

УДК 638.138.1+004.942

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ ПЫЛЬЦЫ В ВОДЕ

**Буйлов В.Н.**, к.т.н., доцент

**Косарев А.В.**, к.х.н., доцент

**Чумакова С.В.**, к.т.н., доцент

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова», г. Саратов, Россия

**Аннотация.** Разработана компьютерная модель движения частиц пыльцы в воде. Показано, что распределение частиц пыльцы в воде носит фрактальный, самоподобный характер. Длина свободного пробега частиц снижается с ростом их концентрации в воде. Полученные в работе данные актуальны в задачах агрохимии и агроэкологии, связанными с динамикой фитомассы в агроценозах.

**Ключевые слова:** пыльца, вода, распределение, компьютерное моделирование.

Прогноз динамики процессов в окружающей среде в настоящее время является одним из важнейших в теоретической и прикладной экологии. Стохастические механизмы играют основополагающую роль в формировании реакции системы на внешнее воздействие и наглядным примером их является броуновское движение. Открытое в 1827 г. английским ботаником Р. Броуном это явление получило математическое обоснование гораздо позже в работах А. Эйнштейна (1905) и М. Смолуховского (1906), а затем Н. Винера (1923). И в настоящее время случайные процессы, моделируемые броуновским движением, являются теоретической базой для решения многих задач математического естествознания. Так, эволюционные задачи географии, такие как динамика горных ледников и колебание уровней озер, неравномерность вращения Земли и динамики общей циркуляции атмосферы,

глобальное изменение климата и вариации уровня влажности почвы, применяют математический подход, основанный на решении уравнения Ланжевена [1]. Исследование усиления обратной связи при воздействии антропогенных потоков тепла и адвекции на температуру воздуха в урбанизированных территориях, зависящей от климатических факторов и рельефа местности, также моделируются случайными составляющими, которые могут описываться в рамках броуновского движения [2]. Моделирование распределения загрязняющих аэрозолей в атмосфере может осуществляться на основе метода Монте-Карло [3]. В эконометрике распределение случайных величин, уподобляющееся броуновскому движению частиц, описывается в рамках стохастических законов элементарных прыжков Л.П. Каданова [4].

Цель работы - построить компьютерную модель движения пыльцы в воде. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

а) в среде Matlab написать программу движения разного числа частиц пыльцы в воде;

б) визуализировать результаты моделирования для разного количества частиц пыльцы.

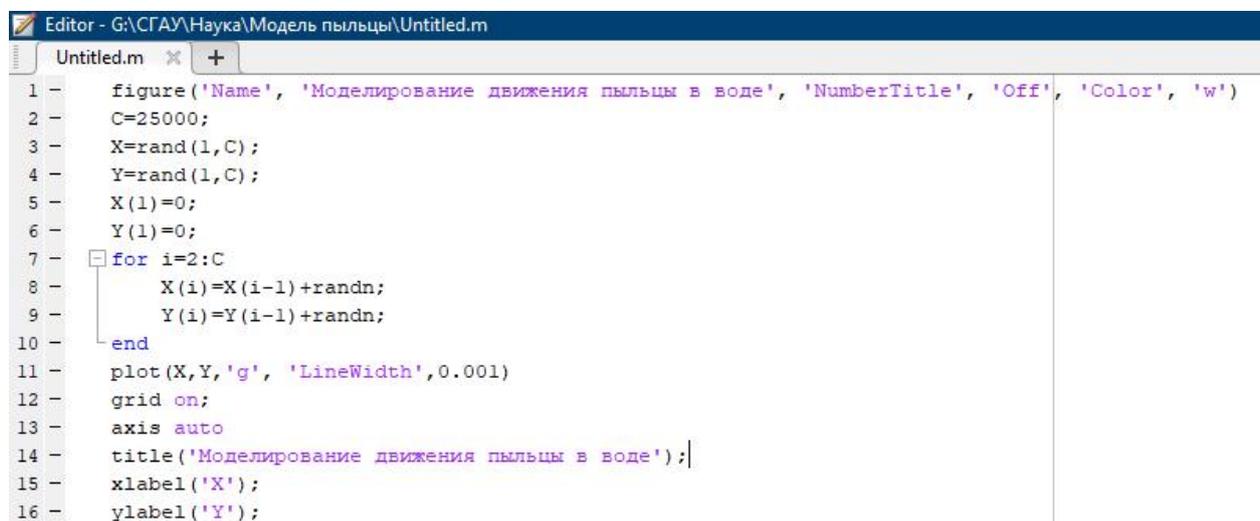
**Материалы и методы.** Моделирование стохастического движения частиц пыльцы проводилось в среде Matlab (version 9.7.0.1190202 (R2019b)).

**Результаты и обсуждение.** Код Matlab программы, задающей движение пыльцы в воде, представлен на рис.1. Первая его строка задает название программы и структуру окна программы. Вторая строка задает концентрацию пыльцы в воде. Строки 3 и 4 определяют случайное значение координат X и Y каждой частицы пыльцы соответственно. Процедура их вычисления организована с помощью функции-генератора псевдослучайных чисел *rand*. Взаимное расстояние между частицами определяется значением координаты в предыдущий момент  $X(i-1)$  и случайным значением текущей координаты, задаваемой функцией *randn*. Эта функция характеризует последовательность случайных чисел. Вычислительная процедура генерации случайного распределения частиц организовывалась с помощью цикла *for*. При этом

переменная  $I$  варьировалась от 2 (минимальное количество частиц, между которыми вычисляется расстояние), до  $C$  (заданное количество частиц). Результаты расчета траектории выводились в виде графиков (рис.2-4), задающихся функцией `plot`, определяющейся парой случайных координат  $X, Y$ , а также цветом и толщиной линии. Завершение программы организовано в виде обозначения осей и названия программы.

Повторяя запуск программы, получаем меняющуюся картину броуновского распределения частиц пылицы в воде.

Хаотичный характер движения пылицы обусловлен различием в частоте столкновений ее частиц с молекулами воды на разных участках площади, причем этого различия тем выше, чем меньше размер частиц пылицы. Проведенный нами численный эксперимент показал, что при перемасштабировании площади контакта пылицы с водой случайный характер траектории движения частиц пылицы не изменяется. Это свидетельствует о том, что данный процесс является самоподобным, или фрактальным [5].



```
Editor - G:\САУ\Наука\Модель пылицы\Untitled.m
Untitled.m X +
1 - figure('Name', 'Моделирование движения пылицы в воде', 'NumberTitle', 'Off', 'Color', 'w')
2 - C=25000;
3 - X=rand(1,C);
4 - Y=rand(1,C);
5 - X(1)=0;
6 - Y(1)=0;
7 - for i=2:C
8 -     X(i)=X(i-1)+randn;
9 -     Y(i)=Y(i-1)+randn;
10 - end
11 - plot(X,Y,'g', 'LineWidth',0.001)
12 - grid on;
13 - axis auto
14 - title('Моделирование движения пылицы в воде');|
15 - xlabel('X');
16 - ylabel('Y');
```

Рис.1. Код Matlab, моделирующий движение пылицы в воде

Другим свойством движения пылицы в воде является концентрационная зависимость длины свободного пробега частиц. Чем ниже их концентрация, тем меньшее количество столкновений пылицы с водой на единицу площади будет приходиться, тем выше длина их свободного пробега (рис.2-4).

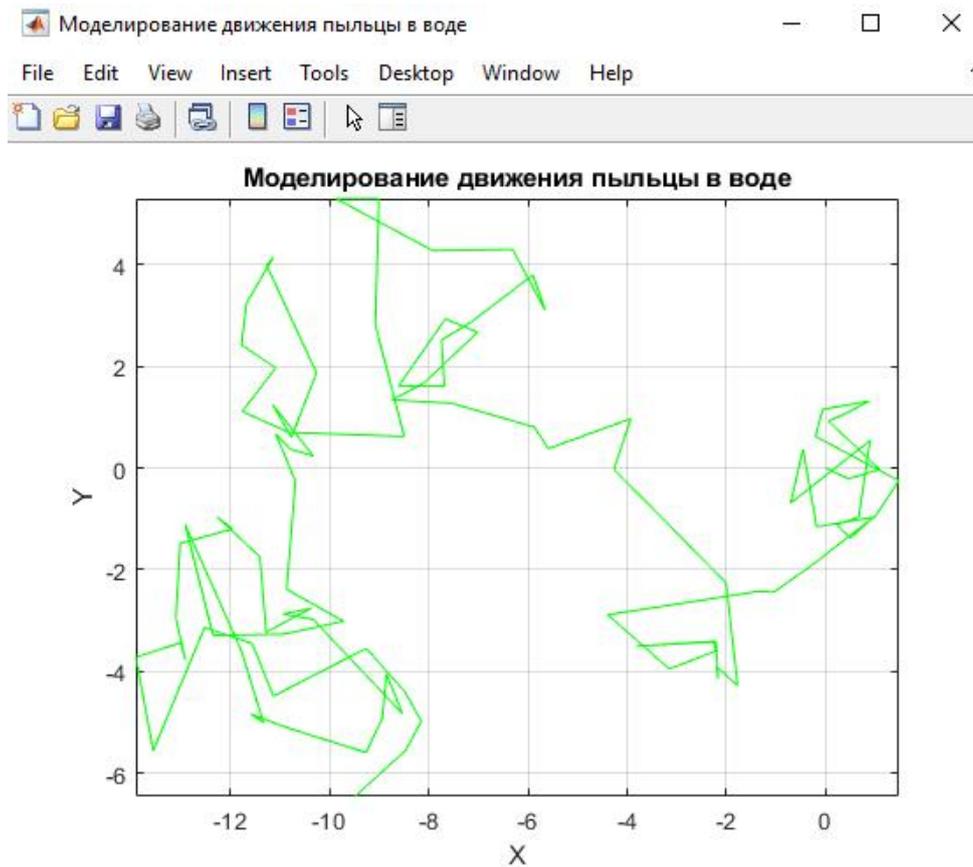


Рис.2. Результат работы программы для  $C=100$  частиц пылицы

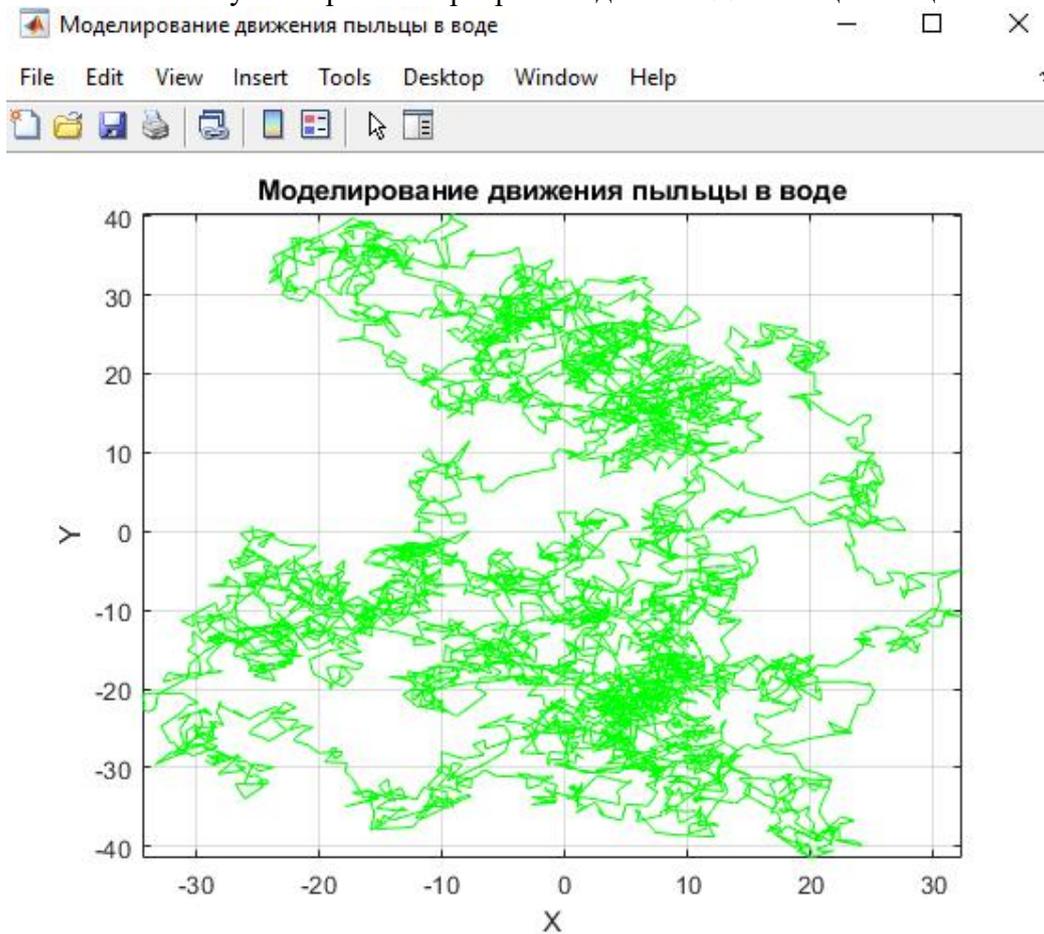


Рис.3. Результат работы программы для  $C=5000$  частиц пылицы

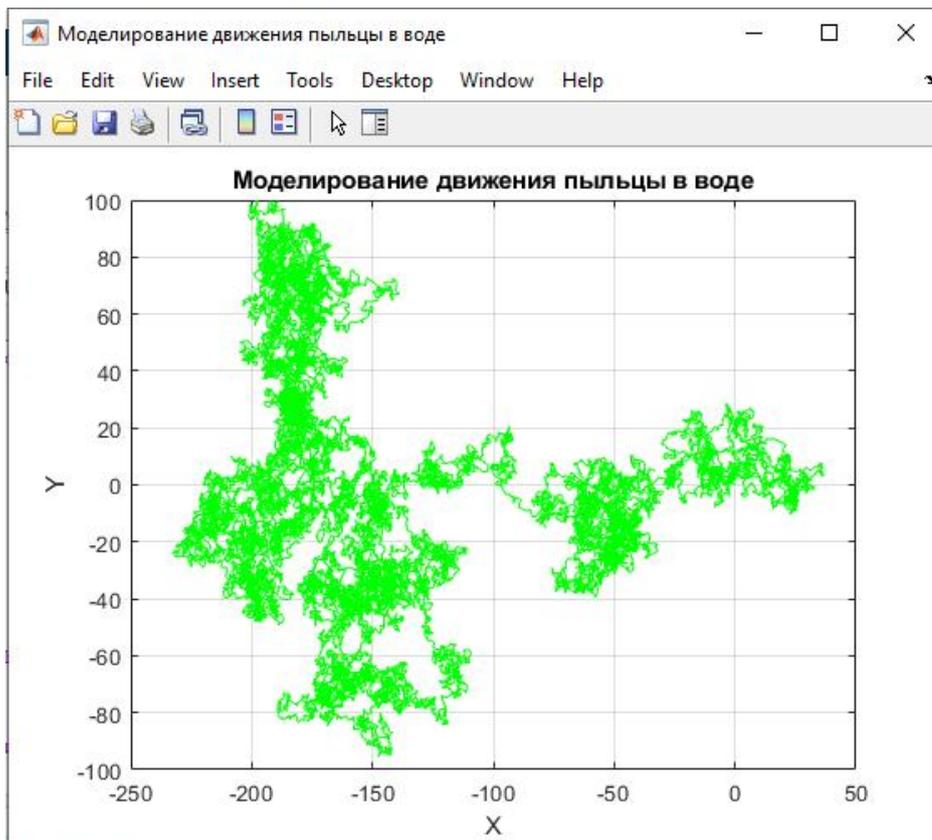


Рис.4. Результат работы программы для 25000 частиц пылицы

### **Заключение.**

Разработана компьютерная модель движения частиц пылицы в воде. Показано, что распределение частиц пылицы в воде носит фрактальный, самоподобный характер. Длина свободного пробега частиц снижается с ростом их концентрации в воде. Полученные в работе данные актуальны в задачах агрохимии и агроэкологии, связанными с динамикой фитомассы в агроценозах.

### **Литература**

1. Кислов А.В., Демченко П.Ф. Анализ эволюционных задач географии на основе математического аппарата броуновского движения // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2012. № 2. С. 7-12.
2. Гинзбург А.С., Демченко П.Ф. Обратные связи температурного режима и энергопотребления урбанизированных территорий // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 5. С. 556-564.

3. Сарафанов М.И., Третьяков В.Ю. Математическое моделирование распределений примесей в атмосфере и компьютерные реализации моделей // Метеорологический вестник. 2017. Т. 9. № 4. С. 58-75.
4. Видов П.В., Романовский М.Ю. Аналитические представления негауссовых законов случайных блужданий // Труды ИОФАН. 2009. Т. 65. С. 3-19.
5. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы: Пер. с английского. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 568 с.