

ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МИКРОКОЛЕБАНИЙ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ ПЕРЕД ЦИКЛОНАМИ

Лисовицкий А.С., Чупин В.А.

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, г. Владивосток
lisovitchii.as@poi.dvo.ru*

Низкочастотные вариации атмосферного давления, регистрируемые нанобарографами, предоставляют ценную информацию о динамике атмосферных процессов, таких как циклоны. Эти данные позволяют исследовать сложные нелинейные закономерности, характерные для крупномасштабных метеорологических явлений.

Циклоны представляют собой мощные атмосферные возмущения, сопровождающиеся резкими изменениями давления, сильными ветрами и интенсивными осадками. Они вызывают значительные колебания атмосферного давления, которые могут быть зафиксированы с помощью высокоточных приборов — нанобарографов, способных регистрировать малейшие изменения этого параметра.

Нанобарографы обеспечивают непрерывную запись временных рядов атмосферного давления с высокой точностью, что делает их эффективным инструментом для анализа динамики метеорологических процессов. Устройство предназначено для работы в условиях открытой атмосферы и регистрирует прямые изменения атмосферного давления, связанные с развитием циклонов и других крупномасштабных явлений. Таким образом, наблюдаемый сигнал отражает влияние метеорологических факторов, включая перепады давления, обусловленные движением циклонических систем.

Статистические параметры зарегистрированных временных рядов, включая их фрактальные свойства, позволяют выявлять скрытые закономерности в поведении атмосферных систем, особенно в периоды активной циклонической деятельности. Фрактальный подход даёт возможность оценить степень хаотичности, сложности и самоподобия изучаемых процессов.

Атмосфера представляет собой сложную динамическую систему, в которой под действием внешних факторов возникают и

развиваются напряжения, накапливаемые в виде перепадов давления и температуры. Эта система поглощает энергию и передаёт её между своими элементами, постепенно приходя к неустойчивому состоянию.

Для объяснения поведения таких систем П. Бак, Ч. Танг и К. Визенфельд [1] предложили концепцию самоорганизованной критичности (СОК). Согласно этой теории, любая протяжённая диссипативная система со временем приходит к такому состоянию, в котором даже небольшие возмущения могут приводить к событиям различного масштаба — от локальных до глобальных. Характерной особенностью таких систем является их фрактальная структура и степенная статистика событий.

Одним из основных методов фрактального анализа рядов данных является метод фрактальных длин (L). Существует несколько вариантов реализации алгоритма расчета $L(n)$. Метод Хигучи подразумевает, что при рассмотрении ряда $Y(j)$, $j=1, 2, \dots, N$ для каждого $L(n)$ вычисление выполняется n раз. Длина кривой рассчитывается по точкам, относящимся к моментам $m, m+n, m+2n$, где $m = 1, 2, \dots, n$ — начальное смещение:

$$L_m(n) = \left(\sum_{i=1}^{[(N-m)/n]} Y(m+n) - Y(m+(i-1)n) \right) \frac{N-1}{\left[\frac{N-m}{n} \right] n}, \quad (1)$$

где $\frac{N-1}{\left[\frac{N-m}{n} \right] n}$ — нормализующий множитель; $\left[\frac{N-m}{n} \right]$ — наибольшее целое значение, не превышающее $\frac{N-m}{n}$.

Окончательная длина кривой определяется как арифметическое среднее по n значениям, каждое из которых есть $L_m(n)$. Вычисляется среднее значение $\langle L(n) \rangle$ по всем m и строим зависимость $\log \langle L(n) \rangle$ от $\log n$. Затем аппроксимируем эту зависимость прямой линией с помощью метода наименьших квадратов. Эта прямая описывается уравнением $y = -Dx + b$, где D — искомая фрактальная размерность. Уравнение мы получаем после линейной аппроксимации графика [2].

Для проведения анализа были использованы данные наноба-рографа, зарегистрированные в периоды активной циклонической

деятельности, с целью выявления статистических особенностей и потенциальных индикаторов циклонических событий. В качестве объектов исследования выбраны временные интервалы, включающие несколько значительных циклонов, которые проходили в разные годы и характеризовались резкими колебаниями атмосферного давления.

Каждый из выбранных периодов соответствует одному или нескольким циклоническим системам, оказывавшим существенное влияние на метеорологическую обстановку в регионе наблюдения:

- 31 июля – 12 августа 2020 года — циклон HAGUPIT, в том числе 6–7 августа, когда он проходил в непосредственной близости от станции наблюдения.
- 4 сентября – 17 сентября 2022 года — циклон MUIFA, достигший максимальной близости к станции 17 сентября.

В качестве спокойного периода, в течение которого не наблюдалось циклонов и значимых атмосферных возмущений, был выбран интервал с 1 апреля по 30 апреля 2023 года. Этот период используется как фоновый для сравнения с циклоническими эпизодами и позволяет выявить особенности поведения временных рядов давления в условиях как спокойной, так и возмущённой атмосферной динамики.

Экспериментальные данные в цифровом и аналоговом форматах поступают в лабораторное помещение, где они подвергаются первичной обработке и сохраняются с созданием банка данных. Все системы, оснащенные четырьмя компьютерами, объединены в единую сеть и используют часы точного времени, обеспечивающие синхронизацию данных с точностью до 10^{-7} – 10^{-8} секунд [3].

Анализ данных, полученных с лазерного нанобарографа (рис. 1), позволил сформулировать следующие выводы:

Во время прохождения циклонов наблюдается увеличение фрактальной размерности (D). Сравнение пассивного периода (без активности циклонов) и активного периода (присутствие циклона) показывает, что значения фрактальной размерности во время циклонов достигают значений 1,8, что выше значений в пассивном режиме (1,1–1,6). Перед циклоном HAGUPIT в 2020 году наблюдается также увеличения фрактальной размерности что показано на правом нижнем рисунке, в период с 21–29 июля, когда активность циклона еще не проявлялась. Также на графиках отмечены

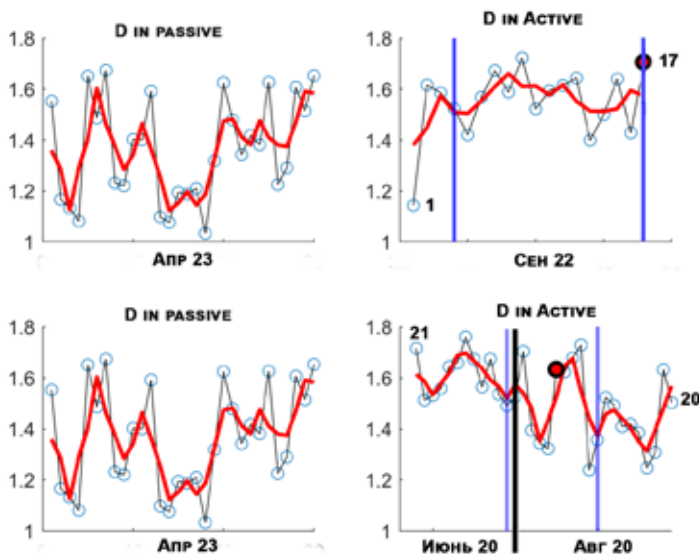


Рис. 1. Данные фрактальной размерности с данных нанобарографа. Черная линия на графике обозначает разделение между месяцами, а синяя рамка указывает на временной интервал, соответствующий продолжительности циклона

точки, соответствующие моментам максимального приближения циклона к экспериментальной станции. В обоих случаях (первый и второй циклоны) наблюдается пик или значительное повышение фрактальной размерности в момент наибольшего влияния циклона

До прихода циклона (перед циклоном MUIFA показанным на нижнем правом графике), отмечается предварительное увеличение фрактальной размерности. На данном примере видно, что уже с 21 по 29 июля, когда активность циклона еще не наблюдалась, значения D начали расти, что может свидетельствовать о развитии предциклоновых процессов.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод о том, что фрактальная размерность (D), вычисленная по методу Хигучи на основе данных нанобарографа, демонстрирует значительные изменения во время прохождения циклонов. Особенно интересным является наблюдение предциклоновых изменений D , что открывает возможности для её использования как прогностического индикатора. Однако для подтверждения этих выводов необходимы

дополнительные исследования с использованием большего объёма данных и различных сценариев.

Работа выполнена при финансовой поддержке госбюджетной темы ТОИ ДВО РАН № 124022100074-9 «Изучение природы линейного и нелинейного взаимодействия геосферных полей переходных зон Мирового океана и их последствий» и при частичной финансовой поддержке гранта № 075-15-2024-642 «Исследование процессов и закономерностей возникновения, развития и трансформации катастрофических явлений в океанах и на континентах методами сейсмоакустического мониторинга».

Литература

1. Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality // Phys. Rev. B. 1988. P. 364-374.
2. Higuchi T. Relationship between the fractal dimension and the power law index for a time series: a numerical investigation // Physica D, 1990. P. 254-264.
3. Долгих Г.И, Привалов В.Е. Лазерная физика. Фундаментальные и прикладные исследования // Владивосток: ООО «Рея», 2016. – 352 с.