

В. И. Таранов, О. А. Гуцин, Д. А. Милушкина

АНАЛИЗ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПЛОСКОГО НАСЫПНОГО СЛОЯ В ПОЛЕ ТЯЖЕСТИ

104

Приведены результаты статистического анализа структуры плоского вертикального слоя, сформированного из треугольных призм. Комплексный анализ выявил наличие квазипериодической структуры в распределении частиц. Предложена гипотеза о природе явления.

The results numeral analysis structure of flat vertical lager that is formed triangle prism are presented. Complex analyses had unequivocally revealed presence of quasiperiodic structure in distribution particle. Is being offered a hypothesis about the nature of this reveal.

Ключевые слова: гранулированный слой, структура, квазипериодичность, авторегрессионная модель, вейвлет-преобразование, энергетический спектр.

Key words: granulated lager, structure, quasiperiodicity.

Проведенные исследования структуры плоского гранулированного слоя из треугольных призм [1; 2] позволили сделать вывод о наличии квазипериодичности в распределении частиц. Но этот вывод носил скорее качественный и предварительный характер. Полученные ранее экспериментальные данные были обработаны на наличие скрытых периодичностей программами спектрального анализа. Методика получения насыпного слоя и предварительная обработка экспериментальных данных подробно описаны в указанных выше работах.

Для исследования на скрытую периодичность изображение слоя разбивалось на отдельные вертикальные полосы шириной 10 мм. Считалось количество частиц в каждой полосе. Ввиду симметрии в формировании насыпного слоя относительно левой и правой стенок камеры полученный массив значений числа частиц в каждой полосе разбивался на две выборки: от левой стенки до середины камеры (200 мм) и от середины камеры до правой стенки (400 мм).

Очевидно, при наличии внутренней упорядоченности в структуре слоя кривые распределения частиц относительно стенок камеры указанных выборок должны быть подобны. На рисунке 1 приведены распределения треугольных призм в слое, сформированном бросками с высоты 152 см. Аналогичные распределения получаются и при другом формировании слоя.

Анализ структуры сформированного гранулированного слоя на скрытую пространственную периодичность проводился с учетом небольших объемов выборки и возможностью квазипериодичности.

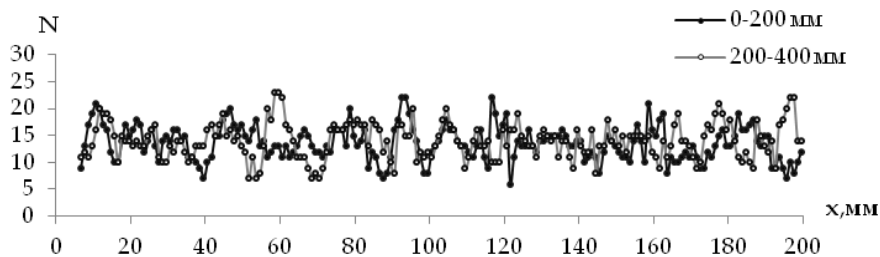


Рис. 1. Распределение треугольных призм, броски с высоты 152 см

Поэтому использовались программы спектральных оценок по методике авторегрессионного моделирования [3; 4] и вейвлет-анализа [6; 7].

Считая моделируемый процесс авторегрессионным, представим данные о случайном процессе в виде ряда отсчетов (t) (в нашем случае t — пространственный параметр). Модель авторегрессии порядка p (AR(p)-модель) описывается уравнением

$$x(t) + \sum_{k=1}^p a_k x(t-k) = \varepsilon(t) + d.$$

В этой формуле приняты следующие обозначения: a_k ($k = 1, \dots, p$) — коэффициенты авторегрессии; d — параметр смещения; $\varepsilon(t)$ — белый шум с нулевым средним и дисперсией σ^2 .

Таким образом, каждый отсчет представляется как линейная комбинация предыдущих p отсчетов, учитывая смещения и белый шум. Если исключить параметр d вычитанием из значений ряда выборочной оценки среднего, авторегрессионная модель принимает вид

$$x(t) + \sum_{k=1}^p a_k x(t-k) = \varepsilon(t).$$

Авторегрессионное моделирование представляет собой процесс нахождения коэффициентов a_k . При этом минимизируется так называемая «ошибка предсказания» $\varepsilon(t)$. Для проведения оценки энергетического спектра и выявления скрытых периодичностей в дискретных последовательностях было разработано приложение в среде Borland Delphi 7.0. В программе для нахождения коэффициентов модели используется метод Бурга [5].

Исходный массив был проанализирован с помощью вейвлет-анализа. Результатом вейвлет-преобразования одномерного ряда является двумерный массив амплитуд вейвлет-преобразования — значений коэффициентов $W(a, b)$. Распределение этих значений в пространстве (a, b) (временной масштаб, временная локализация) дает информацию об эволюции относительного вклада компонент разного масштаба во времени и называется спектром коэффициентов вейвлет-преобразования, масштабно-временным спектром, или вейвлет-спектром. Особенно полезно применение вейвлет-преобразования для анализа сигналов со скрытой квазипериодичностью, то есть когда период может меняться с изменением параметра t .



Для анализа структуры гранулированного слоя на периодичность использовались вейвлеты двух видов: Морле, МНАТ.

Исходные массивы экспериментальных данных были обработаны всеми тремя методами. Анализ результатов показал, что наиболее чувствительным оказался вейвлет Морле. На рисунке 2 представлены результаты анализа распределения частиц в плоском насыпном слое из треугольных призм при бросках треугольных призм с высоты 60 см. Из полученных периодограмм видно, что в исходном ряду имеется сложная квазипериодическая структура, которая наблюдается на обоих участках насыпного слоя. В зависимости от условий формирования слоя период меняется: при скатывании – в интервале 15–20 мм; при бросках с высоты 152 см – в интервале 14–18 мм; при бросках с высоты 60 см – в интервале 14–16 мм.

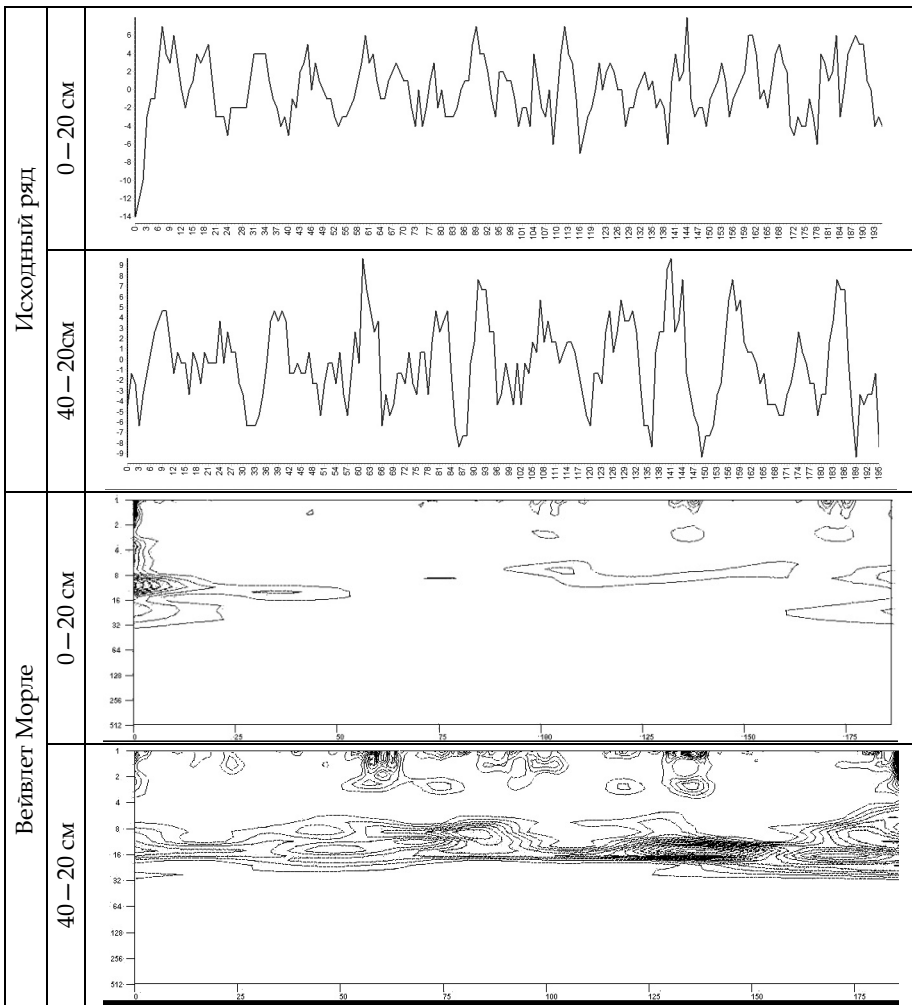
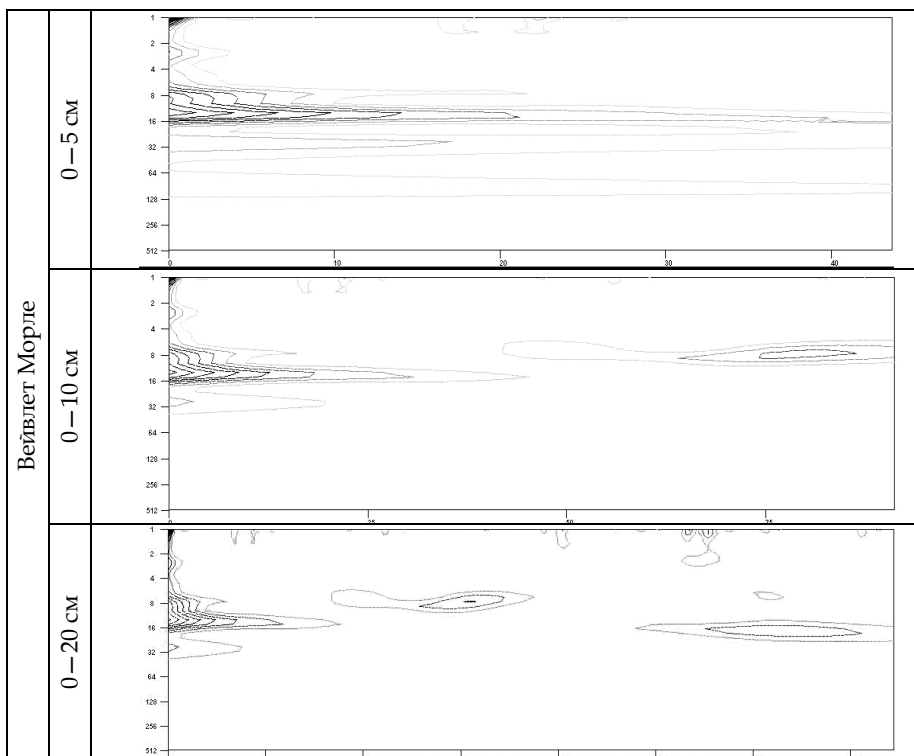


Рис. 2. Периодограммы насыпного слоя из треугольных призм при их бросках с высоты 60 см



Так как квазипериодичность наводится стенками камеры, в которой формируется слой, то можно предположить, что в зоне ближе к стенке периодичность проявляется более четко. Для проверки этого был проведен анализ в трех различных полосах у стенки шириной 50, 100 и 200 мм. Результаты обработки представлены на рисунках 3–5. Как видно из анализа результатов, на более близких расстояниях к стенке периодичность в структуре слоя проявляется более четко.



107

Рис. 3. Влияние ширины слоя на периодограмму насыпного слоя при различных условиях формирования: скатывание

Приведенные результаты позволяют однозначно говорить о наличии сложной квазипериодической структуры в распределении частиц. Таким образом, в плоском насыпном слое, формируемом из одинаковых частиц, возникает полуупорядоченная структура с линейным ближним порядком. Можно предположить, что образование квазипериодической структуры в слое связано с геометрией камеры, в которой формируется слой, и обусловлено ориентационным влиянием стенок. В окрестности вертикальных стенок камеры ближний слой частиц прижимается к стенке и имеет предпочтительную ориентацию с осью призмы, параллельной стенке. При формировании следующего слоя эта предпочтительная ориентация частично сохраняется и передается по слою от стенок. Очевидно, квазипериодическая структура возможна и при формировании слоя из одинаковых частиц удлиненной формы.

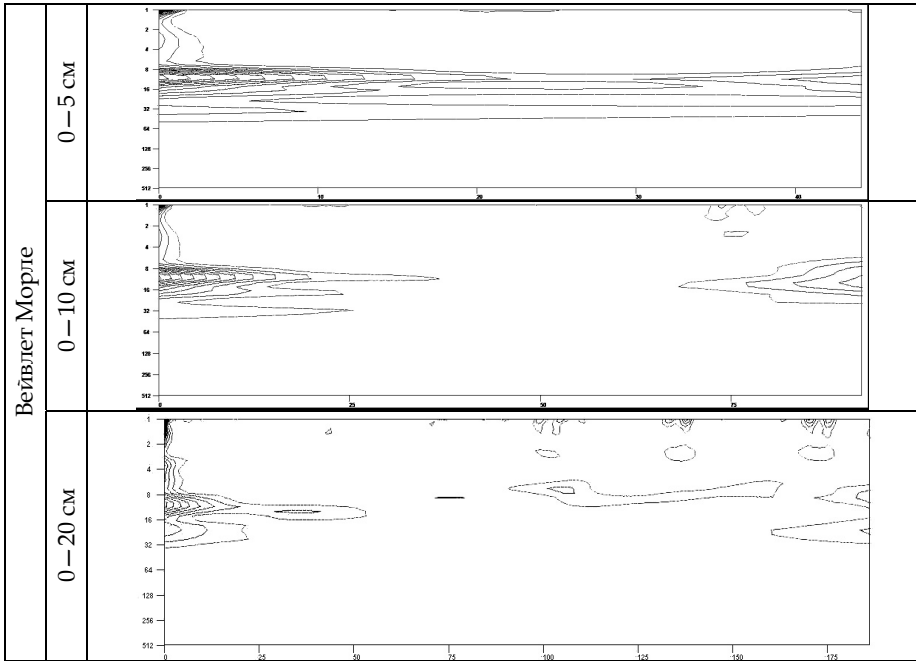


Рис. 4. Влияние ширины слоя на периодограмму насыпного слоя при различных условиях формирования: броски с высоты 152 см

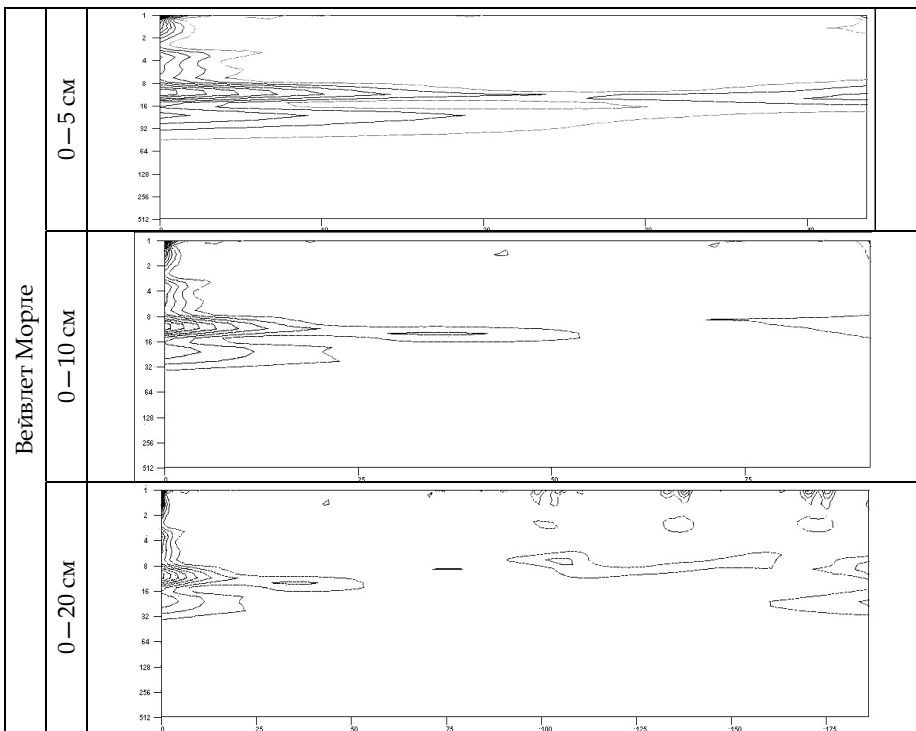


Рис. 5. Влияние ширины слоя на периодограмму насыпного слоя при различных условиях формирования: броски с высоты 60 см



Список литературы

1. Таранов В. И., Зинкевич А. В. Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. Калининград, 2009. Вып. 4. С. 88–92.
2. Таранов В. И., Гуцин О. А., Кривонос И. В. Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. Калининград, 2010. Вып. 4. С. 119–121.
3. Козубская Г. И., Коняев К. В. Адаптивный спектральный анализ случайных процессов и полей // Физика атмосферы и океана. 1977. Т. 13, №1.
4. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. М., 1991.
5. Kari Roth, Ismo Kauppinen, Paulo A. A. Esquef, Vesa Valimaki. Frequency warped burg's method for AR-modeling. NY., 2003.
6. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996. Т. 166, №11.
7. Новиков Л. В. Основы вейвлет-анализа сигналов : учебное пособие. СПб., 1992.

Об авторах

Владимир Иванович Таранов — канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта.

E-mail: DMilushkina@kantiana.ru

Олег Андрианович Гуцин — канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта

E-mail: DMilushkina@kantiana.ru

Дарья Милушкина — студ., Балтийский федеральный университет им. И. Канта.

E-mail: DMilushkina@kantiana.ru

Authors

Dr Vladimir Taranov — assistant professor, I. Kant Baltic Federal University.

E-mail: DMilushkina@kantiana.ru

Dr Oleg Goushchin — assistant professor, I. Kant Baltic Federal University.

E-mail: DMilushkina@kantiana.ru

Dar'ya Milushkina — student, I. Kant Baltic Federal University.

E-mail: DMilushkina@kantiana.ru