Н.Е. Воинов, А.Д. Кузнецов, Т.Е. Симакина, О.С. Сероухова

ИЗМЕРЕНИЕ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ МЕЗОМАСШТАБНОЙ КОНВЕКТИВНОЙ ОБЛАЧНОСТИ НА СПУТНИКОВЫХ СНИМКАХ

N.E. Voinov, A.D. Kuznetsov, T.E. Simakina, O.S. Serouhova

MEASUREMENT OF THE FRACTAL DIMENSION OF MESOSCALE CONVECTIVE CLOUDS IN SATELLITE IMAGES

В статье проведен фрактальный анализ спутниковых снимков мезомасштабной конвективной облачности, построено поле фрактальных размерностей, которое позволило идентифицировать разные типы систем мелкой конвекции, выделить границу между конвективными ячейками открытого и закрытого типа.

Ключевые слова: мезомасштабная облачность, конвективные ячейки открытого и закрытого типа, поле фрактальных размерностей.

In this article the fractal analysis of satellite images of mesoscale convective clouds, built a field of fractal dimensions, which allowed the identification of different types of systems of shallow convection, highlight the boundary between the convective cells open and closed. Key words: mesoscale cloud, open or closed convective cells, the field of fractal dimensions.

Проблема автоматической идентификации и анализа мезомасштабной структуры облачных систем по спутниковой информации в последнее время приобрела большую актуальность как в связи с увеличением объема и качества исходных данных, так и в связи с появлением компьютерных разработок, реализующих различные методы исследования [1–6]. Изучение положения, структуры и типа облачных образований позволяет проанализировать пространственно-временную иерархию мезомасштабных систем [6]. Так, изменение пространственной организации и интенсивности конвективных ячеек масштабов мезо- γ и - β определяет жизненный цикл более крупных долгоживущих мезомасштабных конвективных систем масштаба мезо- α .

Мезомасштабная ячейковая конвекция весьма распространена над акваторией Мирового океана [7]. Наиболее полное исследование ячейковой конвекции было проведено Н.Ф. Вельтищевым [6, 8]. Форма конвективных ячеек в поле облачности зависит от термодинамических условий их формирования и скорости ветра. При слабом ветре ячейки имеют вид почти правильных многоугольников. При умеренных и сильных ветрах симметрия ячеек нарушается. Н.Ф. Вельтищев показал, что диаметр ячейки и соотношение между облачной и безоблачной зонами зависят от мощности конвективного слоя, вертикального градиента температуры и относительной влажности в слое конвекции. Когда градиент температуры с высотой убывает, образуются открытые облачные ячейки с нисходящими движениями в центре. Когда градиент температуры возрастает, образуются закрытые облачные ячейки с восходящими движениями в центре. Установлено также [9], что закрытые облачные ячейки встречаются преимущественно среди облаков слоисто-кучевых форм над холодной водной поверхностью. Конвективные ячейки открытого типа характерны для облаков кучевых форм.

Известно, что облачный покров в большинстве случаев фрактален. Целью настоящей статьи является определение фрактальной размерности различных типов систем мелкой конвекции по спутниковым снимкам и классификация этих систем по величине фрактальной размерности. На рис. 1 представлены фрагменты снимков поля закрытых конвективных ячеек, полученные геостационарным спутником MSG с пространственным разрешением 3 км (рис. 1*a*) и спутником Terra с разрешением 500 м (рис. 1*б*), а ниже — горизонтальные и вертикальные профили яркости для двух различных масштабов. По оси абсцисс на горизонтальных профилях отложены номера пикселов, на вертикальных — номера строк, по оси ординат — яркость в градациях серого от 0 до 255. Видно, что вариации имеют случайную форму, однако при изменении масштаба шкалы абсцисс можно отметить некоторую самоподобность изменения яркости. Это свидетельствует о фрактальном характере изображения и дает возможность характеризовать исследуемую поверхность мезомасштабной облачности соответствующей фрактальной размерностью.



Рис. 1. Поле закрытых конвективных ячеек: *a* – сканер SEVIRI спутника MSG, пространственное разрешение 3 км; *δ* – сканер MODIS спутника TERRA, пространственное разрешение 500 м; *в*, *е* – горизонтальные профили яркости; *д*, *е* – вертикальные профили яркости На рис. 2 и 4 представлены поля открытых и закрытых конвективных ячеек, взятых из источника http://www.brockmann-consult.de/CloudStructures/contents.htm, на рис. 3 и 5 – поля вычисленных фрактальных размерностей в градациях серого: чем ярче – тем выше фрактальная размерность. Для измерения фрактальной размерности использовался метод, предложенный в [10].



Рис. 2. Облачные ячейки открытого типа на снимках из космоса (источник: http://www.brockmann-consult.de/CloudStructures/contents.htm)



Рис. 3. Поля фрактальных размерностей открытых ячеек, вычисленных по рис. 2



Рис. 4. Облачные ячейки закрытого типа на снимках из космоса (источник: http://www.brockmann-consult.de/CloudStructures/contents.htm)



Рис. 5. Поля фрактальных размерностей закрытых ячеек, вычисленных по рис. 4

На рис. 6 представлены гистограммы фрактальных размерностей анализируемых изображений. Фрактальная размерность открытых облачных ячеек (рис. 6*a*) изменяется от величины 2,0 до величины 2,982 с модой в значении 2,89, фрактальная размерность закрытых ячеек (рис. 6*б*) изменяется от величины 2,0 до величины 2,981 с модой

в значении 2,82. Левая часть гистограмм характеризуется плавным ростом до значения моды, правая часть — резким спадом.



Рис. 6. Гистограммы фрактальных размерностей рис. 3 (вверху) и рис. 4 (внизу)

В работе [11] установлено, что при фрактальной размерности облачного покрова около 2,65 наблюдается выпадение осадков с вероятностью 75 %. Сильные осадки наблюдаются при фрактальной размерности облачного покрова большей 2,76. Это согласуется с данными [6], где отмечается большая вероятность осадков из открытых, чем из закрытых конвективных ячеек.

Фрактальная размерность представляет собой устойчивую статистическую характеристику и позволяет охарактеризовать различный вклад случайных факторов в динамику изучаемого процесса. Смысл оценок фрактальной размерности достаточно подробно описан в работе [12]. Размерность, близкая к 2 для плоскости определяется как «черный шум» и связывается обычно с турбулентными процессами в очень вязкой среде. Если сопоставить величину фрактальной размерности со степенью эрозионной переработанности территории, то размерность 2 характерна для выровненных

МЕТЕОРОЛОГИЯ

поверхностей моренных равнин, для которых величины оптической плотности изменяется незначительно. Тип размерности 2,5 обычно называют «бурым шумом», и он отражает формы поверхности, порождаемые процессами, связанными с теплопереносом, или диффузией, в основу которых может быть положена модель случайного блуждания. Обычно «бурым шумом» описывается рельеф, целиком определяемый эрозионной системой. На снимке эрозионная сеть 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. Достаточно типична такая размерность для дюнного рельефа. Таким образом, рост величины фрактальной размерности показывает степень стохастичности процесса и является критерием энтропии системы.



Рис. 7. Поле открытых и закрытых конвективных ячеек, западный берег Африки. MSG (23 августа 2001, 11:00 UTC)

Рис. 7 представляет собой космический снимок поля конвективных ячеек над Атлантическим океаном к западу от Африки. На снимке хорошо различима смена режимов конвекции от открытых конвективных ячеек (слева) к закрытым (справа). Установлено [6, 8], что конвективные ячейки открытого типа характеризуют районы адвекции холодных воздушных масс или районы с нисходящими крупномасштабными движениями, конвективные ячейки закрытого типа образуются в постепенно охлаждающихся воздушных массах и характеризуют районы адвекции теплых воздушных масс или районы с восходящими крупномасштабными потоками. Источником энергии для вертикального перемешивания во втором случае является радиационное выхолаживание вершин облаков.

На рис. 8 приведены фрактальные размерности территории рис. 7. Светлому тону соответствуют территории, фрактальная размерность которых близка к «розовому

шуму», серому тону — «бурому шуму», а наиболее темному тону — территории с фрактальной размерностью близкой к «черному шуму».



Edge-Preserving Median filter of occ-to-ccc-fr1

Рис. 8. Поле фрактальных размерностей, вычисленных по рис. 7

На исходном изображении (рис. 7) проведено сечение белым цветом, проходящее через границу смены типа конвективных ячеек, на рис. 9 изображено изменение фрактальной размерности по этому сечению. Диапазон изменения фрактальной размерности ячеек открытого типа составляет 0,25, в то время как среднее значение фрактальной размерности составляет приблизительно 2,8. Диапазон изменения фрактальной размерности закрытых ячеек составляет 0,45, со средним значением 2,5. Изменение фрактальной размерности позволяет выделить границу открытые/закрытые ячейки. Этому состоянию соответствует 415 точка.



Рис. 9. Профиль изменения фрактальной размерности по направлению, указанному белой линией на рис. 7 (слева-направо)

Таким образом, построение поля фрактальных размерностей по спутниковым снимкам мезомасштабной облачности позволило оценить текстурную сложность района, занятого разными типами систем мелкой конвекции. Строчный анализ фрактальных размерностей исходного изображения может использоваться для оценки степени неоднородности поверхности облачных ячеек и выделить границу открытые-закрытые конвективные ячейки.

Литература

- 1. Воинов Н.Е., Кузнецов А.Д., Симакина Т.Е, Сероухова О.С. Текстурный анализ спутниковых изображений мезомасштабной облачности. // Ученые записки РГГМУ. СПб.: РГГМУ, 2013.
- Кузнецов А.Д. Текущее прогнозирование на основе цифровой обработки изображений. СПб.: РГГМУ, 1997. – 167 с.
- Симакина Т.Е. Цифровая обработка спутниковых снимков с помощью ГИС IDRISI. СПб.: РГГМУ, 2004. – 45 с.
- Сероухова О.С. Лабораторный практикум по дисциплине «Геоинформационные системы». СПБ.: РГГМУ, 2007. – 116 с.
- 5. Симакина Т.Е. Получение и обработка спутниковых снимков. СПб.: РГГМУ, 2010. 127 с.
- 6. *Вельтищев Н.Ф.* Мезометеорология и краткосрочное прогнозирование. // Сб. лекций, Женева, 1988. 136 с.
- 7. Agee E.M. Mesoscale cellular convection over the oceans. // Dyn. Atmos. Ocean., 1987, 10, № 4, pp. 317–341.
- 8. *Вельтищев Н.Ф., Степаненко В.М.* Мезометеорологические процессы: Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 2006. 101 с.
- 9. Герман М.А. Космические методы исследования в метеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1985.
- 10. *Eastman J.R.* Single-Pass Measurement of the Fractional Dimensionality of Digitized Cartographic Lines. // Canadian Cartographic Association, Annual Meeting, June 1985.
- 11. *Грудин Б.Н., Ламаш Б.Е., Плотников В.С., Смольянинов Н.А.* Оценивание фрактальной размерности облачного покрова. // Ученые записки РГГМУ, 2012, № 24, с. 54–62.
- 12. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. // Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 528 с.