной облачности на основе синтезирования снимков с помощью различных колориметрических моделей;
- исследование возможностей текстурного и фрактального анализа облачности по спутниковым снимкам.

Для достижения поставленной цели автором:

1. Рассмотрены спутниковые средства мониторинга мезомасштабных конвективных систем.
2. Рассмотрены мезомасштабные конвективные системы и их классификация.
3. Исследованы информативность различных спектральных диапазонов современной многозональной спутниковой аппаратуры и методы колориметрических преобразований спутниковых изображений.
4. Разработана методика расчета текстурной сложности области, занятой разномасштабными облачными системами, на основе вычисления ее фрактальной размерности.
5. Предложен метод описания текстуры облачности на основе фрактального подхода.

Методы исследования

Для решения задач анализа иерархии мезопроцессов используется вейвлет-анализ; для решения задач комплексирования спектральных диапазонов зондирования используется преобразование в колориметрических моделях. Для оценки текстурной сложности области, занятой мезомасштабными облачными системами, используются текстурный и фрактальный анализы.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложено использование метода вейвлет-разложения спутниковых изображений для анализа конвективных движений различных масштабов при соответствующих разрешениях.
2. Впервые разработана методика расчета текстурной сложности области, занятой разномасштабными облачными системами, на основе вычисления ее фрактальной размерности.
3. Выявлены особенности фрактальных свойств различных видов систем мелкой конвекции (облачные ячейки открытого и закрытого типа, облачные ряды).

Научная и практическая значимость работы состоит в том, что технологии и алгоритмы вейвлет-анализа, текстурного и фрактального анализа, предложенные в диссертации, а также результаты исследования фрактальных характеристик изображений облаков позволяют решить проблему параметризации различных типов облачных образований. Это, в свою очередь, позволяет их более адекватное представление в численных моделях облачного покрова, общей циркуляции атмосферы и др. Методы синтеза многозональных снимков на основе колориметрических преобразований позволяют определить стадию жизненного цикла конвективной системы, что может быть использовано в сверхкраткосрочном прогнозе и nowcasting.

Обоснованность и достоверность полученных в диссертационной работе результатов обусловлена аргументированностью исходных положений, кор-

ректным использованием математического аппарата и апробированием в проведенных ранее исследованиях пакетов прикладных программ и подтверждается согласованностью полученных результатов и выводов с фундаментальными теоретическими положениями и с результатами других авторов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика расчета текстурной сложности области, занятой разномасштабными облачными системами, на основе вычисления ее фрактальной размерности.

2. Методика выделения различных видов систем мелкой конвекции (облачные ячейки открытого и закрытого типа, облачные гряды) на основе анализа различия их фрактальных свойств.

Апробация результатов

Основные результаты работы докладывались на Итоговой сессии Ученого совета РГГМУ (Санкт-Петербург, январь 2013 г.), на научных семинарах кафедры экспериментальной физики атмосферы РГГМУ (2013 г.).

Основные результаты диссертации опубликованы в двух печатных работах, в том числе две – в издании, рекомендованном ВАК.

Структура и объем

Материал диссертации состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы. Текст содержит 154 страницы, включая 76 рисунков, 20 таблиц. Список использованных источников содержит 101 наименование.

Содержание диссертационной работы

Во введении обосновывается актуальность темы, кратко освещается современное состояние проблемы, определяются задачи и цель работы, описывается структура диссертации и формулируются общие подходы к решению поставленных задач.

Первая глава содержит информацию как об объекте исследования – атмосферных мезоконвективных процессах, – так и о спутниковых средствах мониторинга этих процессов.

Раздел 1.1 посвящен обзору современных оперативных космических аппаратов, данные которых могут использоваться в анализе и прогнозе мезомасштабных конвективных систем. Всемирная группировка оперативных спутниковых средств, ведущих съемку земной поверхности, разделена на несколько групп в зависимости от выполняемых задач. Несмотря на некоторую условность деления, связанную с тем, что на борту одного спутника зачастую устанавливается несколько видов съемочных систем различного назначения, оно позволяет проследить основные отличия и особенности получаемой информации. Различие пространственно-временных масштабов исследуемых ме-

законвективных процессов требует соответствующего диапазона пространственного и временного разрешения спутниковых данных.

Раздел 1.2 посвящен обзору атмосферных мезоконвективных процессов, горизонтальный масштаб которых находится в интервале 1 – 1000 км, а временной – от десятков минут до десятков часов. К этим процессам относятся линии шквалов, мезоциклоны, мезомасштабные конвективные комплексы (МКК), поля конвективных ячеек, скопления кучево-дождевых облаков. Часть этих явлений (линии шквалов, мезоциклоны, МКК) представляют серьезную опасность для хозяйственной инфраструктуры и нередко вызывают человеческие жертвы.

Данный раздел содержит обзор существующих классификаций мезомасштабных конвективных систем, выявлены ограничения таких классификаций. Составлена классификация систем мелкой конвекции по аналогии с наиболее популярной и удобной как с генетической, так и с морфологической точки зрения классификацией систем глубокой конвекции Мэддокса. Однако отмечается, что основное внимание в существующих классификациях обращается на горизонтальные размеры и морфологическое описание рассматриваемых процессов. Для целей же сверхкраткосрочного прогноза и nowcasting необходимым условием является также информация о времени полного цикла "жизни" объекта и о стадии цикла, на которой данный объект в конкретный момент находится. Разработка методов идентификации стадии развития мезоконвективной системы в режиме реального времени является важной задачей.

Раздел 1.3.1 посвящен системам мелкой конвекции, развивающимся в небольшом неустойчиво стратифицированном горизонтальном слое атмосферы, в пределах которого можно пренебречь изменением плотности воздуха с высотой. Типичными структурами воздушных течений в режиме мелкой конвекции являются открытые и закрытые конвективные ячейки, имеющие в плане квазигексагональную структуру, а также квазидвумерные облачные гряды.

Системы мелкой конвекции не отражаются на синоптических картах и редко продуцируют опасные явления, однако анализ пространственной и временной изменчивости мелкой конвекции необходим как дополнительная, а над районами, малоосвещенными данными наблюдений, как основная информация для оценки синоптической обстановки и возможных условий погоды. Тип конвективных ячеек может служить довольно надежным индикатором воздушных масс. Распространение открытых облачных ячеек позволяет следить за проникновением масс холодного воздуха, закрытых – теплого. Учет влияния конвективных ячеек позволяет локализовать появление экстремальных концентраций примеси в приземном слое. Образование крупных открытых конвективных ячеек диаметром более 30 км часто указывает на штормовой характер погоды в океане: проходят кратковременные, но интенсивные осадки, сопровождающиеся шквалистым усилением ветра. Причем форма открытых облачных ячеек связана с высотой волн в районах океана, над которыми прослеживаются облачные образования: симметричные ячейки соответствуют волнам, высота которых не превышает 4 м, ячейки неправильной (серповидной) формы указывают на значительное волнение в 5 – 6 м. С мелкими закрытыми конвективны-

ми ячейками не бывают связаны резкие усиления ветра и интенсивные осадки, однако при метеорологическом обслуживании авиации необходимо учитывать высоту нижней границы облаков, составляющих закрытые ячейки, которая зачастую не превышает 200 м.

Раздел 1.3.2 содержит результаты исследования мезомасштабных конвективных комплексов над территорией Европы, проведенного в рамках настоящей работы по данным 2008 – 2011 гг. геостационарного спутника Meteosat-8 – рис.1. МКК определялись по признакам Мэддокса. В данном разделе отмечено, что с точки зрения сверхкраткосрочного прогноза и nowcasting идентификация МКК по признакам Мэддокса лишена смысла, поскольку необходимое условие сохранения геометрических размеров в течение 6 часов, входящее в перечень идентифицируемых признаков, означает, что от момента появления МКК до его окончательной идентификации проходит столько времени, что большая часть опасных явлений к этому моменту уже произошла. Другим признаком является наличие округлой области перистых облаков определенного размера, однако такая область зачастую маскирует различные по форме скопления кучево-дождевой облачности, в том числе и мезомасштабные линии шквалов.

Для всех идентифицированных МКК измерялось время их существования в поле облачности, а также направление перемещения путем построения вектора, проведенного между центрами тяжести облачного массива МКК в стадиях зарождения и диссипации, нанесенного на физическую карту Европы масштаба 1:250000.

В результате обработки спутниковой информации было установлено, что в среднем за летний период на территории Европы образуется около 20 мезомасштабных конвективных комплексов. В отличие от территории Северной Америки, где наибольшая повторяемость и интенсивность возникновения МКК наблюдается в весенние месяцы, над Европой в переходные сезоны были зафиксированы лишь единичные случаи возникновения МКК: в апреле, мае и сентябре – рис.1(а). Связаны они с очень активными атмосферными фронтами. Регулярное формирование МКК на территории Европы начинается с десятых чисел июня и отмечается практически до конца августа, пик приходится на июль. В холодное полугодие над территорией Европы мезомасштабные конвективные комплексы не формируются.

Возникновение МКК наблюдалось во второй половине дня, к вечеру достигая стадии максимального развития. В ночные часы, как правило, происходило размытие облачной системы МКК.

По результатам исследования наиболее часто МКК образуются в центральной и восточной Европе, причем большинство из них (около 80% случаев) формируется под воздействием орографии, т.е. в районе Кавказского хребта, Карпат и Альпийских гор – рис. 1(б). Над поверхностью моря случаев возникновения МКК не зафиксировано. Также можно отметить отсутствие случаев МКК на широтах выше 60°с.ш.

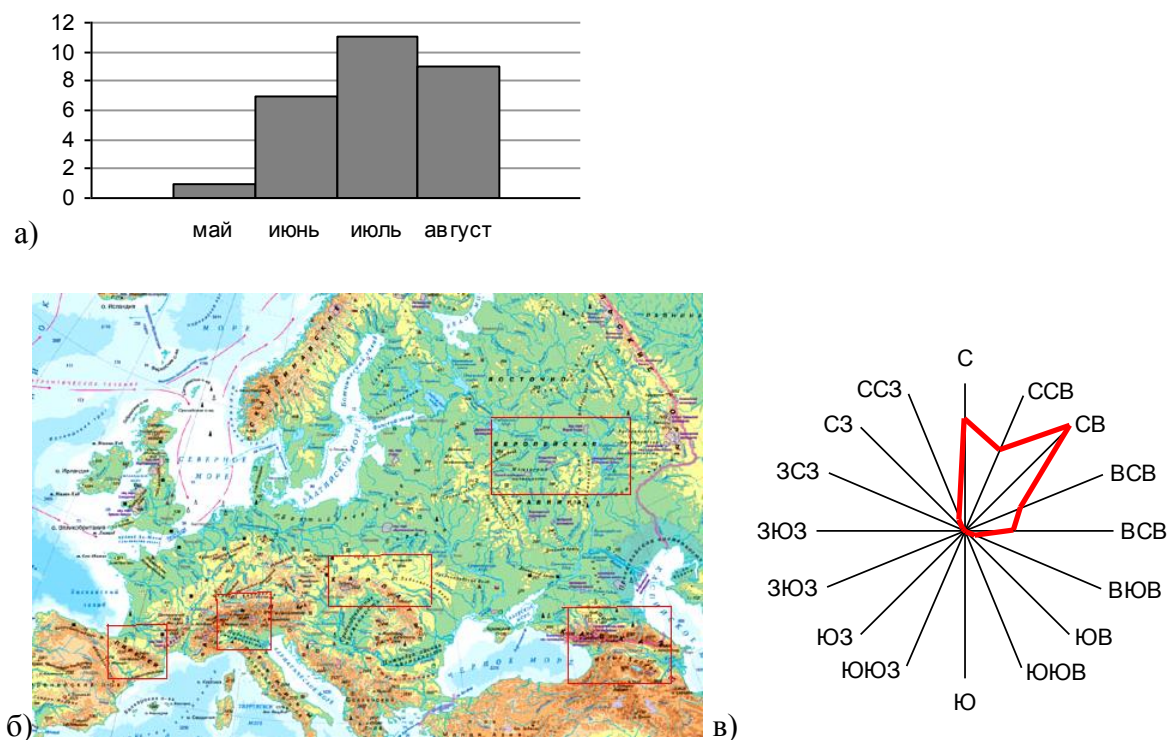


Рис. 1. Результаты исследования МКК над территорией Европы: а) гистограмма случаев возникновения МКК; б) районы наибольшей повторяемости МКК; в) диаграмма направлений смещения МКК

Большинство МКК смещается согласно ведущему потоку, господствующему над Европой в теплый период года, а именно в северо-восточном и северном направлении – рис. 1(в).

Характерным отличием является длительность жизненного цикла мезомасштабных конвективных комплексов, которая над США составляет 15 – 16 часов, в то время как над Европой облачная система, связанная с МКК, наблюдается почти вдвое меньше по времени – около 8 – 9 часов.

Вторая глава посвящена цветовому анализу развития конвекции на основе синтеза спектральных каналов и их разностей в различных колориметрических моделях.

Высота верхней границы облачности, ее фазовый состав, направление и интенсивность вертикальных токов и другие факторы влияют на интенсивность излучения и отражение радиации, что в свою очередь формирует яркость пикселей многозонального спутникового снимка. Сравнение яркостей объектов и их разностей в различных каналах дает возможность получить несоизмеримо большую информацию о процессах конвективного облакообразования, о стадии жизни отдельных ячеек конвективной системы, чем анализ одиночных снимков. Так, синтез трех изображений в одно, осуществляемый в рамках той или иной колориметрической модели, позволяет получить мультипликативный эффект. Для 12-тиканального сканера SEVIRI объединение по три исходных снимка в модели *RGB* дает $12 \times 11 \times 10 = 1320$ комбинаций. Количество комбинаций возрастает, если использовать разности каналов, которые, как уже упоминалось, несут большую информацию.

В разделе 2.1 приведен обзор современной многоспектральной аппаратуры космических аппаратов и дан анализ информативности спектральных диапазонов, в которых ведется съемка средствами современного спутникового дистанционного зондирования. Анализируя характеристики нескольких десятков спутников ДЗЗ, запущенных за последние годы, можно отметить единообразный подход к выбору количества базовых спектральных каналов: три – в видимой области, минимум один – в ближней инфракрасной (ИК) и минимум два канала – в дальней ИК-области. Причем длины волн этих каналов практически совпадают с некоторой точностью деления $\Delta\lambda$, которая в разных системах не превышает 10%.

С точки зрения изучения микрофизики облаков современные сканеры содержат каналы во всех важных зонах спектра: видимом, чувствительном к оптической толщине облачного слоя, ближне- и среднеинфракрасном – к фазе и размеру облачных частиц, дальнем ИК – к температуре и высоте верхней границы.

Обзор каналов, используемых для идентификации мезоконвективных облачных образований, дан на примере радиометра SEVIRI европейского геостационарного спутника MSG.

Анализ характеристик рассматриваемых каналов произведен на основе сравнения профилей яркости по сечениям многозонального снимка, пересекающим облачность различной мощности, фазового состава, температуры. Определены разности каналов, позволяющие исследовать однородность верхнего слоя облачности, производить дискриминацию перистой облачности и областей пыли, идентифицировать фазу и размер частиц, что помогает определить стадию развития конвективной ячейки.

Раздел 2.2 посвящен методу анализа совокупности полученных в результате дистанционного зондирования многоспектральных снимков – синтезу псевдоцветных изображений на основе колориметрических преобразований спутниковых снимков.

В подразделе 2.2.1 отмечается, что цветное изображение передает существенно больший объем информации об объекте съемки, чем черно-белое, что способствует более точному решению задач дешифрирования (опознавания, классификации). Методы анализа цветных изображений зависят от цветового пространства. В подразделе 2.2.2 рассмотрены основные принципы следующих цветовых моделей: RGB, XYZ, Lab, HSB (HSL, HSV). Приводятся достоинства и недостатки рассмотренных моделей, даны формулы перехода из пространства RGB в Lab через промежуточное пространство XYZ и из RGB в HSB.

В разделе 2.3 рассмотрены возможности мониторинга конвекции с помощью композитных изображений, полученных в результате различных сочетаний каналов. Подраздел 2.3.1 содержит практические примеры проведенной в рамках настоящей работы идентификации облачности на основе синтеза снимков.

Результат идентификации объектов на композитном изображении, составленном по схеме RGB из каналов VIS 0.8, IR 3.9 и IR 10.8 мкм, представлен на рис. 2.1. Три ряда цветных прямоугольников отражают цвет верхней грани-

цы облаков, находящихся на трех уровнях по высоте. Трехстолбчатые диаграммы показывают вклад в результирующий цвет яркостей исходных снимков. Яркости в канале 0,8 мкм, чувствительном к плотности облачности и к количеству капель и ледяных кристаллов, модулирующих отражаемость солнечного излучения, управляют красным столбиком диаграммы. Присутствие среднеинфракрасного канала 3,9 мкм, управляющего зеленым столбиком, делает такую комбинацию чувствительной к размеру и фазе облачных частиц. Канал 10,8 мкм, модулируемый температурой верхней границы, управляет синим столбиком. Данная комбинация VIS 0,8; IR 3,9; IR 10,8 доступна только в дневное время из-за наличия канала VIS 0,8 мкм.

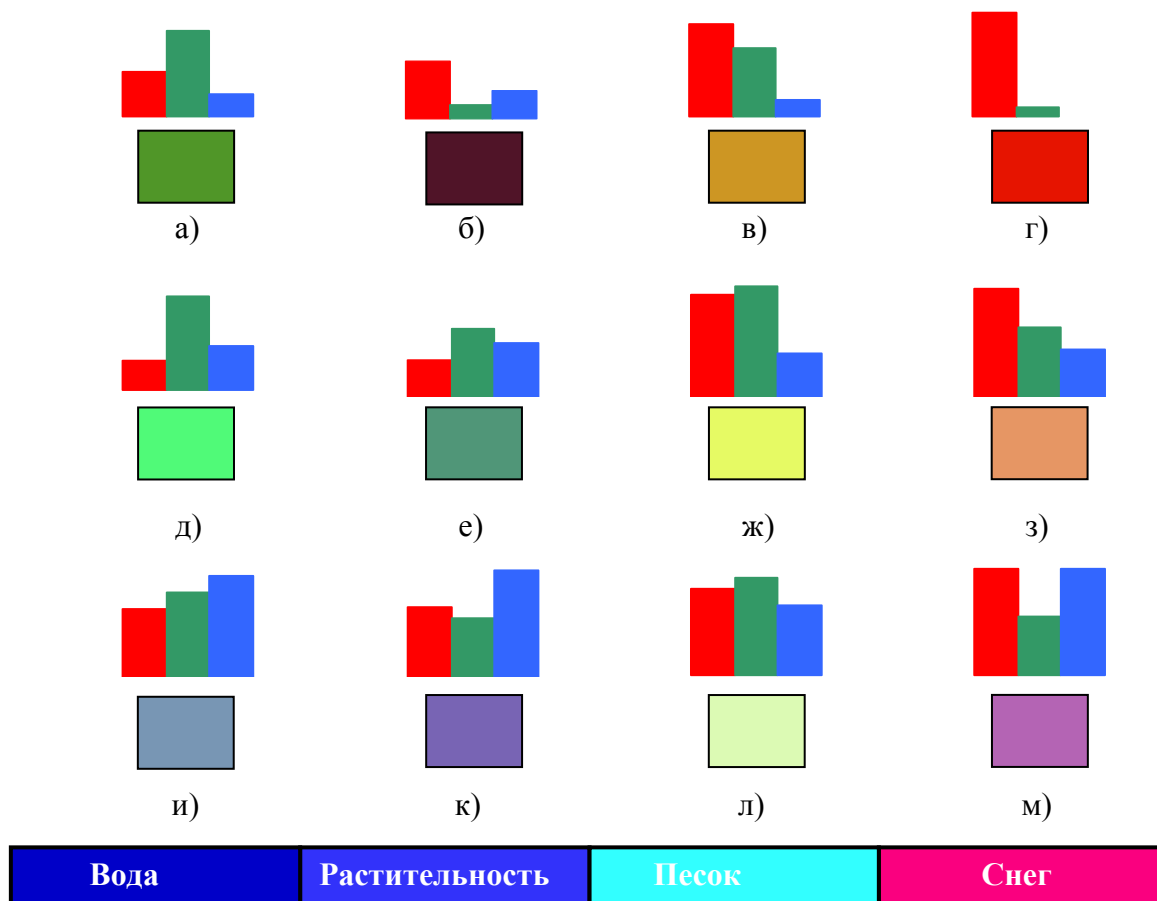


Рис. 2.1. Цвета облачности и объектов подстилающей поверхности в схеме RGB 0.8, 3.9, 10.8:

Верхний ярус: а) тонкая перистообразная мелкокристаллическая; б) тонкая перистообразная крупнокристаллическая; в) конвективная облачность с мощным вертикальным подъемом и осадками; г) конвективная облачность.

Средний ярус: д) тонкий слой с переохлажденными мелкими каплями; е) тонкий слой с переохлажденными крупными каплями; ж) мощный слой с переохлажденными мелкими каплями; з) мощный слой с переохлажденными крупными каплями.

Нижний ярус: и) тонкий слой с мелкими каплями; к) тонкий слой с крупными каплями; л) мощный слой с мелкими каплями без осадков; м) мощный слой с крупными каплями с осадками

В данном разделе приводятся различные комбинации спектральных каналов и анализ полученных ложноцветных изображений, позволяющих распознать облачность различной оптической толщины, размер и фазовое состояние

верхней границы облаков, идентифицировать области вертикальных движений в облачности.

Далее рассмотрение процесса конвекции проводится в цветовой системе *Lab*. Компоненты этой системы – Lightness, *a* и *b*, – рассчитывались по формулам подраздела 2.2.2.

Вследствие разделимости информации о цвете и яркости в системе *Lab* появляется возможность проводить анализ развития конвективной облачности в прямоугольной плоскости хроматических компонент *a* – *b*. Начало координат находится в центре в точке белого цвета. Пример анализа значений интенсивности в трех каналах *VIS* 0.8, *IR* 3.9 и *IR* 10.8 мкм (см. рис.2.1) приведен на рис. 2.2. Цвета облачности в начальной фазе развития (мелкие частицы, малая оптическая толщина слоя) и конечной (крупные частицы, большая оптическая толщина) на каждом ярусе представлены точками.

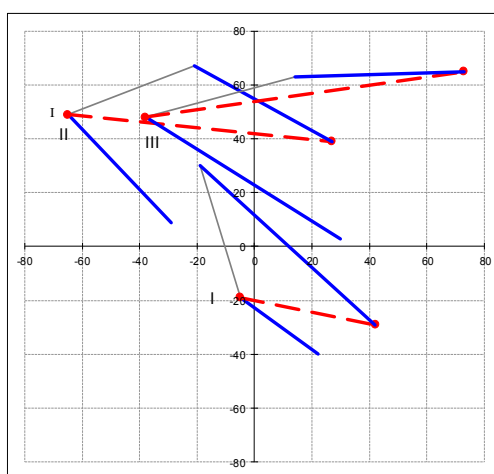


Рис. 2.2. Этапы развития облачности в координатах *a* – *b*

Римские цифры обозначают ярус верхней границы облачности. Цифры расположены у точки наименьших толщины облачного слоя и размера частиц на соответствующей высоте. Рост размера частиц на любой высоте отражается увеличением координаты *a* и уменьшением координаты *b* (синие линии на рисунке). Возрастание толщины облачного слоя без укрупнения частиц сопровождается ростом координаты *b* (серые линии). Красный пунктир указывает на одновременный рост размера частиц и толщины облачного слоя. Заметно возрастание амплитуды изменения (длина красного пунктирного отрезка) с ростом высоты верхней границы.

В подразделе 2.3.2 рассмотрены возможности мониторинга стадий развития облачных систем глубокой конвекции и отдельных облаков *Cb* по синтезированному с помощью колориметрических моделей *RGB* и *HSB* изображениям. В качестве одной из основных характеристик, позволяющих идентифицировать стадию по цвету композитного изображения, принята степень обледенения верхней границы. Составлены таблицы, отражающие эволюцию цвета верхней границы конвективной ячейки на разных стадиях развития для различных схем синтеза, рассмотренных в 2.3.1. Пример такой

таблицы для схемы, составленной из каналов *VIS* 0.6; *NIR* 1.6; *IR* 10.8, приведен далее.

Таблица 2.1

Цвета верхней границы *Cb* на разных стадиях в комбинации *VIS* 0.6; *NIR* 1.6; *IR* 10.8

Стадии	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>H</i>	<i>S</i>	<i>Br</i>	Цвет
I	255	255	200	60	22	100	
II	255	200	0	47	100	100	
III	255	100	0	24	100	100	

В этом типе отображения конвективные облака при своем развитии приобретают все более розовый цвет. Первое обледенение может быть обнаружено по небольшим областям оранжевого цвета, которые становятся всё темнее по мере увеличения размеров ледяных частиц.

В таблицах также представлены значения компонент моделей *RGB* и *HSB* каждого цвета.

Проведен анализ развития конвективной облачности в полярной плоскости компонент цветовой тон (*H*) – насыщенность (*S*), где *H* является аналогом длины волны излучения, *S* – аналогом интенсивности волны. Значения цветового тона откладывают на периферии цветового круга и характеризуют величиной угла в диапазоне от 0 до 360°. Насыщенность цвета – радиус цветового круга. Отображение цветов верхней границы *Cb* на трех стадиях развития в плоскости *H – S*, представлено на рис. 2.3.

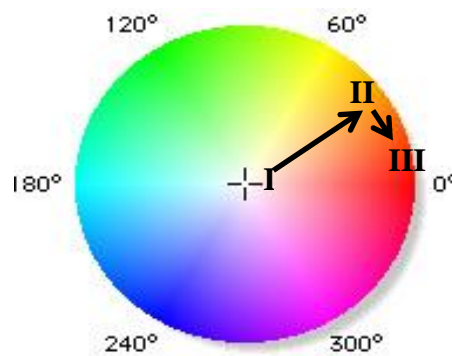


Рис. 2.3. Цветовая эволюция в плоскости тон-насыщенность в комбинации каналов *VIS* 0.6; *NIR* 1.6; *IR* 10.8

Анализ всех рассмотренных в данном параграфе диаграмм позволил сделать следующие выводы. Направление векторов, соединяющих точки I, II и III, соответствующих номерам стадий, стремится в сторону увеличения длины волны, т.е. к красному тону со значением 0°. Значение насыщенности при этом всегда возрастает, что особенно характерно для вектора, соединяющего I и II стадии. По мере развития конвекции цвет стремится к максимально чистой тоновой волне, поэтому локализация цвета на диаграмме может позволить оценить степень эволюции *Cb*, а, следовательно, косвенно и угрозу опасных явлений ими вызываемых.

Третья глава посвящена методам исследования текстуры мезоконвекции на спутниковых снимках облачности. Отмечено, что при анализе и прогнозе эволюции атмосферных процессов необходимо учитывать одновременное существование возмущений различного пространственно-временного масштаба. Геометрические размеры мезоявлений отличаются на два порядка, поэтому многие методы обработки (например, методы текстурного анализа) оказываются неприменимы к снимку, содержащему одновременно разномасштабные атмосферные конвективные явления.

В связи с этим для выделения информации при различных уровнях детализации представляется целесообразным использовать предварительное разложение исходного спутникового снимка с помощью вейвлет-преобразования. Полученная в итоге иерархия уровней отображения с различным пространственным разрешением позволит исследовать иерархическую организацию облачного пространства, выявлять правила и изучать механизмы, порождающие иерархию, выбирать масштаб для составления карт различного целевого назначения.

Раздел 3.1 содержит как теорию дискретного (быстрого) вейвлет-преобразования (БВП), так и практические примеры разложения спутникового снимка разномасштабных облачных систем.

В **подразделе 3.1.1** описана теория БВП, с помощью которой функции (изображение, поверхность) представляются как композиция грубой низкочастотной аппроксимации и уточняющих компонент (деталей).

Двумерное БВП выполняется сверткой сигнала с 4 двумерными базисными функциями, полученными путем тензорного умножения материнского вейвлета и масштабирующей функции по направлениям x и y . Таким образом, использовалась одна скейлинг-функция $\varphi(x)$ и три базисных вейвлета $\psi(x)$:

$$\begin{aligned}\varphi\psi_{k,l}^{J_n} &= 2^{J_n} \varphi\varphi(2^J x - k, 2^{J_n} y - l), \\ \varphi\psi_{k,l}^J &= 2^J \varphi\psi(2^J x - k, 2^J y - l), \\ \psi\varphi_{k,l}^J &= 2^J \psi\varphi(2^J x - k, 2^J y - l), \\ \psi\psi_{k,l}^J &= 2^J \psi(x)\psi(y)(2^J x - k, 2^J y - l),\end{aligned}$$

где k – целые числа.

Рекурсивное использование процедуры свертки происходит с уменьшением количества отсчетов в 2 раза при переходе от одного уровня («масштаба») к другому.

В **подразделе 3.1.2** отмечается, что присутствие на исходном снимке разномасштабных облачных объектов, как в примере на рис.3.1, – циклона синоптического масштаба, линии шквалов масштаба мезо- α , скопления кучево-дождевой облачности масштаба мезо- β и отдельных облаков масштаба мезо- γ , составляющих поля конвективных ячеек, – не позволяет применять ко всему изображению одну простую статистическую модель. Результат четырех уровней вейвлет-декомпозиции представлен на рис. 3.1(б). Исходное изображение

на каждом уровне раскладывается на две составляющие — сглаженную уменьшенную версию оригинала и три высокочастотных изображения. Пространственный размер пиксела изменился от 250 м на исходном снимке до 4 км на изображении четвертого уровня.

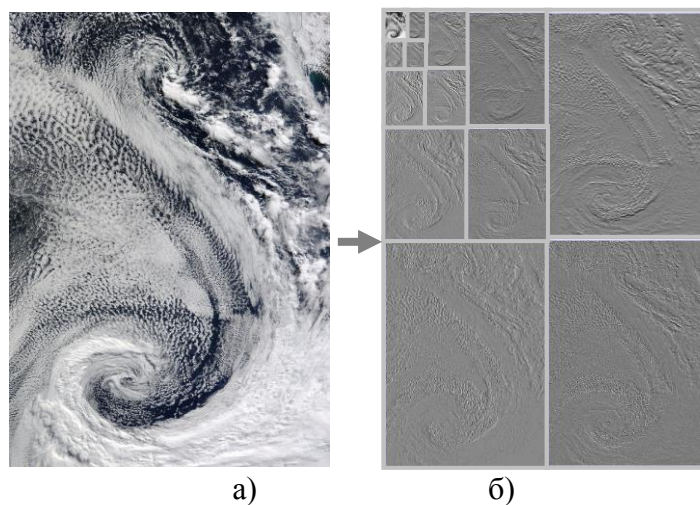


Рис.3.1. Вейвлет-преобразование спутникового снимка: а) исходный снимок видимого диапазона, MODIS/Terra, 29.04.2009, 600x860 пиксел, пространственное разрешение 250 м.; б) четыре уровня вейвлет-декомпозиции

Аппарат дискретного вейвлет-преобразования позволил получить сглаженные изображения, по которым можно исследовать большие области и точно описать низкочастотные детали при разном разрешении. Так, изображение первого уровня позволяет проводить анализ атмосферных движений масштаба мезо- γ , четвертого уровня – масштаба мезо- α . Высокочастотные изображения деталей исходного снимка на разных масштабных уровнях локализуют резкие перепады яркости, представляющие границы объектов в изображении, в горизонтальном, вертикальном и диагональном направлении. Выделение высокочастотных деталей несет дополнительную полезную информацию для проводимого анализа снимков.

Раздел 3.2 посвящен текстурному анализу снимков облачности мелкой конвекции различных типов. Тектурный подход в отличие от спектральных методов позволяет характеризовать облака как единую целостную структуру.

Для описания текстуры изображений облачности использовался статистический подход, в основе которого лежит формирование матриц пространственной смежности яркости пикселей. Матрица смежности содержит относительные частоты $p_{i,j}$ наличия на изображении соседних элементов, расположенных на расстоянии d друг от друга, с яркостями i, j . Средняя по направлениям матрица $p_{i,j} = 1/4(p_{1,0} + p_{1,45} + p_{1,90} + p_{1,135})$ использовалась для расчета некоррелированных текстурных признаков.

Контраст определяется величиной локальных вариаций яркости изображения:

$$C = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (i - j)^2 p_{i,j}.$$

Однородность является мерой гомогенности изображения:

$$U = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p_{i,j}^2.$$

Энтропия выражает неравномерность распределения яркостных свойств элементов изображения:

$$F = - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p_{i,j}^2 \log(p_{i,j}).$$

Обратный момент отражает степень разброса элементов матрицы градиентов вокруг главной диагонали:

$$M = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{p_{i,j}}{1 + (i - j)^2}.$$

Анализ гистограмм текстурных признаков, вычисленных для каждого типа систем мелкой конвекции и представленных на рис. 3.2, позволил сделать следующие выводы. Увереннее всего выделены закрытые ячейки по трем текстурным признакам: контраст, энтропия и обратный момент, причем меньшую дисперсию и наибольшее расстояние от других текстур имеет обратный момент. Для открытых ячеек и облачных гряд наиболее компактным диапазоном значений обладает текстурный признак контраст. Наименьшую делимость представленных мезоструктур показал признак однородность. Совместное использование признаков обратный момент, контраст и энтропия повысит возможность идентификации типов конвекции и позволит локализовать границу между ними. Изображения данных текстурных признаков приведены на рис. 3.3. Представив текстурные признаки в кодировке *RGB*: обратный момент красным цветом, контраст – зеленым и энтропию – синим, получим псевдоцветное текстурное изображение – рис. 3.3(г). Высокие значения обратного момента и контраста присущи открытым ячейкам, поэтому такие объекты на текстурном *RGB*-изображении будут иметь оттенки смеси двух цветов зеленого и красного, т. е. оттенки желтого цвета. Закрытые ячейки обладают высокими значениями энтропии (синий цвет), контраста (зеленый цвет) и низкими значениями обратного момента (красный цвет). Т.е. для закрытых ячеек характерным цветом будут оттенки синего и голубого цветов. Текстурное цветное изображение позволяет сегментировать различные виды мелкой конвекции и локализовать границу воздушных масс с разными свойствами.

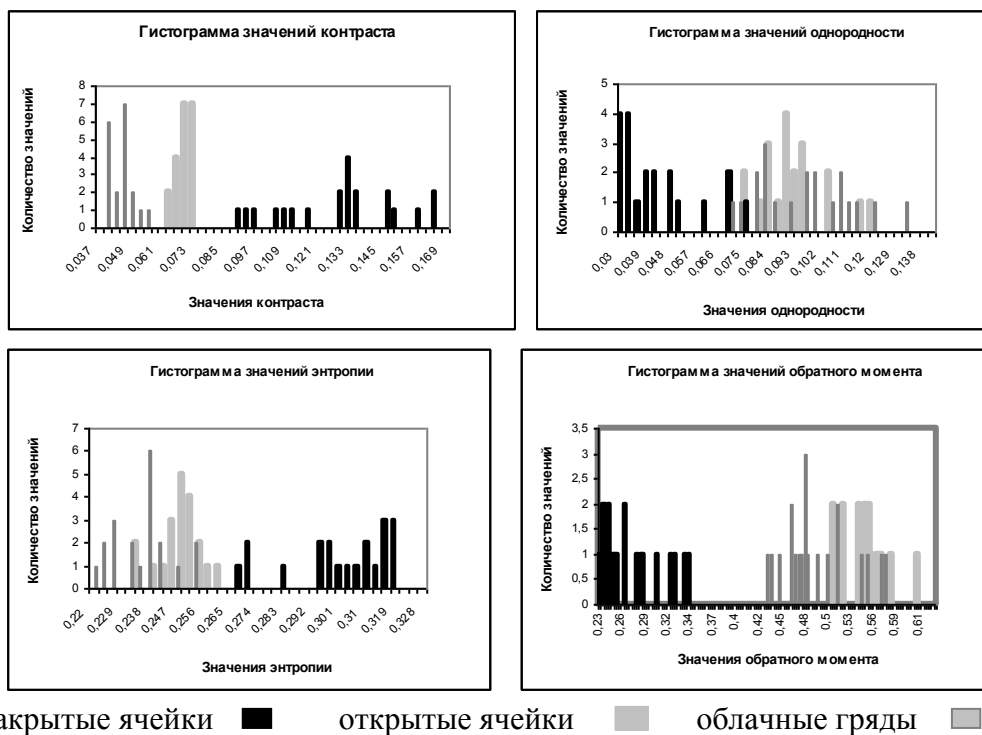


Рис. 3.2. Гистограммы текстурных признаков: контраст, энтропия, однородность и обратный момент

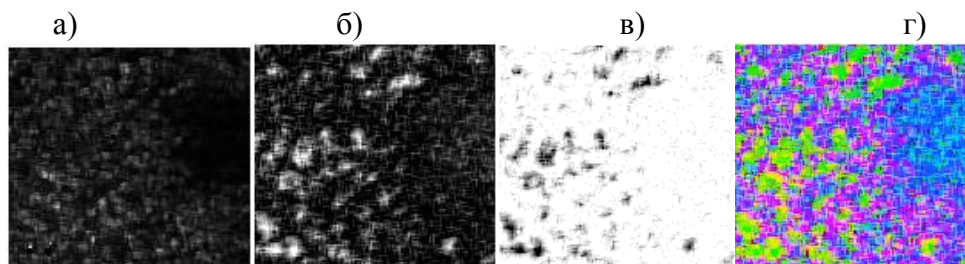


Рис.3.3. Текстурные признаки и псевдоцветное текстурное изображение: а), б) и в) обратный момент, контраст и энтропия соответственно; г) RGB – синтез текстурных признаков: обратный момент – (R), контраст – (G) и энтропия – (B)

В разделе 3.3 рассматривается разработанный алгоритм определения высоты конвективных ячеек открытого и закрытого типа с помощью текстурных признаков. Алгоритм позволяет в случае полного отсутствия инструментальных измерений в районе с однородной мелкоконвективной облачностью грубо оценить мощность слоя конвекции по спутниковому снимку. Алгоритм опирается на известную статистическую связь между горизонтальными и вертикальными размерами элементов систем мелкой конвекции и использует эмпирические соотношения для каждого типа мезоструктуры: $h = D/30$ для открытых ячеек, $h = D/21$ для закрытых ячеек, где h – высота слоя конвекции, D – диаметр ячеек.

Построены графические зависимости текстурных признаков и мощности конвективного слоя на основе анализа шестидесяти фрагментов спутниковых

снимков с разными типами мезоконвекции над Северным и Норвежским морями, полученные в зимний период. Показана сильная корреляция геометрических размеров конвективных ячеек со значениями текстурных признаков. На рис. 3.4 представлены примеры некоторых зависимостей.

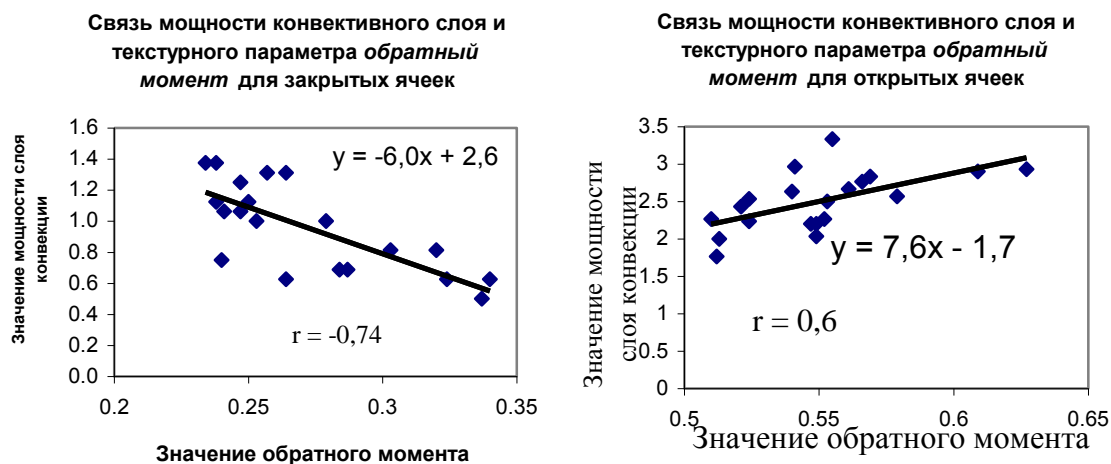


Рис. 3.4. Связь мощности конвективного слоя закрытых (слева) и открытых ячеек (справа) и текстурного признака обратный момент

Раздел 3.4 посвящен одному из перспективных направлений в цифровой обработке изображений – фрактальному методу, являющемуся дальнейшим развитием текстурного анализа.

Поверхность облачного поля представляет из себя фрактал, размерность которого находится в диапазоне от 2 до 3. Способы расчета фрактальной размерности приводятся в подразделе 3.4.1.

Алгоритм вычисления фрактальной размерности текстуры поверхности, модернизированный и используемый в данной работе, является развитием алгоритма оценки фрактальной размерности линии. Предварительно, с помощью программы ASCAN, разработанной ранее на кафедре ЭФА, РГГМУ, по ИК-изображению производится формирование массивов бинарных изображений, содержащих области облачности, охваченные различными изотермами выше температурного порога. Для каждого из таких изображений производится вычисление фрактальной размерности, среднее из полученных значений используется в качестве оценки фрактальной размерности исходного изображения.

Процедура вычисления фрактальной размерности контура бинарного изображения строится следующим образом. Для серии размеров элемента разложения (шагов) S_i производится оценка длин контуров единичной области L путем подсчета числа переходов уровней яркости бинарного изображения через ноль. Увеличение шага эквивалентно интерпретации анализируемого изображения с уменьшенным разрешением. Фрактальная размерность рассчитывается из наклона β , аппроксимированной методом наименьших квадратов линии на графике в двойном логарифмическом масштабе как $D = 3 - \beta$.

Качество “наилучшего” линейного приближения оценивается значением коэффициента корреляции логарифма длины контура и логарифма шага:

$$r_{\log L, \log S} = \frac{\text{cov}(\log L, \log S)}{\sqrt{D_{\log L} \times D_{\log S}}} = \frac{E[(\log L - M_{\log L})(\log S - M_{\log S})]}{\sqrt{D_{\log L} \times D_{\log S}}},$$

где D – дисперсия, M – математическое ожидание соответствующих случайных величин $\log L$ и $\log S$.

При низком коэффициенте корреляции полученное значение фрактальной размерности исключается из процедуры усреднения.

Фрактальная размерность представляет собой устойчивую статистическую характеристику и позволяет охарактеризовать различный вклад случайных факторов в динамику изучаемого процесса. Рост величины фрактальной размерности показывает степень стохастичности процесса и является критерием энтропии системы.

В подразделе 3.4.2 приведено свидетельство фрактального характера изображения мезомасштабной облачности, что дает возможность характеризовать исследуемую поверхность соответствующей фрактальной размерностью.

Поле фрактальных размерностей, построенное по спутниковым снимкам мезомасштабной облачности, позволяет оценить текстурную сложность района, занятого разными типами систем мелкой конвекции. Пример построения такого поля для территории рис. 3.5 представлен в градациях серого на рис. 3.16: чем ярче – тем выше фрактальная размерность. Диапазон изменения фрактальной размерности ячеек открытого типа составил 0,25, в то время как среднее значение фрактальной размерности приблизительно равно 2,8. Диапазон изменения фрактальной размерности закрытых ячеек составил 0,45, со средним значением 2,5. Строчный анализ поля фрактальных размерностей может использоваться для оценки степени неоднородности поверхности облачных ячеек и позволяет локализовать границу открытые-закрытые конвективные ячейки, которая соответствует переходу от холодных воздушных масс к теплым. В качестве иллюстрации приведен рис. 3.7, где изображено изменение фрактальной размерности по направлению, обозначенному на исходном изображении рис. 3.5 белым цветом. Четко виден скачок значений фрактальной размерности на границе открытые-закрытые ячейки, в данном случае этому состоянию соответствует 415 точка.

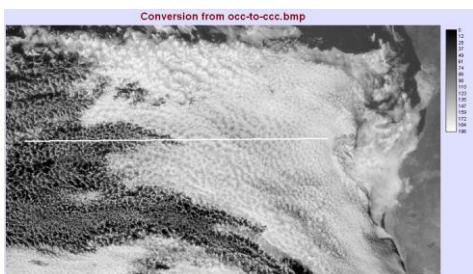


Рис.3.5. Поле конвективных ячеек.
MSG, 23.08.2001, 11:00 UTC

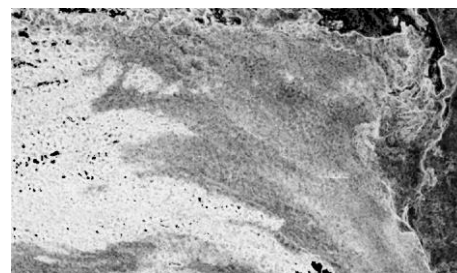


Рис.3.6. Поле фрактальных
размерностей



Рис.3.7. Профиль фрактальной размерности по направлению, указанному белой линией на рис. 3.5 (слева-направо)

Предлагается использовать оценку фрактальной размерности для анализа снимков разномасштабной облачности на каждом уровне вейвлет-декомпозиции. Пример такого использования приведен на рис. 3.8 и в табл. 3.1. Для каждой сглаженной копии исходного снимка на четырех этапах вейвлет-преобразования (см. рис. 3.1) построены поля фрактальных размерностей и гистограммы значений фрактальных размерностей.

Таблица 3.1

Фрактальная размерность исходного изображения рис.3.1 и четырех уровней вейвлет-преобразования

Разрешение, м	250	500	1000	2000	4000
Фрактальная размерность	2,788	2,6634	2,4894	2,3012	2,1834
СКО	0,1802	0,2204	0,2294	0,205	0,1596
Диапазон фрактальной размерности	2 – 2,9831	2 – 2,9565	2,0003 – 2,9185	2 – 2,8428	2,0001 – 0,6762

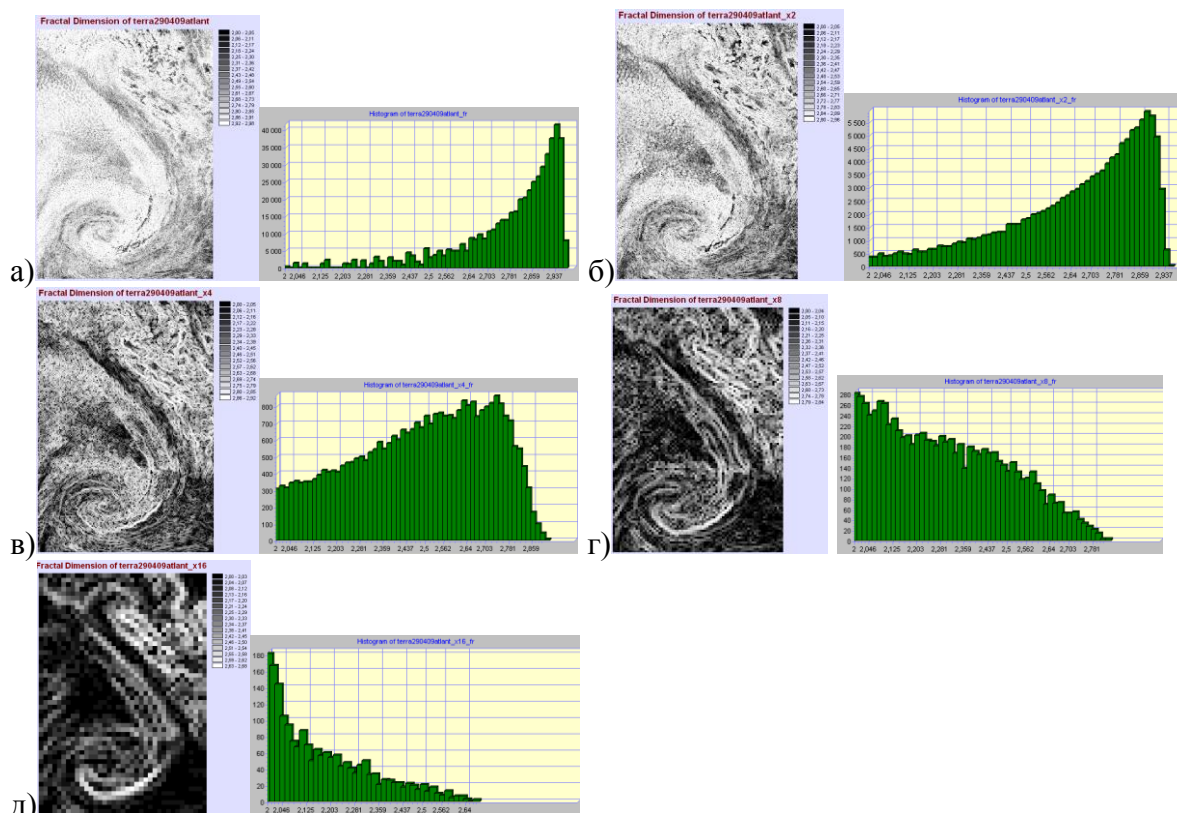


Рис. 3.8. Поля распределений фрактальных размерностей и их гистограммы для а) исходного снимка рис.3.1; б), в), г), д) четырех уровней вейвлет-преобразования

Произведено сопоставление вычисленных значений фрактальной размерности со спектром цветных шумов. Размерность близкая к 2 для плоскости определяется как «черный шум» и связывается обычно с процессами в очень вязкой среде. Такая размерность характерна для выровненных поверхностей, для которых величины оптической плотности изменяются незначительно. Тип размерности 2,5 обычно называют «коричневым шумом», и он отражает формы поверхности, порождаемые процессами, связанными с теплопереносом, или диффузией, в основу которых может быть положена модель случайного блуждания. На снимке такая поверхность отражается через резкие изменения оптической плотности с определенной степенью регулярности, для которой характерны высокочастотные (низкопериодические) составляющие. Тип размерности 2,9 называется «розовым шумом» и связывается с турбулентными процессами в среде малой вязкости.

На изображении поля фрактальных размерностей (см. рис. 3.6 и 3.8) светлому тону соответствуют территории, фрактальная размерность которых близка к «розовому шуму», серому тону – к «коричневому шуму», а наиболее темному тону – территории с фрактальной размерностью близкой к «черному шуму».

На основе спектра «цветности шума» полученные оценки фрактальной размерности были связаны с атмосферными процессами, вследствие чего сделаны следующие выводы. При самом высоком разрешении (250 м) к «розовому шуму» близка фрактальная размерность открытых ячеек. Так как текстура территории есть функция мощности действия факторов, определивших ее генезис, то можно сказать, что на объекты с текстурой, соответствующей «розовому шуму», действует множество возмущающих факторов. Действительно, характеристики образующихся в пограничном слое атмосферы над океаном облачных ячеек, состоящих из облаков масштаба мезо-γ, определяются совместным воздействием нескольких механизмов: нагревом на нижней границе, радиационными процессами на верхней границе, высвобождением латентного тепла в облаках, крупномасштабными вертикальными движениями, температурой и влажностью воздуха в слое инверсии, вовлечением и др. процессами.

Широкий диапазон фрактальных размерностей, (см. первую гистограмму рис. 3.8), указывает на присутствие на исходном снимке более консервативных по времени объектов синоптического масштаба и более изменчивых – отдельных облаков масштаба мезо-γ.

При разрешении 500 м и особенно 1 км, что соответствует снимкам с типичных метеорологических спутников (NOAA), средняя фрактальная размерность соответствует "коричневому шуму". На изображениях первого и второго уровня вейвлет-декомпозиции просматриваются системы масштаба мезо-α и -β с соответствующим временем жизни порядка суток.

При переходе со второго на третий уровень, что соответствует изменению разрешения с 1 на 2 км, резко меняется характер варьирования значений фрактальной размерности в пространстве, что хорошо видно на соответствующих гистограммах. Значения фрактальной размерности на третьем и четвертом уровнях приближаются к "черному шуму". Территории с текстурой, соответствующей «черному шуму», можно трактовать как наиболее консервативные и

неизменные во времени, что характерно для синоптических объектов (их фрактальная размерность на всех иерархических уровнях близка к 2). Доля территорий с "черным шумом" по визуальной оценке существенно больше доли территорий с "розовым шумом". Разрешение последнего уровня (4 км) типично для геостационарных спутников.

Построенный график фрактальной размерности на разных масштабах, представленный на рис. 3.9, отражает ее связь с масштабом атмосферных мезо-процессов.

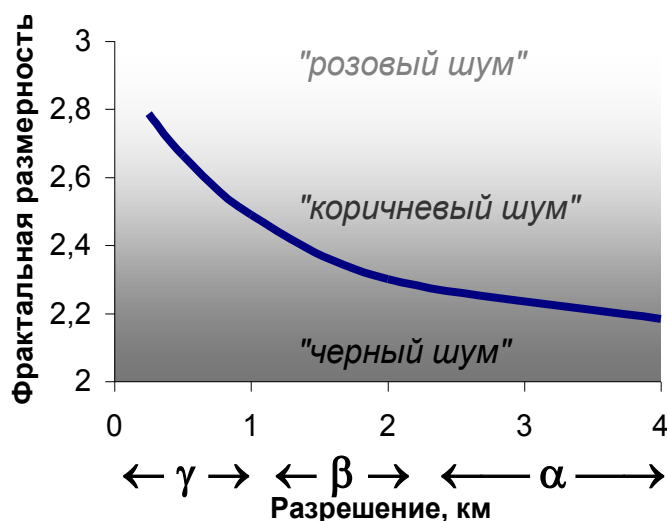


Рис.3.9. Фрактальная размерность на разных масштабах

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведен анализ информативности спутниковых снимков в различных каналах спектра для целей исследования мезомасштабной конвективной облачности.

2. Выполнено исследование мезомасштабных конвективных комплексов над территорией Европы по данным геостационарного спутника Meteosat-8 (2008 – 2011 гг.). На основе сравнительного анализа полученных данных с данными США выявлены особенности их статистических характеристик.

3. Выполнен анализ многозональных снимков в различных колориметрических моделях. Для анализа стадий развития конвекции предложено использование прямоугольной плоскости хроматических компонент колориметрической модели *Lab* и полярной плоскости Тон – Насыщенность колориметрической модели *HSB*.

4. Предложено и обосновано применение вейвлет-преобразования для анализа разномасштабных облачных процессов при разном разрешении.

5. Выполнен текстурный анализ спутниковых снимков облачности систем мелкой конвекции различных типов, разработана методика определения высо-

ты слоя конвекции по геометрическим размерам конвективных ячеек, найдена связь значений текстурных признаков с мощностью слоя конвекции.

6. В качестве критерия при идентификации областей конвективных ячеек предложено использование фрактальной размерности их мезоструктур на спутниковых снимках. Показано, что текстуры этих объектов имеют достаточно заметное различие значений фрактальной размерности, что указывает на благоприятные возможности использования этого метода для мониторинга состояния воздушных масс. Доказана возможность применения значения фрактальной размерности для локализации границ между открытыми и закрытыми облачными ячейками, что соответствует границе между теплыми и холодными воздушными массами.

7. Показана связь масштаба атмосферных движений со спектром цветности шумов на основе оценки фрактальной размерности.

8. Модернизирована методика определения фрактальной размерности текстур мезомасштабной облачности по ИК снимкам.

Основные положения диссертации представлены в следующих публикациях:

1. Войнов Н.Е., Кузнецов А.Д., Симакина Т.Е., Сероухова О.С. Измерение фрактальной размерности мезомасштабной конвективной облачности на спутниковых снимках. // Ученые записки РГГМУ. 2013. № 30. С.93-100.

2. Войнов Н.Е., Кузнецов А.Д., Симакина Т.Е., Сероухова О.С. Кратно-масштабный анализ спутниковых снимков облачности. //Вестник Тверского государственного университета. Серия: "Прикладная математика", выпуск 1 (28). 2013. № 15. С. 81-90.

3. Отчет о научно-исследовательской работе «Исследование дистанционного обнаружения опасных явлений погоды с помощью автоматизированного импульсного когерентного доплеровского метеорологического радиолокатора с двойной поляризацией Meteor 50DX» (Шифр: «Метеор») под научной редакцией проф. Кузнецова А.Д. № государственной регистрации НИР: 01201251681, 2012. – 137 с.

4. Воинов Н.Е., Кузнецов А.Д. д.ф-м.н., проф., зав. каф., Симакина Т.Е. к.ф-м.н., доц. Текстуриный анализ спутниковых изображений мезомасштабной облачности. // Тезисы доклада на Итоговой сессии Ученого совета РГГМУ. 22-23 января 2013.

5. Войнов Н.Е., Восканян К.Л., Кузнецов А.Д., Сероухова О.С., Симакина Т.Е. Методика текущего прогнозирования эволюции зон осадков по радиолокационным данным // Тезисы доклада на заседании постоянно действующего семинара «Дистанционные методы зондирования природной среды». СПб. Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского. 2012

Войнов Никита Евгеньевич

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

**МЕТОДЫ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ МНОГОЗОНАЛЬНЫХ
СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ В ЗАДАЧАХ АНАЛИЗА
МЕЗОМАСШТАБНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ АТМОСФЕРНЫХ
ДВИЖЕНИЙ**