

плодородия почв ( $\gamma > 1,0$ ) и такую же производительность зернового севооборота –  $K = 0,134$  МДж-день/ГДж, как и ежегодное внесение 10 т/га навоза –  $K = 0,131$  МДж-день/ГДж, но при более низких затратах антропогенной энергии на единицу продукции –  $\Delta = 215$  и 443 МДж к.е., соответственно фонам удобрения растительными остатками и навоза.

Таким образом, в научно-производственном опыте подтверждена возможность использования соломы в качестве органических удобрений через ее заделку в поверхностный слой на поле с известью. Этот прием позволяет повышать производительность агроэкосистем на единицу ресурса, обеспечивать баланс энергии органического вещества (простое или расширенное воспроизводство плодородия почвы) при значительном снижении антропогенных затрат невозобновляемой энергии, что ведет к повышению энергетической эффективности производства продукции.

#### Библиографический список.

1. А. С. № 1481681. Володин В. М., Федорченко А.Е., Бирюкова Л.И., Еремина Р.Ф. Способ прогнозирования воспроизводства плодородия почвы // БИ. – 1989. – №19. – С.201.
2. Дудкин И.В. Дудкина Т.А. Биоэнергетическая оценка факторов биологизации земледелия // Вестник Курской ГСХА. – 2017. – №2 – С. 6-10.
3. Методика ресурсно-экологической оценки эффективности земледелия на биоэнергетической основе. /Под ред. В. М. Володина, Р. Ф. Ереминой, А. Е. Федорченко, А. А. Ермаковой. –Курск. ВНИИЗ и ЗПЭ,1999. – 47с.
4. Технология эффективного использования растительных остатков как органических удобрений на черноземах Лесостепи ЦЧЗ. – Курск, 2005. – 20с.

УДК:631.43: 631.425

### МЕТОД ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА ПОЧВ

Моисеев К.Г.<sup>1</sup>, Терлеев В.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБНУ Агрофизический институт, Санкт-Петербург

E-mail: [kir\\_moiseev@mail.ru](mailto:kir_moiseev@mail.ru)

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

[www.spbstu.ru](http://www.spbstu.ru)

**Резюме.** Величина фрактальной размерности порового пространства вычисляется из распределения фракций агрегатов и частиц почв по размерам, определения плотности сложения и плотности твердой фазы почв. Это косвенный метод определения фрактальной размерности. Цель работы: предложить к обсуждению концепцию прямого, экспериментального метода определения фрактальной размерности порового пространства почв.

**Summary.** The fractal dimension value calculates from measurements of physical parameters: particle size distribution, determination of bulk density and solid phase density of soils. This is an indirect method for determining fractal dimension. Purpose of work: to propose for discussion the concept of an experimental, direct, physical method for determining the fractal dimension of the soils pore space

Всегда существовало стремление вывести свойства среды (почвы) из геометрии её строения, состава и расположения составных частей почвы в пространстве, то есть из почвенной текстуры и структуры (Моисеев, 2002). Вопросы моделирования порового пространства почв (структуры) актуальны по настоящее время, одной из причин сохранения этой актуальности является проблема моделирования гистерезиса функции влагоудержания (основной гидрофизической характеристики - ОГХ) почв (Банкин, 1988; Терлеев и др., 2008, 2017; Terleev et. al., 2016,). Настоящим прорывом в исследованиях структуры почв явилось появление и развитие фрактальной геометрии порового пространства почв, и теории перколяции.

Фрактальные модели, работают с дискретными протяжённостями, причём масштаб рабочей длины итеративно уменьшается (или увеличивается), поскольку модель «строится» с использованием степенной функции для масштабирования. Если мы изменяем рабочую длину по нисходящей, то есть на каждой итерации уменьшаем масштаб рабочей длины, то размер пор уменьшается. Почва формально иссушается, поскольку данное изменение итерационного масштаба при определении ветви иссушения кривой ОГХ, аналогично процессу выхода воды из пор всё более мелкого размера. Используют два типа теоретических моделей, в одних применяют массовый, в других, поровый фрактальный подход (Ganbarian-Alivijeh et. al., 2010). В первом случае принимается, что все твёрдые тела почвы имеют одинаковый размер и для масштабирования твёрдой фазы и порового пространства применяется фрактальный размер массы ( $D_m$ ). Во втором случае одинаковый размер имеют поры, размер которых и применяется для масштабирования (фрактальная размерность объёма  $D_v$ ).

Уязвимым местом фрактальных моделей остаётся оценка фрактальной размерности порового пространства почв.

Для каждой, применяемой на практике, фрактальной модели ОГХ разработаны конкретные расчетные процедуры массовой  $D_m$  и объемной  $D_v$  фрактальных размерностей капиллярно- пористого тела.

Массовая фрактальная размерность почв может быть рассчитана из соотношения (Rieu, Sposito, 1991; Perfect, 1999):

$P = 1 - (r_{max}/r_{min})^{3-D_m}$  где  $P$  - общая пористость почвы,  $r_{max}$  и  $r_{min}$  максимальный и минимальный размеры почвенных пор. Или:  $P = 1 - (\gamma/\rho)^{3-D_m}$ , где  $(\gamma/\rho)^{3-D_m} = V_{тв.ф.}$  объем твёрдой фазы почв.

Полезно помнить, что масса воды практически равна её объёму и, поэтому объёмная и массовая фрактальные размерности структуры почвы при моделировании ОГХ равны с определённой степенью точности.

Перспективной для теоретического расчета ОГХ является Pore-Solid-Fractal модель. Представляющая почву как капиллярно-пористую систему состоящую из трех частей, а именно: порового пространства (Pore), некоторого объема твердой фазы (Solid) и фрактальных областей – кластеров (Fractal) В модели PSF размерность фрактальной области  $D_p$  (Perrier, et. al., 1999, Bird et. al., 2000, Ghanbarian et. al., 2015) рассчитывают:

$$D_p = \frac{\log(1-P-S)}{\log b_i} + E, P - \text{объем пор, } S - \text{объем твердой фазы почв}$$

В случае полной фрагментации почвы, для агрегата состоящего из ЭПЧ, пористость агрегата (объем пор,  $P$ ):

$$P = 1 - (\bar{R}/R_{\min})^{3-D}. \quad (3)$$

Где,  $\bar{R}$  – средний размер,  $R_{\max}$  – максимальный размер агрегатов

Для практического расчёта фрактальных размерностей порового пространства почв необходимо располагать данными распределения ЭПЧ по размерам, провести агрегатный анализ, определить плотность сложения и плотность твёрдой фазы почв и вычислить пористость. Экспериментальные методы имеют погрешность определения, которая суммируется от метода к методу и вычисление фрактальной размерности не является точным, что приводит к ошибкам моделирования ОГХ. Может быть, существует возможность определить фрактальную размерность порового пространства почвы, каким-то более простым, и физически независимым способом?

Предложить к обсуждению теоретическую концепцию прямого экспериментального метода определения фрактальной размерности порового пространства почв является задачей данной работы.

Поскольку распределение пор по размерам и объёму почвы случайно и поры часто не формируют единое поровое пространство то и осушение, или заполнение пор водой случайные процессы. Поэтому поиск решения поставленной задачи следует искать в теории случайных процессов. Осушение и увлажнение почв происходят импульсно (Моисеев, Терлеев, 2017). Согласно теории перколяции среда «внезапно» обретает свойства влагопроводности при заполнении всех своих пор и пустот жидкостью. При незначительном изменении размеров пор происходит существенное изменение величины объёмного расхода ( $Q$ ) при постоянном напоре. При вхождении в такие поры небольшого добавочного количества воды происходит выброс всей накопленной в порах воды. Возникает так называемый эффект Харста, то есть поступление воды в почву вызывает выход большего объёма воды из почвы, чем поступило. В английском языке существует специальный термин «фликкер-процесс» (flicker – вспышка) для обозначения процессов, протекающих как импульс – короткая вспышка с последующим затуханием частоты периодической функции процесса во времени. Подобный процесс может быть единым и состоять из серии «вспышек».

Наглядный пример хаотического, случайного процесса – броуновское движение. С точки зрения математики, броуновское движение – непрерывный, случайный процесс с нулевым средним и дисперсией  $SX=T$ . Автокорреляционная функция его приращений дельта-функция Дирака, что означает отсутствие корреляций в последовательных значениях приращений величины  $X_t$  и постоянство спектра на всех частотах ( $f(v)=const, v$  – частота). Стандартное отклонение такого случайного процесса, при нулевом среднем, определяется, как  $T^{0.5}$  (где  $T$  период), дисперсия, соответственно, должна быть равна всему периоду времени  $SX_t \sim T$ .

В ряде гидрологических процессов в природе эта пропорциональность

нарушается. Дисперсия равна  $SX_t \sim T^H$ ,  $0 < H < 1$ , а отклонение -  $H$  величины степени от 0,5 получило название показателя Харста (по имени британского гидролога (Найдёнов и др., 2000)). Фликкер - процессы в области гидрологии распространены в природе и широко распространён эффект Харста. При исследованиях фильтрации влаги через монолит почвы естественного сложения в лаборатории, был обнаружен эффект Харста. В некоторых случаях при испытаниях оказалось, что суммарный, объемный расход -  $Q$  при фильтрации влаги не пропорционален  $T^{0,5}$ . И показатель степени при  $T$  не равен  $1/2$ , а имеет величину  $T^{0,5H}$ .

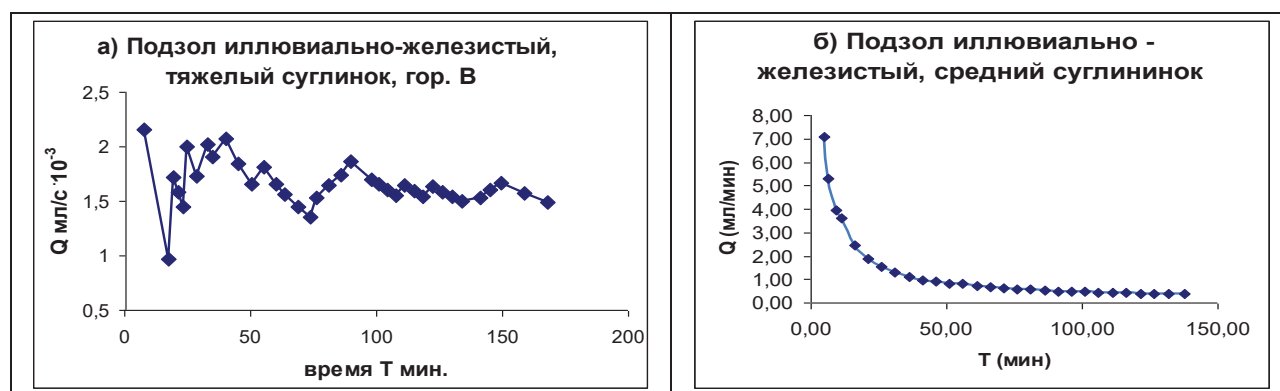


Рисунок 1. а) Фликкер процесс при фильтрации влаги через образец почвы не нарушенного сложения, б) Стандартная форма кривой при фильтрации влаги через образец почвы не нарушенного сложения

Характерные сигналы (временные ряды) фликкер – процессов неустановившейся фильтрации влаги через образцы естественного сложения почв показаны, для примера, на рис 1а. В случае если  $Q \sim T^{0,5}$  мы не наблюдаем эффекта Харста и характерная кривая фильтрации влаги через почвенный образец имеет экспоненциальную (стандартную) форму, показана на рис 1б.

На основе фильтрационных испытаний образца почвы не нарушенного сложения утверждаем: если форма кривой фильтрации не экспоненциального характера, а имеется спектр частот  $f(\nu) \rightarrow \infty$ , почва имеет фрактальную структуру. Фрактальную размерность такого сигнала легко определить методом линейных систем фрактальной геометрии (Старченко, 2005). Таким образом, в силу эффекта Харста получаем возможность определить фрактальную размерность порового пространства почв «прямым» методом. Зависимость объемного расхода от времени при фильтрации влаги через почву - это временной ряд общего вида  $L^n = f(T)$ , итерируем полученный ряд с суммарной длиной  $L$  и определяем фрактальный декремент  $\delta$ , как степень показательной функции  $\log L = f(\log m^i)$ ,  $m^i$  – итерационный масштаб длины ряда (Моисеев и др. 2014). Фрактальная размерность порового пространства почв находится из соотношения  $D_p = 1 - \delta$ . Второй способ – вычисляется показатель  $H$  методом Харста. Фрактальная размерность порового пространства почв, в этом случае определится из соотношения  $D_p = 2 - H$ . В случае  $f(\nu) = const$ , полученная экспериментальная зависимость объемного расхода от времени имеет гладкий характер, это случай регу-

лярной структуры почв. Моделировать данную структуру возможно и необходимо применением теории подобия.

Экспериментальный метод определения фрактальной размерности порового пространства почв при фильтрации влаги через почвенный монолит не нарушенного сложения освобождает нас от целого ряда вопросов. Во-первых, решается вопрос о типе почвенной структуры и режиме влагопереноса в почве. Во-вторых, исследуется почва не нарушенного сложения, как есть, применяется не разрушающий структуру почв метод, что сразу увеличивает точность определения фрактальной размерности. В-третьих, такой подход избавляет нас от необходимости учитывать вероятность фрагментации почв и вероятность осушения или увлажнения отдельных областей дискретного порового пространства при влагопереносе. Из данных фильтрационного опыта вычисляем непосредственно мультифрактальную размерность порового пространства почв методом линейных систем или способом Харста и используем найденную величину при дальнейшем моделировании функций водоудержания и влагопереноса в почвах.

**Благодарность.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-04-00939-а.

#### **Библиографический список**

1. Банкин М.П., Заславский Б.Г., Терлеев В.В. (1988). Автоматизированная система определения влагопроводности почв Научно-технический бюллетень по агрономической физике. Т. 72. – С. 33-36.
2. Крылова И.Ю., Терлеев В.В. (2008) Моделирование гидрологических характеристик почвы. В сборнике: XXXVII Неделя науки СПбГПУ. СПб., С. 277-279
3. Моисеев К.Г. (2002). Применение теории подобия в исследованиях физико-механических свойств почв. диссертация на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук / Агрофизический научно-исследовательский институт. Санкт-Петербург.
4. Моисеев К. Г., Бойцова Л. В., Гончаров В. Д. (2014) Анализ динамики гумусного состояния почв фрактальными методами. Агрофизика. – № 1(13). – С. 1-8.
5. Моисеев К. Г., Терлеев В. В. (2017) Моделирование структуры капиллярно-пористой среды и вычисление дифференциальной пористости почв. Агрофизика. – № 3. – С. 43-56.
6. Найдёнов В. И., Кожевникова И. А. (2000) Эффект Харста в Геофизике. Природа. – № 1. – С. 3-11.
7. Старченко Н. В. (2005) Индекс фрактальности и локальный анализ хаотических временных рядов. Дисс. канд. физ.-мат. наук. М.: МИФИ, 74.
8. Терлеев В. В., Миршель В., Баденко В. Л., Гусева И. Ю. (2017) Усовершенствованный метод Муалема - ван Генухтена и его верификация на примере глинистой почвы Бейт Нетофа. Почвоведение. – № 4. – С. 457-467.
9. Bird, N., Perrier, E. & Rieu, M. (2000) The water retention function for a model of soil structure with pore and solid fractal distributions. European Journal of Soil Science – 51. – 55-60
10. Ghanbarian-Alavijeh, B., Liaghat, A., Huang, G. H. & van Genuchten, M. T. (2010) Estimation of the van Genuchten soil water retention properties from soil textural data. Pedosphere 20. – P. 456-465.
11. Ghanbarian-Alavijeh, B., Hunt, A. G., Skinner, T. E., Ewing, R. P. (2015) Saturation dependence of transport in porous media predicted by percolation and effective medium theories. [Электронный ресурс]//ResearchGate 2016.
12. Perfect, E. (1999) Estimating mass fractal dimensions from water retention curves. Geoderma. – 88. – P. 221-231.

13. Perrier, E., Bird, N. & Rieu, M. (1999) Generalizing the fractal model of soil structure: The pore–solid fractal approach. *Geoderma*. – 88. – P. 137-164.
14. Rieu M, Sposito G. (1991) Fractal fragmentation, soil porosity, and soil water properties: I. Theory, II. Applications. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55. – P. 1231-1244.
15. Terleev V., Nikonorov A., Togo I., Volkova Yu., Garmanov V., Shishov D., Pavlova V., Semenova N., Mirschel W. (2016) Modelling the hysteretic water retention capacity of soil for reclamation research as a part of underground development. *Procedia Engineering*. 165: – P. 1776-1783.

УДК 502.5 (25): 631.434.52

## СОСТОЯНИЕ ПОЧВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ПРИМЕНЕНИИ ЛАНДШАФТНОЙ СИСТЕМЫ ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

Новых Л.Л., Волощенко И.В., Смирнова Л.Г., Новых Е.А.

Белгородский государственный национальный

исследовательский университет, г. Белгород

E-mail: [novykh@bsu.edu.ru](mailto:novykh@bsu.edu.ru)

**Резюме.** Проанализировано состояние почвенной структуры после 30-летнего применения ландшафтной системы земледелия в условиях Белгородской области. Пахотные горизонты почв в зональной и ландшафтной системах характеризуются отличной и хорошей структурой, подпахотные – удовлетворительной. В условиях ландшафтной системы произошло улучшение структуры почвы в «плужной подошве».

**Summary.** The state of the soil structure after 30 years of applying the landscape farming system in the conditions of the Belgorod region is analyzed. The arable soil horizons in the zonal and landscape systems are characterized by excellent and good structure, and the arable horizons are satisfactory. In the conditions of the landscape system, there was an improvement in the structure of the soil in the "plough sole".

Представленная статья является продолжением серии работ, в которых освещаются результаты мониторинга состояния почвенной структуры при длительном применении ландшафтной системы земледелия [4]. Охрана и рациональное использование почв являются важнейшими составляющими сбалансированного развития агропромышленного комплекса страны. Необходимыми условиями, определяющими плодородие почв, являются не только агрохимические, но и агрофизические их свойства.

Стратегической основой развития сельского хозяйства в Белгородской области является почвозащитное земледелие с контурно-мелиоративной организацией территории. Такая организация территории позволяет реализовать основной закон экологического земледелия: каждая сельскохозяйственная культура должна возделываться в условиях, к которым она наиболее приспособлена [2].

Мониторинг физического состояния почв является актуальным направлением почвенно-экологического мониторинга, т.к. именно физическое состояние часто становится лимитирующим фактором для роста и развития растений. Для характеристики почвенной структуры чаще всего используются традиционные показатели: содержание глыб, пыли, агрономически-ценных агрегатов, коэффициент структурности. В своей работе мы также использовали интегральный показатель – средневзвешенный диаметр почвенных агрегатов [5].

Целью нашего исследования было определение состояния структуры для