

---

# МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

---

УДК 631.4:004.358

А. К. Балалаев

## ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛЬНОГО ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА ЭДАФОТОПА

О. К. Балалаев

*Дніпропетровський національний університет*

### ЕКОЛОГІЧНА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛЬНОГО ПОРОВОГО ПРОСТОРУ ЕДАФОТОПУ

Моделювався синтез великої кількості комп'ютерних зображень порового простору ґрунтів. Проведено їх статистичний аналіз та екологічна інтерпретація результатів дослідження.

*Ключові слова:* комп'ютерна модель, геометричні характеристики, аналіз зображень, поровий простір, мікроструктура ґрунту, екологічна інтерпретація.

O. K. Balalayev

*Dnipropetrovsk National University*

### ECOLOGICAL INTERPRETATION OF POROUS SPACE GEOMETRICAL CHARACTERISTICS OF SOILS

The synthesis of quantities computer's imagines have been modeling. Statistical analysis of the geometrical characteristics of soil's porous space have been conducted. Ecological interpretation of investigation's results was done.

*Key words:* computer model, geometrical characteristics, image analysis, pore space, soil microstructure, ecological interpretation.

В настоящее время можно считать общепризнанным, что основным определяющим физические условия естественного почвенного плодородия показателем является структурное состояние почв (Розанов, 1983). Известно, что значительное влияние на формирование и разрушение почвенной структуры оказывают корневые системы однолетних и многолетних растений, которые обогащают почву органическим веществом. Аналогично воздействие древесных растений на черноземные почвы (Белова, 1997). Корневые системы растений, бактерии, грибы, водоросли, населяющие почву, поглощают ее минеральные и органические соединения, расходуют их на построение своих тел и таким образом задерживают их в структуре почвы.

Большинство физико-химических и химических превращений происходят в растворах. Почва действует как адсорбент воды. Влажность почвы обуславливает ее механические, термодинамические и многие другие физические свойства, а также биохимические и микробиологические процессы.

Интенсивность перемещения почвенной влаги и ее доступность для растений определяется множеством факторов, среди которых в первую очередь можно назвать геометрию порового пространства, свойства раствора и градиент сил различной физической природы (Качинский, 1965, 1970). Например, от конфигурации порового пространства напрямую зависит аэрация почвы, определенный уровень которой обеспечивает успешный рост и развитие как корневых систем, так и растений в целом.

Кроме того, многочисленные примеси, присутствующие в водном растворе, такие как удобрения, гербициды, промышленные загрязнители т. п., вносят свой вклад в перемещение и распределение жидкой фазы (Пачепский, 1990). На увеличение дисперсии примесей влияют множество физических явлений, связанных со структурой порового пространства: неоднородность поля скоростей по сечению поры; изменение скорости течения жидкости относительно общего потока в порах разной проницаемости; ориентация пор; коэффициенты диффузии в порах разного радиуса; адсорбция и десорбция

© Балалаев А. К., 2004

молекул примесей стенками пор, обусловленная гетерогенностью среды; гофрированность поровых каналов; наличие застойных зон в тупиковых порах; гистерезис смачивания и т. д. Такое разнообразие влияния микронеоднородностей усложняет точное решение задачи описания физико-химических процессов в пористой среде почвы. Здесь необходимо применение статистических методов, основанных на модельных предположениях.

В данной статье обсуждается теоретическая проблема формирования почвенной структуры в биогеоценозе. Большинство существующих на сегодняшний день моделей порового пространства почвы рассмотрены без учета влияния биотических факторов и опубликованы в литературе, освещающей проблемы физики почв. В основном она посвящена изучению вопросов удержания и движениям воды в почве. Эдафотоп рассматривается как некое «мертвое» тело. Создатели подобных моделей изначально ставили перед собой несколько иные цели. Когда речь идет о типично геологических задачах, таких как содержание нефти и газа в поровой структуре горных пород, распределение грунтовых вод на больших глубинах или изучение свойств сильно засоленных почв, такой подход вполне оправдан (Хейфец, Неймарк, 1982; Ромм, 1985; Ентов, 1998). Рассматривать же плодородные верхние слои почвы, насыщенные органическим веществом, в отрыве от живой природы с экологической точки зрения некорректно.

Экологов главным образом интересуют взаимозависимые механизмы приспособления и преобразования фито-, зоо-, микробиоценоза и почвы как биокосной среды обитания. Учесть влияние всех биотических факторов на генезис почвенной структуры очень сложно. А вот обратная задача текущего влияния ранее сформированной структуры эдафотопа на отдельные компоненты биоценоза вполне разрешима. Такой подход имеет под собой основание, поскольку почвенная микроструктура обладает меньшей временной изменчивостью по сравнению с процессами, влияющими на ее формирование. В данной статье анализируется возможное влияние на почвенную экосистему только геометрии порового пространства образовавшегося в результате формирования твердого почвенного скелета из почвенных частиц.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Многочисленные исследования, проведенные за последние годы с помощью компьютерных моделей, составляют основу современных представлений о почве как пористой среде (Макрокинетика ..., 1971; Воронин, 1984; Lenormand, Zarcone, 1989; Пачепский, 1990; Tyler, Wheatcraft, 1990; Blunt, King, 1991; Щербаков и др., 1994). Подобные работы демонстрируют возможности современных численных методов и их успешное применение к задачам моделирования почвенных свойств. Среди них много интересных, сложных и достаточно универсальных подходов, потому мы в своей работе активно воспользуемся накопленным разными исследователями опытом моделирования.

В основе нашего модельного подхода лежит понимание того, что наиболее активно большинство природных процессов происходит на границе раздела трех фаз – твердой, жидкой и газообразной. При этом твердая фаза является определяющей и наиболее устойчивой как в пространстве, так и во времени по сравнению с остальными фазами. Именно поэтому вначале работы модели формируется твердый скелет и далее на его основе проводится анализ свойств жидких растворов и газов, а также их возможное влияние на развитие почвенной биоты.

В представленной работе применен стохастический принцип распределения частиц в пространстве как наиболее адекватный для распределения природного материала. Он предполагает представление почвенной структуры в виде статистического ансамбля взаимосвязанных структурных элементов, свойства и взаимное расположение которых случайны и подчиняются некоторым вероятностным законам.

При конструировании твердого почвенного скелета использованы три алгоритма:

- 1) равномерного-стохастический;
- 2) агрегатно-стохастический;
- 3) фрактально-кластерный.

Учитывая принципиальную важность в формировании модели, рассмотрим каждый метод подробнее.

Равномерно-стохастический алгоритм (рис. 1) предполагает равномерное размещение почвенных частиц разных размеров на всей плоскости модели случайным образом методом Монте-Карло. Заполнение продолжается до момента достижения заданной пористости. Различные варианты использования этого метода описаны ранее (Балалаев, 2003), здесь метод используется для сравнения с остальными двумя в качестве контрольного.

Агрегатно-стохастический, или кластерно-стохастический, алгоритм синтеза модели (рис. 2) отличается от предыдущего тем, что в пределах плоскости модели размещаются центры агрегатов, координаты которых выбираются случайно при заданном числе

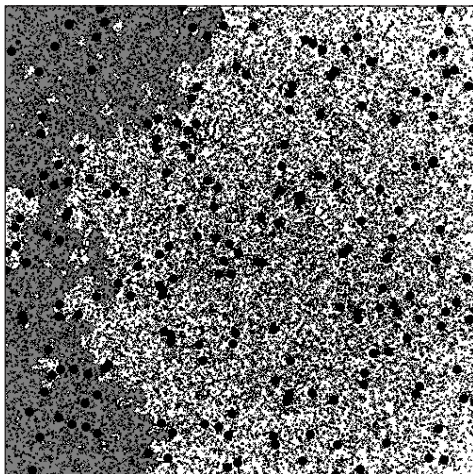


Рис. 1. Пример изображения равномерно-стохастической модели вблизи порога протекания с частицами разного размера

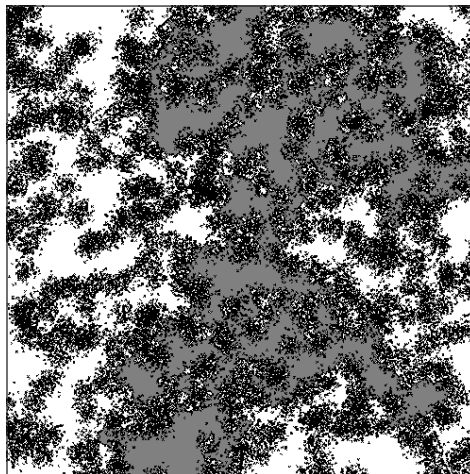


Рис. 2. Пример изображения агрегатно-стохастической модели вблизи порога протекания с частицами одного размера

агрегатов. При этом координаты почвенной частицы задаются относительно центра одного из агрегатов также случайно, но с нормальным распределением. Тогда вероятность попадания почвенной частицы в агрегат тем выше, чем ближе ее координаты к центру одного из агрегатов. При реализации этого алгоритма наблюдается тенденция формирования агрегатов округлой формы с равными радиусами.

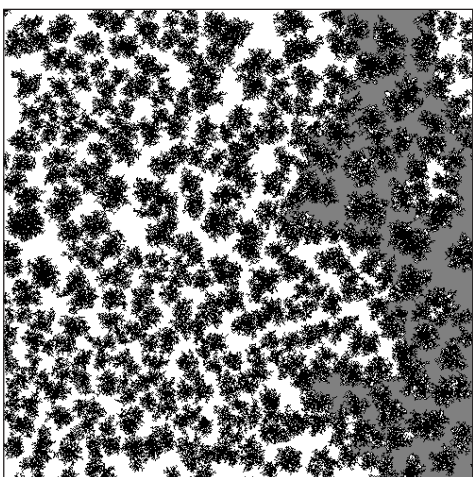


Рис. 3. Пример изображения равномерно-стохастической модели вблизи порога протекания с частицами одного размера

Наиболее интересен фрактально-кластерный алгоритм (рис. 3). Его рассмотрению уделяется в литературе много внимания (Фракталы ..., 1985; Смирнов, 1991). По определению, фрактальные системы обладают дробной размерностью, не совпадающей с размерностью пространства, в котором они существуют. Благодаря этим свойствам появляется возможность определить скрытый порядок в хаотических системах.

Фрактальный кластер образуется в результате слипания твердых частиц. На этот процесс могут влиять разные условия, что отражается на свойствах образуемого кластера. Совокупность внешних условий, при которых происходит рост кластера, составляет основу модели. Рост фрактального кластера при агрегации твердых частиц имеет аналогии с целым рядом физических и физико-химических процессов и явлений, протекающих также и в почве. Предварительные

исследования показывают наличие фрактальных свойств в почвенных микроструктурах (Балалаев, 2003). Сходство в первую очередь заключается в математическом описании процесса роста фрактального кластера. При этом фракталы являются одной из возможностей реализации соответствующего явления.

Соединяя большое число фрактальных кластеров в один, получим кластер, обладающий фрактальными свойствами на малых размерах и однородностью на больших размерах.

Различные варианты моделирования фрактальных систем описаны в литературе (Фракталы ..., 1985). Существует две основные модели фрактальных кластеров:

1) *DLA* (Diffusion Limited Aggregation) – модель (Witten, Sander, 1981) предполагает, что элементарные почвенные частицы, совершающие броуновское движение в растворе, соприкасаясь со скелетом с определенной вероятностью, прилипают к нему, тем самым скелет увеличивается в размере до тех пор, пока не заполнит объем виртуального образца;

2) *CCA* (Cluster-Cluster Aggregation) – модель (Kolb, Botet, Jullien, 1983) в начальной стадии процесса формирует большое число маленьких фрактальных кластеров, которые в дальнейшем с определенной вероятностью могут объединяться в кластеры больших размеров.

Мы под фрактально-кластерным алгоритмом подразумеваем *CCA*-модель с варьированием числа кластеров и неизменной вероятностью прилипания частицы к скелету, равной  $I$ .

В любой модели неизбежны упрощения. Здесь приняты следующие ограничения:

а) структура сформированной твердой почвенной фазы обладает механической прочностью, однородностью химического и минералогического состава и устойчивостью к размыванию водным раствором;

б) вещество почвенного скелета полностью смачивается водой;

в) в общем случае рассматриваемая задача трехмерна, но здесь рассматривается только двумерный случай на плоскости;

г) предполагается, что если почвенные частицы во время хаотического движения сталкиваются с почвенным скелетом, то они становятся частью скелета и никогда не покидают его (вероятность прилипания равна  $I$ ).

С нашей точки зрения, указанные упрощения не должны существенно повлиять на общность выводов в рамках тематики данной статьи. Более того, некоторые из них могут принести практическую пользу. Например, решение задачи на плоскости позволит полученные результаты напрямую использовать в микроморфологическом анализе почвенных шлифов.

Для выявления степени влияния каждого фактора и их комбинаций на геометрические характеристики (зависимые переменные) порового пространства был проведен полный четырехфакторный модельный эксперимент на плоскости размером  $500 \times 500$  точек. Комбинация каждого фактора моделировалась в 5-кратной повторности. Опишем используемые факторы и геометрические характеристики:

#### *Факторы*

1. Фактор создания почвенного скелета (ФСПС) – предусматривает три изложенных выше подхода в формировании почвенного скелета: агрегатно-стохастический (присвоим этому алгоритму ранг, равный  $I$ ), равномерно-стохастический (ему соответствует ранг 2) и фрактально-кластерный (ранг 3).

2. Фактор размера почвенных частиц (ФРПЧ) – предполагает участие в модельном эксперименте частиц двух размеров мелких величиной в 1 пиксел (пк.) (ранг 0) и крупных частиц имеющих форму круга с радиусом 5 пак. (ранг 1) и площадью 80 пак. кв. Число градаций частиц по размеру сведено к двум для уменьшения вычислительной нагрузки.

3. Фактор общей пористости (ФОП) – имеет пять градаций значения пористости ( $S_{пор.}/S_{общ.}$ ): 1 – 30 %, 2 – 40 %, 3 – 50 %, 4 – 60 %, 5 – 70 %. Этот фактор имеет решающее значение, так как все основные характеристики порового пространства зависят от плотности упаковки почвенных частиц. Рассматривать эффекты от действия других интересующих нас факторов имеет смысл только через призму разных значений пористости.

4. Фактор плотности кластеров (ФПК) – выражается в относительных единицах числа кластеров на участке плоскости модели  $100 \times 100$  пк. и принимает три значения: 0,05 (ранг 1); 0,2 (ранг 2) и 0,35 (ранг 3). С точки зрения генезиса этот фактор может оказаться полезным, если в качестве затравок в кластерах принять минеральные элементы, к которым прилипают частички гумуса. Тогда количество кластеров на единицу площади (объема) может иметь принципиальное значение.

В данном исследовании выясняются значимости одновременного действия всех факторов и их доли на общий эффект. Количество градаций каждого фактора и шаг дискретизации выбирались в большей степени субъективно, исходя из значимости факторов, и являются результатом компромисса: с одной стороны, у персонального компьютера ограниченные вычислительные возможности и необходимо в процессе расчетов уложиться в разумный временной интервал, с другой стороны, необходимо стремиться к повышению универсальности модели, которая влечет за собой расширение диапазона значений факторов и более плавное их изменение.

#### *Зависимые переменные*

1. Порог протекания (пп) – важная случайная величина, значение которой равняется пористости модели, когда образуется бесконечная пора (пора протекания) при рассматриваемом масштабе. То есть пора, граничные размеры которой достигают одновременно либо левой и правой, либо верхней и нижней границ модели. По существу, решается задача узлов теории перколяции (Stauffer, 1985). Понятно, что при наличии бесконечной поры вода может протекать не только через модельное поле размером  $500 \times 500$  точек, но и (в случае экстраполяции аналогичного почвенного скелета за рамки поля) через плоскость бесконечных размеров. На рис. 1–3 бесконечные поры вблизи порога протекания закрашены в серый цвет, а почвенные частицы, составляющие скелет, – в черный. Порог протекания является той критической характеристикой, за пределами которого резко меняются водно-физические свойства почвы.

2. Фрактальная размерность пор (фрп) и фрактальная размерность скелета (фрс) – взаимозависимые величины, которые вычисляются по однотипному алгоритму геометрическим методом (Золотухин, 1998). Фрактальная размерность является одной из основных характеристик фрактальных систем и характеризует степень заполнения пор или скелетного пространства. В отличие от пористости, связанной в основном с размером пор, фрактальная размерность обусловлена в большей степени распределением пор в пространстве. Для простоты понимания можно сказать: чем больше отличается фрактальная размерность от величины, равной 2, тем более «рыхлой» является система. Фрактальная размерность имеет обоснованный физический смысл только для фрактально-кластерных моделей. В остальных изучаемых моделях эта величина случайна и имеет больше формальный характер. Ясно, что в процессе синтеза модели может появиться такой вариант, у которого фрактальная размерность будет значительно отклоняться от величины, равной 2.

Для более детального исследования геометрических характеристик модельного порового пространства нижеперечисленные переменные условно разбиты на три группы (фракции) по признаку площади  $S$  каждой поры. Поры и их характеристики при  $S < 100$  пк. назовем мелкими, при  $100 \leq S < 1000$  пк. – средними и при  $S \geq 1000$  пк. – крупными

3. Пористость и объем выборки пор – показатели долей пор соответствующего размера и их количества.

4. Суммарные длины периметра и факторы формы – характеризуют вклад каждой фракции в размер и сложность формы наиболее активной поверхности на границе между твердой и газообразной фазами. Напомним, что фактор формы вычисляется по формуле

$$K = 3,545 \sqrt{S/P},$$

где  $S$  и  $P$  – соответственно площадь и периметр поры.

5. Суммарные длины остова и усредненная ширина поры вдоль остова – величины, которые могут выражать степень пронизанности порами пористой среды и их доступность почвенной влаге. Остов поры строится в результате последовательного применения операции эрозии до появления связанной линии толщиной в 1 пк. Далее

подсчитывается ее длина ( $L$ ). Ширину ( $W$ ) поры можно приближенно определить по формуле  $W = S/L$ . Однако такое решение дает хорошие результаты не всегда. Для объектов, близких к правильной и простой геометрической форме и обладающих центральной симметрией, остов сходится к точке. Поэтому для мелких пор правильность вычисления ширины можно поставить под сомнение. Для средних и крупных пор, обладающих значительно более сложной формой, описанный прием вполне приемлем.

Заслуживает особого внимания идея вычисления вероятностных признаков (Маркин, 1963) почвенных пор. Любую пору можно представить в виде полной замкнутой системы, состоящей из четырех несовместных событий. На протяжении линейного элемента остова  $dx$  пора может:

- а) разветвиться на две и более поры либо может иметь место обратный процесс объединения нескольких пор в одну;
- б) начаться или закончиться, что равноценно;
- в) изменить свой радиус (ширину);
- г) остаться без изменений.

Исходя из перечисленных событий, вычисляются соответствующие признаки.

6. Усредненные коэффициенты пересекаемости остова поры  $\lambda$  – численно равны вероятности ветвления или слияния поры вдоль остова на отрезке длиной в 1 пк. Вероятность зависит от длины остова поры согласно формуле  $P_v = \lambda dx$ .

7. Усредненные коэффициенты прерываемости остова поры  $\tau$  – показывают вероятность окончания или начала поры вдоль остова на отрезке длиной в 1 пк. Вероятность вычисляется по формуле  $P_o = \tau dx$ .

8. Усредненные коэффициенты неоднородности ширины остова  $\phi$  – соответствуют вероятности расширения или сужения поры вдоль остова на отрезке длиной в 1 пк. Вероятность определяется по формуле  $P_p = \phi dx$ .

Большое количество факторов и зависимых геометрических характеристик, выбранных нами в той или иной степени, субъективно и отражает сложность изучаемой системы и в то же время создает определенные трудности при интерпретации и обобщении результатов. Не исключено, что некоторые величины дублируют друг друга, являясь отражением одного и того же явления.

Определимся с масштабом рассматриваемых геометрических моделей, от которого будет зависеть интерпретация результатов. В принципе мы вольны в процессе моделировании задавать любой масштаб.

Предположим, что минимальный размер элементарных почвенных частиц величиной в 1 пк. соответствует разрешающей способности светового микроскопа  $\approx 0,5$  мкм и относится к илистой фракции. Тогда линейный размер модельной плоскости равен  $0,5 \times 500 = 250$  мкм = 0,25 мм. Если за основу взять нанометровый диапазон размеров, соответствующий коллоидным системам, то тогда помимо явлений адсорбции и десорбции необходимо учитывать молекулярные квантово-механические эффекты, которые влияют на аномальные физические свойства связанной воды и выходят за рамки данного исследования.

К сожалению, из-за объективного ограничения вычислительной мощности современных ЭВМ представляется проблематичным решение в рамках одной модели задач, перекрывающих существенно больший диапазон размеров. Решение таких задач было бы полезным для анализа функциональных закономерностей порового пространства, сформированного широким спектром почвенных частиц – от коллоидов до крупного песка. Диапазон 0,1 мкм – 10 мм повлечет создание модельного поля размером  $10^5 \times 10^5$ , что потребует увеличения времени вычисления в 40 тысяч раз! В таких условиях ни о какой репрезентативности выборки говорить не приходится, поэтому единственным выходом из сложившейся ситуации является обобщение результатов, полученных на моделях малого размера, на сверхбольшие модели макроуровня.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Интересные закономерности, общие для всех факторов, выясняются при анализе тесноты взаимосвязи трех интегральных характеристик – порога протекания, фрактальной размерности пор и скелета и зависимых переменных в пределах пор каждой фракции (табл. 1–3). Для наглядности жирным шрифтом выделены числа по модулю  $> 0,8$ . Коэффици-

коэффициенты корреляции между характеристиками пор разных фракций имеют значения не более 0,5 и вследствие малой информативности в статье не приводятся.

Из табл. 1–3 видно, что наибольшее количество коэффициентов взаимной корреляции с высокими значениями характерно для геометрических характеристик мелкой группы пор (табл. 1). Большинство мелких пор не отличается структурным разнообразием и имеет примитивную форму, в связи с чем многие приведенные здесь геометрические

Таблица 1

**Коэффициенты взаимной корреляции геометрических характеристик мелкой фракции пор**

Показатель	пп	фрп	фрс	п	дп	фф	до	шо	кп	кпр	кн	ов
пп	1,00	0,42	-0,76	-0,57	-0,60	0,53	-0,60	-0,21	-0,24	-0,28	-0,25	-0,61
фрп	0,42	1,00	-0,35	0,16	0,11	-0,13	0,11	0,36	0,37	0,38	0,39	-0,03
фрс	-0,76	-0,35	1,00	0,64	0,65	-0,42	0,65	0,43	0,41	0,36	0,40	0,60
п	-0,57	0,16	0,64	1,00	<b>0,98</b>	-0,73	<b>0,98</b>	0,60	0,70	<b>0,80</b>	0,77	<b>0,80</b>
дп	-0,60	0,11	0,65	<b>0,98</b>	1,00	<b>-0,80</b>	<b>1,00</b>	0,46	0,56	0,74	0,66	<b>0,90</b>
фф	0,53	-0,13	-0,42	-0,73	<b>-0,80</b>	1,00	<b>-0,80</b>	-0,19	-0,29	-0,52	-0,37	<b>-0,86</b>
до	-0,60	0,11	0,65	<b>0,98</b>	<b>1,00</b>	<b>-0,80</b>	1,00	0,48	0,58	0,75	0,67	<b>0,89</b>
шо	-0,21	0,36	0,43	0,60	0,46	-0,19	0,48	1,00	<b>0,97</b>	0,76	<b>0,90</b>	0,09
кп	-0,24	0,37	0,41	0,70	0,56	-0,29	0,58	<b>0,97</b>	1,00	<b>0,83</b>	<b>0,95</b>	0,18
кпр	-0,28	0,38	0,36	<b>0,80</b>	0,74	-0,52	0,75	0,76	<b>0,83</b>	1,00	<b>0,95</b>	0,47
кн	-0,25	0,39	0,40	0,77	0,66	-0,37	0,67	<b>0,90</b>	<b>0,95</b>	<b>0,95</b>	1,00	0,31
ов	-0,61	-0,03	0,60	<b>0,80</b>	<b>0,90</b>	<b>-0,86</b>	<b>0,89</b>	0,09	0,18	0,47	0,31	1,00

Примечание. Все коэффициенты больше 0,1 и меньше -0,1 достоверны на уровне значимости 0,05; пп – порог протекания; фрп – фрактальная размерность пор; фрс – фрактальная размерность скелета; п – пористость; дп – суммарная длины периметра; фф – фактор формы; до – суммарная длина остова; шо – усредненная ширина поры вдоль остова; кп – усредненный коэффициент пересекаемости остова поры; кпр – усредненный коэффициент прерываемости остова поры; кн – усредненный коэффициент неоднородности ширины остова; ов – объем выборки пор.

признаки, разные по своей сути, оказываются коррелированными между собой. С увеличением размера пор все становится на свои места, и большинство признаков, за исключением некоторых, отражает соответствующие геометрические особенности.

Таблица 2

**Коэффициенты взаимной корреляции геометрических характеристик средней фракции пор**

Показатель	пс	дпс	ффс	до	шо	кп	кпр	кн	ов
пп	-0,54	-0,52	0,48	-0,53	-0,28	-0,21	-0,18	-0,21	-0,53
фрп	0,03	0,14	-0,01	0,11	-0,34	0,02	0,02	-0,15	0,09
фрс	0,50	0,51	-0,56	0,51	0,17	0,23	0,20	0,14	0,53
п	1,00	<b>0,95</b>	-0,52	<b>0,98</b>	0,29	0,32	0,29	0,26	<b>0,95</b>
дп	<b>0,95</b>	1,00	-0,54	<b>0,99</b>	0,20	0,35	0,29	0,24	<b>0,98</b>
фф	-0,52	-0,54	1,00	-0,54	0,06	0,20	0,27	0,36	-0,53
до	<b>0,98</b>	<b>0,99</b>	-0,54	1,00	0,23	0,34	0,29	0,25	<b>0,98</b>
шо	0,29	0,20	0,06	0,23	1,00	0,58	0,47	0,67	0,22
кп	0,32	0,35	0,20	0,34	0,58	1,00	<b>0,86</b>	<b>0,89</b>	0,34
кпр	0,29	0,29	0,27	0,29	0,47	<b>0,86</b>	1,00	<b>0,87</b>	0,32
кн	0,26	0,24	0,36	0,25	0,67	<b>0,89</b>	<b>0,87</b>	1,00	0,25
ов	<b>0,95</b>	<b>0,98</b>	-0,53	<b>0,98</b>	0,22	0,34	0,32	0,25	1,00

Примечание. Все коэффициенты больше 0,1 и меньше -0,1 достоверны на уровне значимости 0,05. Обозначения такие же, как в табл. 1.

Во всех трех фракциях можно заметить общие закономерности. Так, пористость тесно связана с суммарной длиной периметра и суммарной длиной остова пор. Причем значения коэффициента взаимной корреляции уменьшаются по мере роста размеров

пор. Корреляционная связь ослабевает с увеличением размеров, так как форма пор становится более сложной. При этом, как и следовало ожидать, связь между длиной периметра и длиной остова остается сильной независимо от размеров пор. Для мелкой фракции мы имеем коэффициент взаимной корреляции, равный 1, то есть строго линейную зависимость. Для наших целей эти две величины можно считать равнозначными. К перечисленным близко связанным величинам можно отнести и количество пор (объем выборки), но исключительно для мелкой и средней фракции. В то же время число крупных пор необходимо рассматривать независимо, поскольку самый большой коэффициент взаимной корреляции с другими переменными не превышает 0,6 (усредненный коэффициент прерываемости остова крупной поры).

Таблица 3

**Коэффициенты взаимной корреляции геометрических характеристик крупной фракции пор**

Показатель	п	дп	фф	до	шо	кп	кпр	кн	ов
пп	<b>0,85</b>	0,69	-0,15	0,76	0,35	0,30	0,00	0,29	-0,40
фрп	0,50	0,57	-0,40	0,57	-0,08	0,43	0,19	0,13	-0,03
фрс	<b>-0,86</b>	-0,47	-0,06	-0,60	-0,69	-0,29	-0,17	-0,53	0,10
п	1,00	<b>0,85</b>	-0,15	<b>0,92</b>	0,52	0,49	0,17	0,50	-0,09
дп	<b>0,85</b>	1,00	-0,31	<b>0,99</b>	0,19	0,60	0,16	0,33	-0,04
фф	-0,15	-0,31	1,00	-0,28	0,64	0,36	0,58	0,64	0,22
до	<b>0,92</b>	<b>0,99</b>	-0,28	1,00	0,28	0,58	0,15	0,38	-0,07
шо	0,52	0,19	0,64	0,28	1,00	0,54	0,61	<b>0,91</b>	0,33
кп	0,49	0,60	0,36	0,58	0,54	1,00	0,77	<b>0,82</b>	0,37
кпр	0,17	0,16	0,58	0,15	0,61	0,77	1,00	<b>0,84</b>	0,60
кн	0,50	0,33	0,64	0,38	<b>0,91</b>	<b>0,82</b>	<b>0,84</b>	1,00	0,46
ов	-0,09	-0,04	0,22	-0,07	0,33	0,37	0,60	0,46	1,00

Примечание. Все коэффициенты больше 0,1 и меньше -0,1 достоверны на уровне значимости 0,05. Обозначения такие же, как в табл. 1.

К следующей группе можно отнести вероятностные характеристики (усредненный коэффициент пересеканости остова крупной поры  $\lambda$ , усредненный коэффициент прерываемости остова крупной поры  $\tau$ , усредненный коэффициент неоднородности ширины остова  $\phi$  крупной поры) и приближенную ширину остова поры. Тесная корреляционная связь между тремя коэффициентами наблюдается во всех фракциях. Прослеживается также взаимосвязь ширины остова с остальными характеристиками группы. Указанная тенденция нечетко проявляется только в порах средней крупности. Это можно объяснить не совсем удачным выбором границ фракции либо, вероятнее всего, малым количеством фракций. Мы сталкиваемся с ситуацией, когда во фракцию пор среднего размера попадают сильно отличающиеся по структуре и по ширине поры, что подтверждает высокое значение дисперсии. Логично заметить, что ширина остова для средней и крупной группы пор сильнее всего связана с коэффициентом неоднородности ширины поры (коэффициенты взаимной корреляции соответственно составляют 0,61 и 0,91).

Заслуживает отдельного рассмотрения фактор формы, так как он тесно не связан ни с остальными признаками во всех фракциях, являясь при этом производной величиной от площади и периметра.

Далее исходя из изложенных соображений объединим зависимые переменные по тесноте связи в соответствующие группы, в пределах которых будем использовать их в едином смысловом контексте.

К полученным в ходе вычислительного эксперимента с пятью повторностями опыта данным с общим объемом выборки  $3 \times 2 \times 5 \times 3 \times 5 = 450$  был применен многофакторный дисперсионный анализ. Рассматривается модель с фиксированными эффектами четырех пересекающихся факторов. Результаты анализа в виде коэффициента Фишера для каждой зависимой переменной приведены в табл. 4. (Напомним, что  $F$ -критерий определяется как отношение внутригрупповой дисперсии к межгрупповой.) Помимо этого



далее приведены графики изменения средних значений наиболее показательных переменных в зависимости от действия разных факторов с нанесением стандартных отклонений в виде «усов».

К интересным выводам можно прийти, анализируя табл. 4. Только независимое действие двух факторов – ФСПС и ФОР достоверно для всех зависимых геометрических признаков. Их можно отнести к наиболее значимым. В комбинациях факторов выделяются следующие сочетания: ФСПС–ФОР, ФРПЧ–ФОР, ФСПС–ФРПЧ–ФОР. Характерно присутствие во всех комбинациях фактора общей пористости. Это подтверждает мысль, что при моделировании большинства процессов, происходящих в почве, необходимо учитывать плотность сложения почвенных частиц.

К наиболее малозначимому, особенно на характеристики средней фракции, можно отнести фактор размера почвенных частиц. Этот эффект можно обосновать отчасти присутствием частиц всего двух размеров, возможно, мало отличающихся при данном масштабе. С другой стороны, частицу большой площади и сколь угодно сложной формы можно сформировать из малых частиц упрощенной формы. Этот факт, по-видимому, также отражается на результатах дисперсионного анализа. Иными словами, система, состоящая из частиц меньшего размера, является более гибкой в смысле формирования сложной структуры. В природе подобное наблюдается на структуре глинистых и песчаных почв. Однако при пересечении с другими факторами действие ФРПЧ более эффективно, что отражает сложность организации рассматриваемой системы. Подробнее коэффициенты Фишера сложных факторов для каждой переменной рассмотрены ниже.

#### *Порог протекания*

Значение этого показателя трудно переоценить. Он тесно связан отрицательно с фрактальной размерностью твердого почвенного скелета (коэффициент взаимной корреляции равен  $-0,76$ ) и положительно – с крупной пористостью (коэффициент взаимной корреляции равен  $0,85$ ). Полученные результаты легко объяснить. Чем более разветвленная структура у почвенного скелета и соответственно лучшее заполнение почвенного пространства (отражается в росте фрактальной размерности), тем меньше шансов сформироваться поре бесконечного размера. В то же время понятно, чем больший процент пористости приходится на крупные поры, тем вероятнее протекание. При этом число самих пор не должно быть большим. Это подтверждает отрицательный коэффициент взаимной корреляции с объемами выборки пор из разных фракций.

Ожидаемым результатом является высокая значимость действия ФОР (коэффициент Фишера равен  $480,3$ ). Понятно, что с ростом общей пористости порог протекания ведет себя аналогичным образом. Ясно также действие ФРПЧ (коэффициент Фишера равен  $81,4$ ), присутствие частиц большого размера, которые своим присутствием могут перекрывать вероятные пути протекания, увеличивают значения порога. Действие остальных факторов не столь однозначно и, несмотря на невысокую значимость ФПК (коэффициент Фишера равен  $30,3$ ) и ФСПС (коэффициент Фишера равен  $4,2$ ), заслуживает оценки (табл. 5).

В случае с ФПК присутствие большого числа кластеров, вокруг которых формируется твердая почвенная фаза, приводит к затруднению появления поры протекания при заданной пористости и протекание может наступить только при большей пористости. Проявление ФСПС обусловлено более тонкими эффектами, связанными с особенностями расположения почвенных частиц друг относительно друга. При упорядоченном сложении частиц протекание возникает при меньшей пористости. Здесь имеет значение соотношение внутри- и межагрегатной пористости. То есть с экологической точки зрения более сложная структурная организация предпочтительнее, особенно для переуплотненных почв.

#### *Фрактальные размерности*

Поровая фрактальная размерность и фрактальная размерность скелета величины – антагонисты. Чем лучше заполняет почвенное пространство твердая фаза, тем менее вероятно удачное размещение порового пространства. Этот факт наглядно демонстрируют графики (рис. 4, 5). Когда фрактальная размерность пор увеличивается, фрактальная размерность скелета уменьшается и наоборот.

F-критерии пересечений всех факторов для геометрических характеристик модельного порового пространства

Зависимые переменные	Факторы и их комбинации													
	ФСПС	ФРПЧ	ФОП	ФПК	ФСПС* ФРПЧ	ФСПС* ФОП	ФСПС* ФПК	ФРПЧ* ФОП	ФРПЧ* ФПК	ФОП* ФПК	ФСПС* ФРПЧ* ФОП	ФСПС* ФРПЧ* ФПК	ФРПЧ* ФОП* ФПК	ФСПС* ФРПЧ* ФОП* ФПК
пп	4,2	81,4	480,3	30,3	2,5	46,8	5,5	8,3	8,3	108,2	51,2	314,9	8,6	3,0
фрп	9021,9	23921,2	29376,6	8798,0	1159,4	3730,2	3073,5	903,0	189,1	108,2	51,2	314,9	20,6	6,9
фрс	18218,1	8161,7	36218,1	11731,0	989,1	79,1	3755,0	298,5	212,4	6,5	73,6	87,2	4,4	1,9
п	9987,5	271,0	6899,4	2634,5	2175,2	1004,0	950,7	246,9	235,2	235,2	12,9	450,1	19,6	6,3
лп	10059,7	308,3	11782,8	4498,4	3295,9	1322,2	1537,0	530,3	176,9	176,9	101,6	190,0	29,6	9,9
фф	1494,5	26,2	5590,3	2654,5	390,1	2265,2	1267,6	575,9	190,9	20,2	101,6	335,8	23,3	9,7
до	9418,5	278,7	10237,0	3909,5	2862,9	1190,3	1334,0	451,4	169,9	169,9	7,4	159,3	26,5	8,0
шо	3338,9	5,8	448,4	464,1	348,0	71,2	184,0	17,9	11,2	17,9	59,5	18,6	5,3	4,1
кп	3868,9	21,4	576,9	366,5	451,7	113,7	216,6	4,3	4,3	69,4	3,8	19,9	3,3	3,2
кпр	2395,1	18,3	327,8	517,5	509,3	119,1	184,2	6,9	6,9	34,5	2,7	34,6	8,8	4,9
кн	8108,5	66,8	798,0	860,7	785,1	226,6	427,2	42,0	8,7	89,5	40,0	40,0	8,8	7,2
ов	5411,3	128,5	20235,1	7382,5	4408,0	1055,2	2174,8	1334,6	52,2	88,8	12,9	450,1	37,2	14,4
п	169,4	739,7	503,5	9,8	229,8	130,7	122,1	67,2	5,4	37,4	21,8	21,8	21,4	6,6
лп	210,5	4,0	821,3	487,3	286,2	151,7	104,6	58,6	4,9	44,8	16,7	16,7	18,6	5,1
фф	23,5	27,8	29,7	7,6	5,1	5,9	9,5	3,2	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
до	126,9	762,7	490,1	8,0	248,9	144,0	108,4	60,6	4,9	39,6	17,5	17,5	19,5	5,7
шо	61,8	20,3	40,4	3,3	16,8	27,2	4,1	2,4	4,0	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6
кп	15,9	28,2	28,2	9,7	11,9	35,1	2,4	2,4	4,0	13,1	13,1	13,1	13,1	13,1
кпр	4,8	14,4	14,4	10,3	10,3	18,0	9,5	9,5	9,5	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2
кн	21,9	5,1	20,5	23,1	10,1	19,0	156,1	66,3	5,0	76,1	23,9	23,9	15,4	5,9
ов	473,4	1085,6	624,4	23,1	455,0	189,3	156,1	66,3	5,0	76,1	23,9	23,9	15,4	5,9
п	2087,9	6616,7	37036,6	1903,8	445,8	291,6	454,6	198,8	3,2	62,0	54,1	54,1	35,3	8,9
лп	1283,1	2130,6	13430,9	301,2	1150,4	240,5	194,5	317,9	29,5	59,8	13,9	86,1	18,9	4,4
фф	318,4	67,6	132,9	7,9	67,6	34,9	30,9	21,4	10,7	33,1	15,5	14,3	16,8	44,8
до	577,1	3687,2	19806,7	65,9	1073,1	246,6	84,9	333,5	11,5	56,6	6,1	94,7	21,2	5,1
шо	3611,0	182,2	955,0	2404,8	167,2	88,4	590,3	74,7	35,9	50,4	25,8	33,4	19,1	49,7
кп	267,6	498,0	1241,4	54,5	292,7	172,0	79,8	65,7	25,8	100,4	20,4	27,9	10,0	38,7

Продолжение табл. 4

Зависимые переменные	Факторы и их комбинации						
	ФСПС	ФРПЧ	ФОП	ФПК	ФСПС* ФРПЧ	ФСПС* ФОП	ФРПЧ* ФОП
кпр	359,4	164,2	460,4	24,3	25,7	112,6	129,6
кн	1632,8	378,6	1276,0	621,8	38,3	268,1	200,2
ов	170,7	4,8	224,4	15,9		30,8	89,0

Окончание табл. 4

Зависимые переменные	Факторы и их комбинации							
	ФСПС* ФПК	ФРПЧ* ФПК	ФОП* ФПК	ФСПС* ФРПЧ* ФОП	ФСПС* ФРПЧ* ФПК	ФСПС* ФОП* ФПК	ФРПЧ* ФОП* ФПК	ФСПС* ФРПЧ* ФОП* ФПК
кпр	22,6	14,8	52,4	53,7	11,9	25,1	13,2	31,7
кн	145,3	32,9	114,1	112,4	30,0	48,1	25,9	67,6
ов	4,9		39,0	10,0	2,5	11,9	21,8	8,2

Примечание. Значения недостоверных критериев не приведены. Обозначения такие же, как в табл. 1.

Более сильную корреляционную связь с остальными геометрическими характеристиками в мелкой и средней фракции имеет фрактальная размерность скелета, только в крупной фракции коэффициент взаимной корреляции с фрактальной размерностью пор возрастает. Во влиянии факторов на фрактальные размерности можно выделить несколько особенностей.

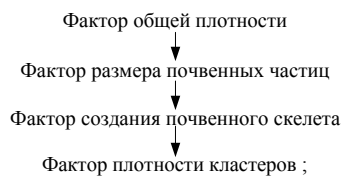
Таблица 5

**Статистические оценки порога протекания при действии факторов создания почвенного скелета и плотности кластеров**

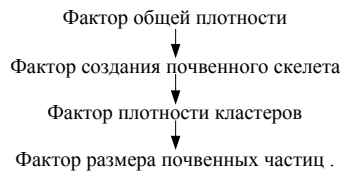
Оценка	Фактор создания почвенного скелета			Фактор плотности кластеров	
	равномерный	агрегатный	фрактальный	мало кластеров	много кластеров
$\bar{X}$	0,61	0,54	0,56	0,53	0,61
$\sigma$	0,03	0,07	0,04	0,08	0,03

Выстроим факторы по эффектам влияния в порядке убывания.

а) фрактальная размерность пор:



б) фрактальная размерность скелета:



Как и в случае с порогом протекания, наблюдается главенствующее действие ФОП, а далее расстановка сил меняется коренным образом. Более интересен вариант с фрактальной размерностью скелета, где способ формирования скелета гораздо важнее плотности кластеров, а влияние размера частиц минимально.

Из графиков (рис. 4 и 5) видно, что увеличение количества кластеров уменьшает разброс фрактальных размерностей и в пределе, согласно теоретическим представлениям, графики должны трансформироваться в единую прямую, пересекающую ось ординат в значении 2 и параллельную оси абсцисс. Там же можно наблюдать существенное

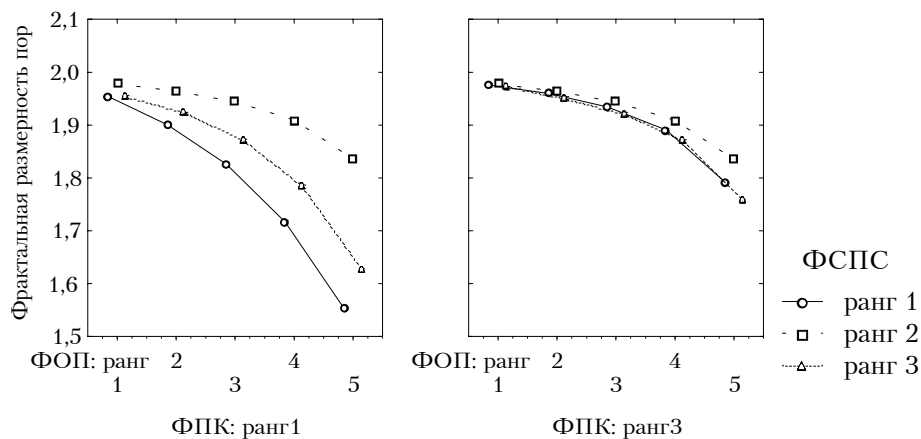


Рис. 4. Изменение среднего значения поровой фрактальной размерности при воздействии трех факторов (ФОП, ФСПС, ФПК)

отличие средних значений фрактальных размерностей между случайным (ФСПС с рангом, равным 2) и закономерными (ФСПС с рангом, равным 1 и 3) способами организации почвенных частиц. Различия ослабевают с ростом плотности кластеров (ФПК с рангом, равным 3), а также увеличением плотности (ФОП с рангом, равным 5) для фрактальной размерности скелета и уменьшением плотности (ФОП с рангом, равным 1) для

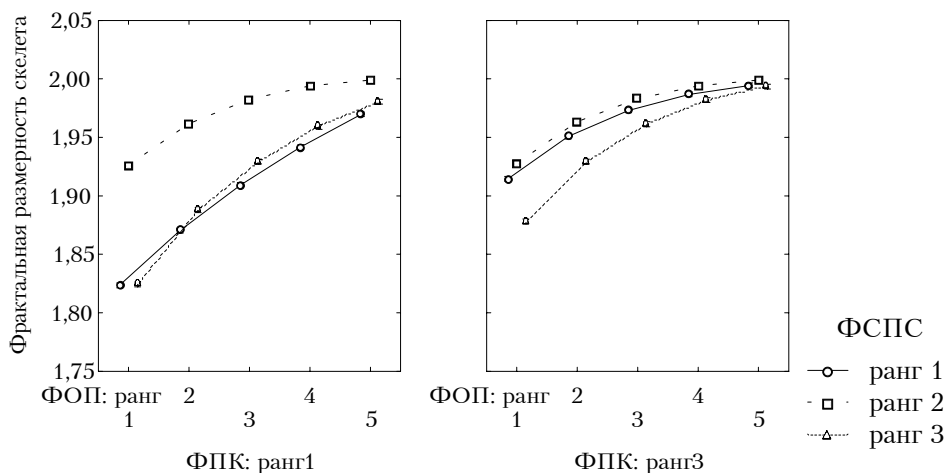
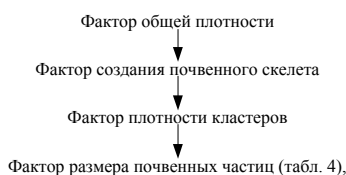


Рис. 5. Изменение среднего значения фрактальной размерности твердого скелета при воздействии трех факторов (ФОП, ФСПС, ФПК)

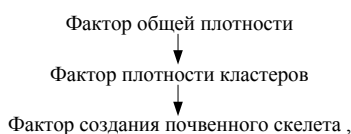
фрактальной размерности пор. Перечисленные факты говорят о полезности применения фрактальной размерности как интегральной геометрической характеристики почвенной структуры. По крайней мере, в рамках поставленной задачи фрактальная размерность почвенного скелета обладает большей информативностью по сравнению с пористой фрактальной размерностью.

*Пористость, длина периметра, длина остова и объем выборки пор*

Группа связанных величин кроме объема выборки крупных пор изменяется сходным образом при воздействии изучаемых факторов. Формула факторных эффектов для мелкой фракции имеет вид



за исключением мелкой пористости, где на первое место по значимости выходит ФСПС. Для средней фракции последовательность факторов следующая:



здесь фактором размера частиц можно пренебречь. Описанная ситуация может измениться, если в модели будут участвовать частицы гораздо больших размеров. В обеих фракциях (рис. 6 и 7) наблюдается явный максимум (около 50 %) пористости (ФОП с рангом, равным 3) при всех вариантах сложения почвенных частиц, особенно при большой плотности кластеров. Различия между методами формирования почвенного скелета, наоборот, сильнее при малой плотности кластеров.

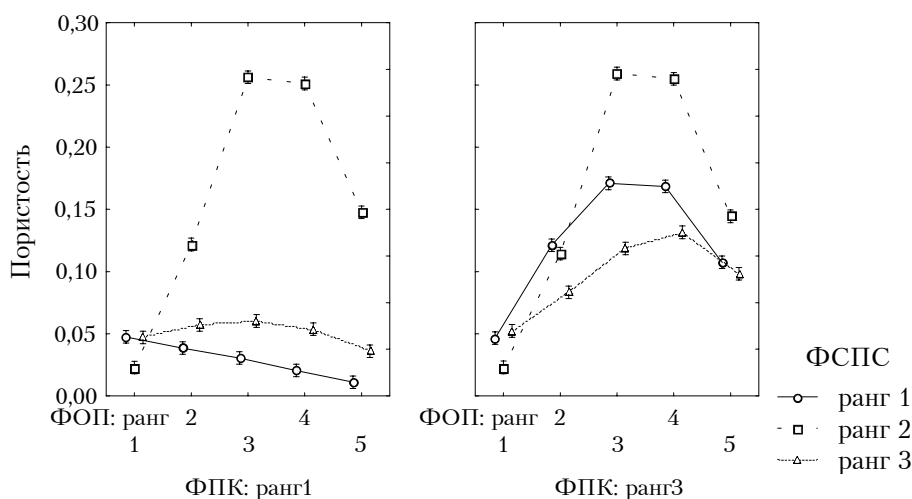
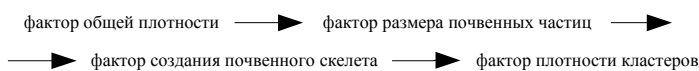


Рис. 6. Изменение среднего значения мелкой пористости при воздействии трех факторов (ФОП, ФСПС, ФПК)

Закономерности изменения геометрических характеристик крупных пор несколько отличаются. Значимость факторных эффектов



отлична от других фракций возрастанием роли размера почвенных частиц. С увеличением плотности почвы площадь крупных пор закономерно уменьшается (рис. 8). С нашей точки зрения явного максимума не прослеживается из-за смещения его за пределы графика вправо.

Интересно проследить, как меняются зависимости во всех фракциях при разных методах сложения частиц. Мелкая пористость преобладает при равномерно-стохастическом способе (ФСПС с рангом, равным 2), два других метода близки друг к другу.

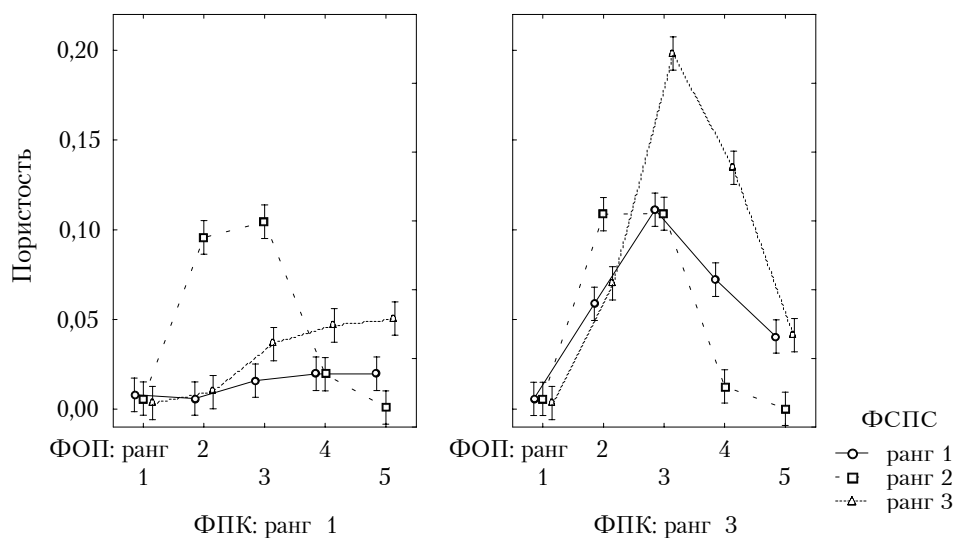


Рис. 7. Изменение среднего значения средней пористости при воздействии трех факторов (ФОП, ФСПС, ФПК)

средней пористости возрастает при фрактально-кластерном методе (ФСПС с рангом, равным 3), особенно при уплотненной почве (ФОП с рангом, равным 3, 4 и 5). Для крупной пористости указанные тенденции не так заметны, и все же при малом количестве кластеров проявляются преимущества агрегатно-стохастического (ФСПС с рангом, равным 1) и фрактально-кластерного подходов.

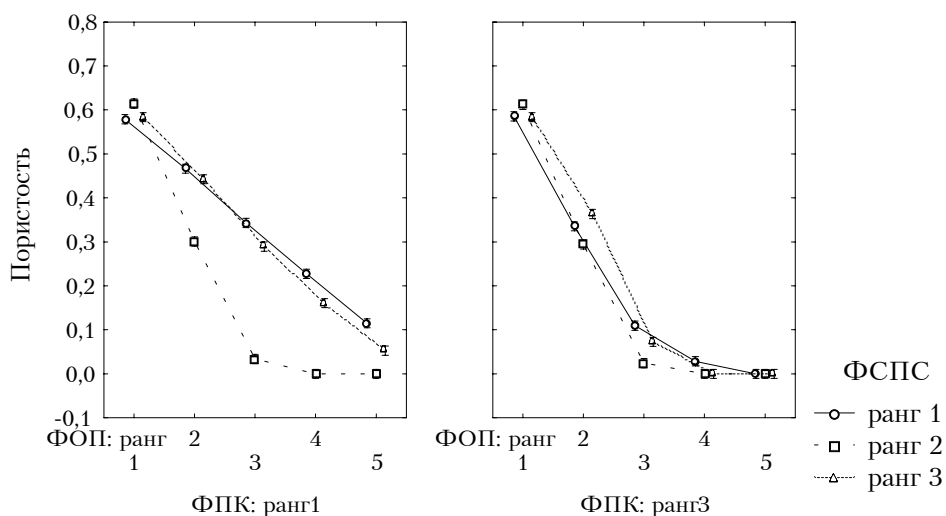


Рис. 8. Изменение среднего значения крупной пористости при воздействии трех факторов (ФОП, ФСПС, ФПК)

*Коэффициенты пересекаемости, прерываемости, неоднородности и приближенная ширина остова поры*

Анализ коэффициента взаимной корреляции показал, что эти зависимые величины обладают сходной изменчивостью. Поэтому на графиках (рис. 9–11) приведен только

коэффициент неоднородности как наиболее показательный. Для мелкой фракции пор при малом числе кластеров и равномерно-стохастическом способе организации частиц (ФСРС с рангом, равным 2) кривая имеет вид параболы с максимумом в 50 % плотности (рис. 9). Зато при двух других способах коэффициент неоднородности практически не изменяется. При увеличении числа кластеров только фрактально-кластерный метод остается не чувствительным к изменению пористости.

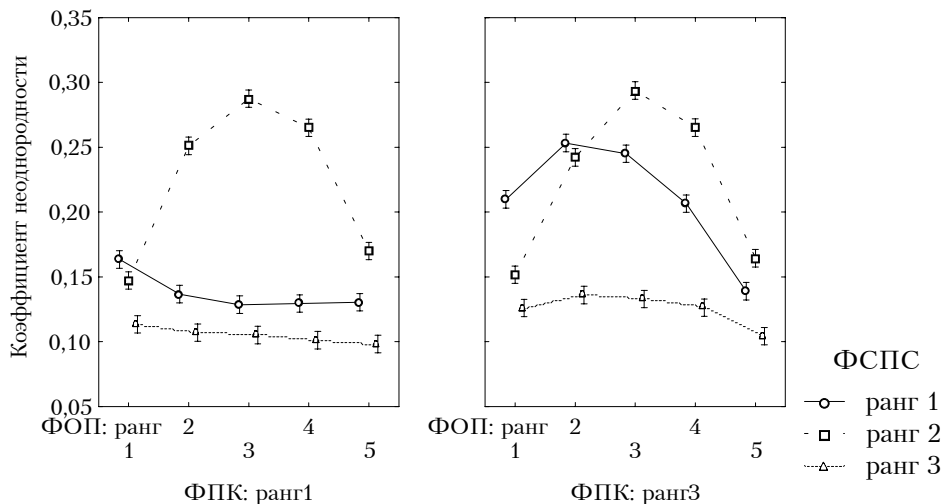


Рис. 9. Изменение среднего значения коэффициента неоднородности мелкой фракции пор при воздействии трех факторов (ФОП, ФСРС, ФПК)

Описанные тенденции в основном наблюдаются и в средней фракции пор. Однако за счет большого разброса значений коэффициентов эта фракция в рассматриваемом ракурсе мало показательна (рис. 10). Здесь отметим резкое снижение значений признаков данной группы при высокой (70 %) плотности в случае равномерно-стохастического метода.

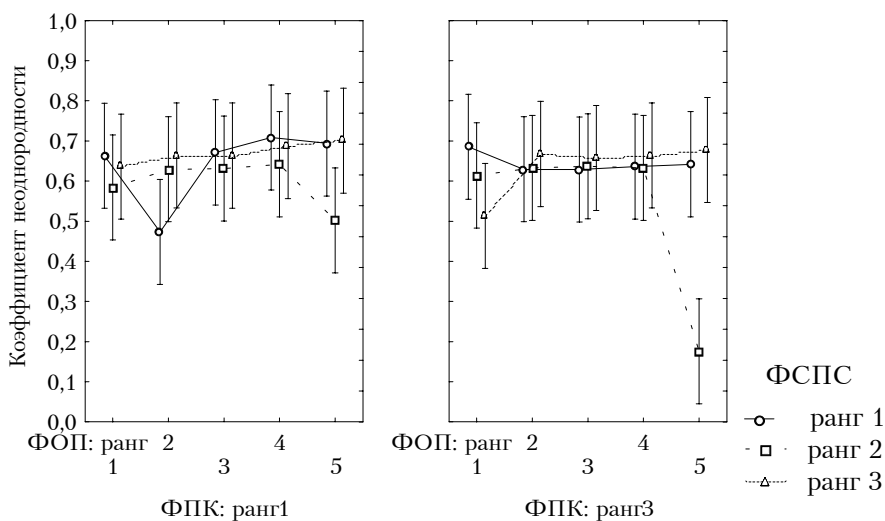


Рис. 10. Изменение среднего значения коэффициента неоднородности средней фракции пор при воздействии трех факторов (ФОП, ФСРС, ФПК)

Наиболее характерная изменчивость геометрических характеристик этой группы проявляется в крупной фракции пор. Высокое значение коэффициента неоднородности (0,7) неизменно при разных пористостях для малой плотности кластеров и ФСРС (ранг 1 и 3)

(рис. 11). В случае ФСПС (с рангом, равным 2) значение коэффициента неоднородности снижается до нуля уже при 60 % плотности. Если плотность кластеров высока, то способ формирования почвенного скелета практически не имеет значения. Судя по всему, существует какое-то критическое значение плотности кластеров, выше которого описанные закономерности нарушаются.

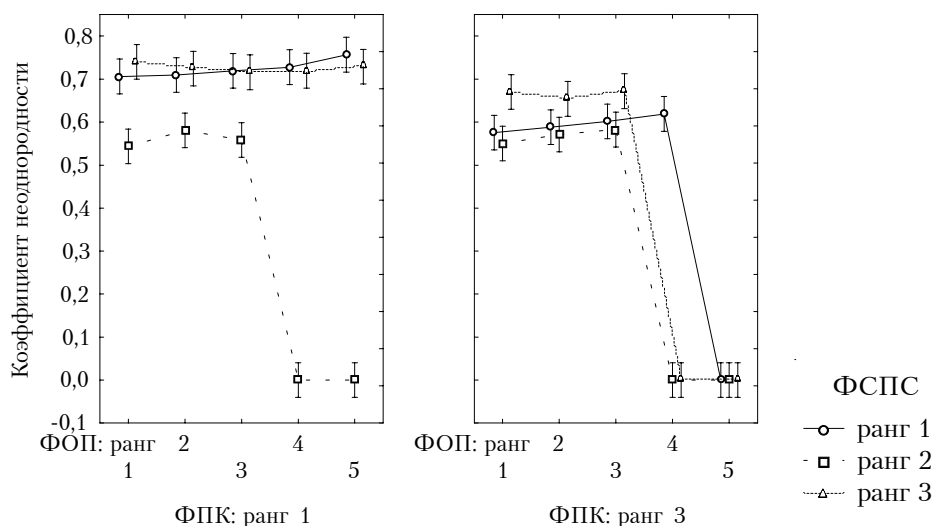


Рис. 11. Изменение среднего значения коэффициента неоднородности крупной фракции пор при воздействии трех факторов (ФОП, ФСПС, ФПК)

На наш взгляд, важное преимущество фрактально-кластерного метода синтеза почвенного скелета заключается в том, что изменение ширины поры и вероятность ее ветвления вдоль остова мало зависят от степени уплотнения почвы. Проблема переуплотнения почвы особенно актуальна для агроценозов (Медведев, 2002).

#### Фактор формы и количество крупных пор

Два последних признака, участвующих в эксперименте, не связаны друг с другом, но заслуживают внимания. Вследствие большого разброса значений фактор формы средней фракции пор не рассматривается. По кривым видно, что фрактально-кластерный способ обуславливает формирование мелкой фракции пор ближе всего к линейной зависимости (рис. 12). Факторы формы равномерно- и агрегатно-стохастического способов организации частиц резко меняются с увеличением плотности, причем в противоположных направлениях: один возрастает, другой – уменьшается.

Крайне неравномерно изменяется фактор формы при равномерно-стохастическом способе и в крупной фракции пор (рис. 13). Наблюдается всплеск значений при плотности 50 %. Оставшиеся способы формирования почвенного скелета изменяются более гладко, но только при малой плотности кластеров. При большой плотности кластеров у всех методов изменение фактора формы имеет сходную картину.

Стоит обратить внимание на число пор в крупной фракции (рис. 14). Динамика этого показателя сильно отличается от аналогичных величин в других фракциях. Из графика видно, что максимальное количество пор большого размера приходится на фрактально-кластерный метод синтеза твердой фазы почвы при разных плотностях кластеров. Логика рассуждений здесь следующая: так как площади всех моделей одинаковы, то при равных плотностях большее число крупных пор говорит о присутствии пор либо сравнительно меньшей площади, либо более сложной формы. Оба варианта способствуют большему разнообразию геометрии порового пространства. Следует отметить, что пик всех кривых приходится на 50–60 % общей плотности (ФОП с рангами, равными 3 и 4). В случае низких и высоких пористостей модели объема выборки крупных пор – близкие.



Во всех приведенных графиках (рис. 4–14) учтено присутствие в модели крупных частиц и не отражается влияние фактора размера почвенных частиц. В этой связи заметим лишь, что при отсутствии влияния частиц большого размера графики имеют подобную форму, но смещены вдоль оси абсцисс вправо.

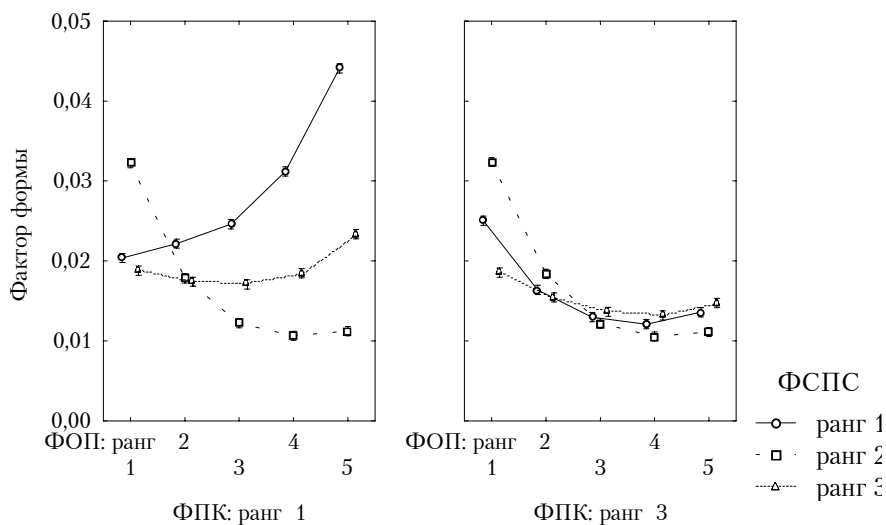


Рис. 12. Изменение среднего значения фактора формы мелкой фракции пор при воздействии трех факторов (ФОП, ФСПС, ФПК)

Исходя из вышесказанного попробуем описать идеальную почву с точки зрения структуры почвенного скелета, приспособленного для роста и развития корневых систем растений.

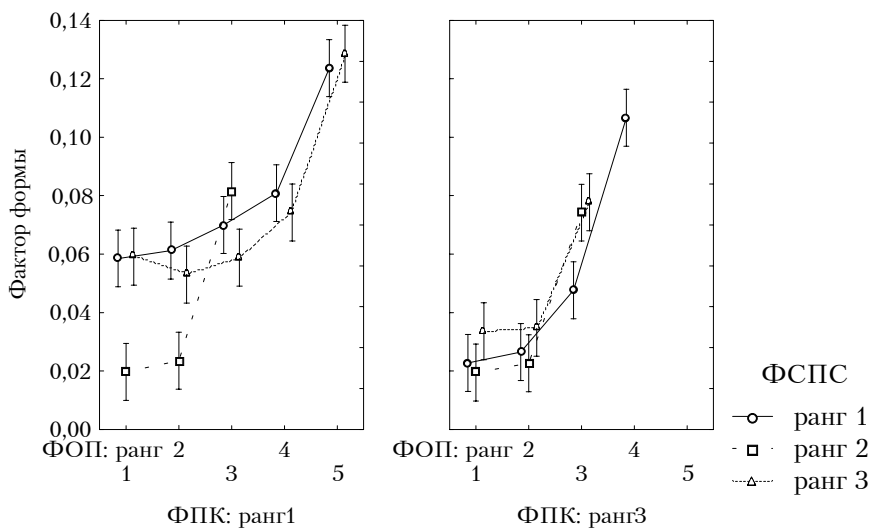


Рис. 13. Изменение среднего значения фактора формы крупной фракции пор при воздействии трех факторов (ФОП, ФСПС, ФПК)

Во-первых, ситуация, когда пористость имеет высокое значение, но не превышает порог протекания, более предпочтительна. Тогда большая часть выпавших осадков в виде дождя не стечет по поверхности, а просочится в почву, но при этом не попадет в грунтовые воды. Вода распределяется в почвенной толще в большом объеме, проходит достаточно глубоко. Причем чем ближе значение пористости к порогу протекания при данной

конфигурации почвенных частиц, тем глубже проникает влага. Это способствует росту растений с глубокой корневой системой, а значит, более приспособленной к изменениям климатических условий.

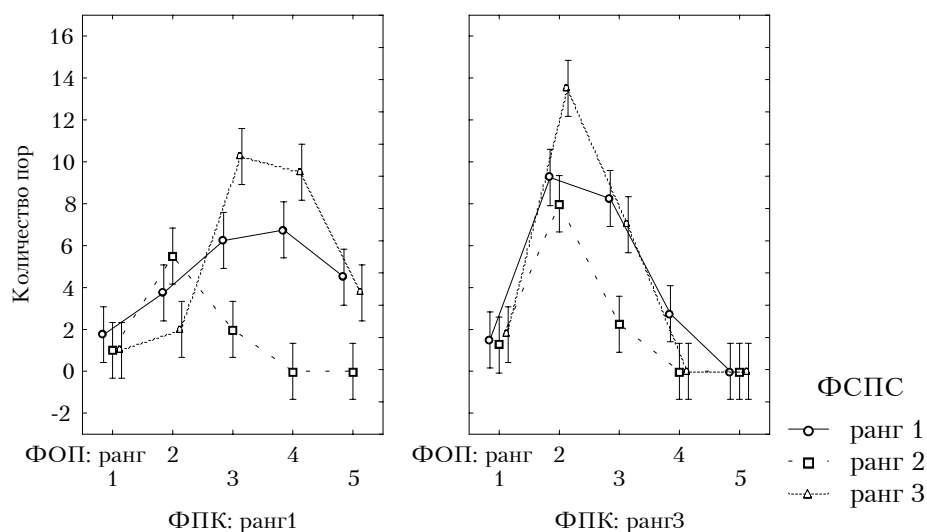


Рис. 14. Изменение среднего значения количества крупных пор при воздействии трех факторов (ФОП, ФСПС, ФПК)

Во-вторых, почвенные поры должны быть представлены в широком спектре радиусов – от самых мелких (1 мкм) до очень крупных (1 мм), обладающих сильно разветвленной структурой. В условиях засушливого лета, характерного для степной Украины, с одной стороны, очень полезна высокая водоудерживающая способность почвы, чему способствуют мелкие поры, заполненные водой, с другой стороны, нужна хорошая аэрация почвы, которую обеспечивают крупные поры. Вода, удерживаемая капиллярными силами в почвенных порах в противовес силе тяжести, доступна для растений. Высокое разнообразие почвенных пор позволяет растениям затрачивать минимум энергии на рост корней и корневых волосков, заполняя жизненно важное почвенное пространство, и успешно реализовывать возможности своего развития. Растения легко преодолевают механическое сопротивление грунта и постоянно получают воду с минеральными элементами из окружающей среды независимо от частоты выпадения осадков.

В-третьих, необходимо учитывать, что вода в почвенных порах находится в постоянной динамике. Этому способствуют многие факторы, среди которых в вегетационный период особенно выделяется сосущая сила корней. Поглощая воду из прилегающих к его поверхности почвенных пор, корень создает вокруг себя зону пониженной увлажненности. В результате вода перемещается по соединенным между собой многочисленным капиллярам вдоль возникающего градиента, стремясь занять положение устойчивого равновесия. Начиная потреблять почвенную влагу, корень вначале всасывает ее из самых широких и доступных пор (10–50 мкм), где она наименее удерживается капиллярными силами. Далее остаются заполненными водой только более узкие (1–5 мкм) и извилистые капилляры. Для поглощения этой воды растению необходимо затратить дополнительную энергию. По мере истощения водных ресурсов в этом микрообъеме корень вынужден совершать механическую работу по «разведке» новых мест богатой влагой и, следовательно, часть питательных веществ направить на рост новых корешков. Поэтому в идеальном случае корню необходима такая поровая структура почвы, которая позволит воде беспрепятственно перемещаться в зону пониженной увлажненности, образовавшейся вокруг корешка из соседних зон, насыщенных влагой.

Необходимо учитывать, что на различные участки почвенного скелета периодически попадает вода. При доступе воздуха к поверхностям почвенных микроструктур преобладают процессы минерализации, обогащая почву элементами минерального питания.

Увлажнение того же участка приводит к процессам гумификации. В бесструктурных почвах иссушение и увлажнение связаны исключительно с осадками. Дождь прошел, почва намочилась, и спустя некоторое время в результате физического и физиологического испарения почва высыхает до следующего дождя. В хорошо оструктуренных почвах за счет деятельности растений и пространственного перераспределения влаги происходят более сложные процессы. Чем чаще происходит смена процессов увлажнения и иссушения, тем больше у растений возможностей взять из почвы минеральные ресурсы. Разветвленная структура порового пространства почвы предоставляет растению возможность использовать воду бережно, растягивая потребление влаги во времени и обеспечивая высокую динамику перемещения воды по капиллярам. Такое возможно только в эдафотопе с высокой концентрацией пор разного размера, формы и ориентации.

## ВЫВОДЫ

Проведенные вычислительные эксперименты наглядно показали, что основные геометрические характеристики порового пространства зависят от всех четырех исследуемых факторов. При этом в большей степени имеют влияние общая пористость почвы и способ формирования почвенного скелета, чем плотность кластеров и размер элементарных почвенных частиц. Иными словами, почвенные процессы сильнее влияют на разнообразие геометрии порового пространства и зависящие от нее свойства, чем исходный гранулометрический состав. Чем мельче почвенные частицы, тем они подвижнее и в присутствии сил различной природы вероятнее образуют сложные почвенные структуры. Это явление можно наблюдать в природе, сравнивая песчаные и глинистые почвы. Черноземы с их структурным разнообразием образуются только на глинистых почвах, в то же время пески имеют примитивную периодически повторяющуюся структуру. Можно ожидать, что в песчаных почвах самым значимым окажется фактор размера почвенных частиц.

Изменения многих геометрических признаков адекватно описываются фрактально-кластерным методом формирования твердой фазы, особенно в случае высокой плотности почвы. Замечательно также влияние на изменение практически всех геометрических характеристик плотности затравочных кластеров. С ростом числа кластеров различия между методами стираются. Действие фактора размера почвенных частиц минимально.

В процессе исследования наиболее информативной для поставленных задач оказалась модельная фракция крупных пор. Фракция средних пор из-за большого разброса значений переменных менее значима. Что касается фракции мелких пор, то, исходя из малых размеров пор, она связана скорее с поглотительными свойствами почвенного комплекса. Согласно международно признанной классификации пор по размерам, предложенной М. М. Дубининым, самые мелкие поры в нашей модели ( $\approx 500$  нм) постепенно приближаются по своим свойствам к макропорам ( $> 50$  нм). Влага в таких порах труднодоступна для растений. Не будет ошибочным предположение, что в рассматриваемой задаче важнее соотношение масштабов исходных частиц и образовавшихся пор, чем их абсолютные размеры. Наиболее интересные и разнообразные средние и крупные поры как раз попадают в нужный диапазон соотношений. При участии в моделировании частиц гораздо большего размера найденные приоритеты, скорее всего, сместятся.

Описанный опыт моделирования несложно применить к теоретическому описанию систем существенно меньшего масштаба, не доступного оптической микроскопии. В малоразмерных системах с фрактальным подобием, каковыми являются многие наноструктуры, количество вещества на поверхности и в объеме соизмеримо порядку величины. Поэтому роль поверхности, как более активной составляющей, существенно возрастает. При этом на первый план выступают явления адсорбции и десорбции (Королев, 1996). Адсорбционные свойства пористой среды зависят от геометрии порового пространства меньшего масштаба и вида поглощаемых молекул. Чем меньше размер молекулы, тем меньшие поры почвенного образца могут ее поглотить (Грег, Синг, 1984). Следовательно, чем больший диапазон пор по размеру, тем больше разных молекул поглощается почвой, повышая плодородие и расширяя потенциальные возможности для роста разных видов растений.

Каждое растительное сообщество в результате эволюции выработало свою стратегию приспособления к окружающей среде, в том числе и на уровне корневых систем. Разнообразие почвенных структур вообще и особенно структуры поверхности порового пространства приводит к расширенным условиям обитания и может приводить к увеличению видового разнообразия биогеоценоза.

На первый взгляд может показаться, что модельные изображения (рис. 1–3) несущественно отличаются друг от друга и являются малоинформативными. Приведем аргументы в пользу обратного.

Во-первых, изображения, полученные в результате работы компьютерных моделей, являются следствием совершенно различных процессов, которые могут происходить в почвенном субстрате. Отличие достоверно подтверждается статистикой структурных характеристик.

Во-вторых, различие в геометрии порового пространства приводит к неодинаковым водно-воздушным свойствам почвы и, как следствие, к трансформациям экологических условий обитания подземной флоры и фауны.

В-третьих, применение описанных модельных подходов позволит нам точнее оценивать изображения реальных почвенных микрошлифов с генетических позиций как результат определенных почвообразовательных процессов и их последствий.

Можно предположить, что более разнообразное по структуре и форме поровое пространство эдафотопы предоставляет потенциальные возможности для успешного развития растительных сообществ на ограниченном пространстве.

Особого внимания заслуживает проблема повышения плодородия почв, которая требует оптимизации физических свойств, тесно связанных с почвенной структурой. Для решения этой задачи необходимо знание оптимальных характеристик структуры почв и особенно – порового пространства.

Экспериментальное исследование многофазных физических процессов в почве во взаимосвязи с биологическими процессами, обусловленными развитием растений, почвенной педофауны и микроорганизмов в почвенной среде сопряжено с исключительными трудностями. Поэтому в дальнейшем решение поставленных природой задач путем развития аналогичных модельных подходов представляется нам весьма перспективным.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Балалаев А. К. Исследование фрактальных свойств почвенных микроструктур естественных степных биогеоценозов // *Экология та ноосферология*. – 2003. – Т. 13, № 1–2. – С. 151-157.
- Балалаев А. К. Опыт компьютерного моделирования структуры порового пространства почвы методом Монте-Карло // *Грунтознавство*. – 2003. – Т. 4, № 1–2. – С. 19-25.
- Белова Н. А. Экология, микроморфология, антропогенез лесных почв степной зоны Украины. – Д.: Изд-во ДГУ, 1997. – 264 с.
- Воронин А. Д. Структурно-функциональная гидрофизика почв. – М.: МГУ, 1984. – 204 с.
- Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. – М.: Мир, 1984. – 310 с.
- Ентов В. М. Теория фильтрации // *Соросовский образовательный журнал*. – 1998. – № 2. – С. 121-128.
- Золотухин И. В. Фракталы в физике твердого тела // *Соросовский образовательный журнал*. – 1998. – № 7. – С. 108-113
- Качинский Н. А. Физика почв. Ч. 1. – М.: Высш. шк., 1965. – 323 с.
- Качинский Н. А. Физика почв. Ч. 2. – М.: Высш. шк., 1970. – 358 с.
- Королев В. А. Связанная вода в горных породах: новые факты и проблемы // *Соросовский образовательный журнал*. – 1996. – № 9. – С. 79-85.
- Ландау Л. Д., Лившиц В. М. Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика. – М.: Наука, 1988. – 736 с.
- Маркин В. С. О капиллярном равновесии в модели пористого тела с пересекающимися порами переменного сечения // *Докл. АН СССР*. – 1963. – Т. 151, № 3. – С. 620-623.
- Медведев В. В. Переуплотнение почв: генетико-экологические и агропроизводственные аспекты // *Грунтознавство*. – 2002. – Т. 3, № 3–4. – С. 14-20.
- Пачепский Я. А. Математические модели физико-химических процессов в почвах. – М.: Наука, 1990. – 188 с.
- Розанов Б. Г. Морфология почв. – М.: МГУ, 1983. – 320 с.

- Ромм Е. С. Структурные модели порового пространства горных пород. – Ленинград: Недра, 1985. – 240 с.
- Смирнов Б. М. Физика фрактальных кластеров. – М.: Наука, 1991. – 136 с.
- Фракталы в физике / Под. ред. Л. Пьетронеро, Э. Тозатти. – М.: Мир, 1985. – 672 с.
- Хейфец Л. И., Неймарк А. В. Многофазные процессы в пористых средах. – М.: Химия, 1982. – 320 с.
- Макрокинетика процессов в пористых средах / Ю. А. Чизмаджев, В. С. Маркин, М. Р. Тарасевич, Ю. Г. Чирков. – М.: Наука, 1971. – 363 с.
- Щербаков Р. А., Корсунская Л. П., Пачепский Я. А. Стохастическая модель порового пространства почвы // Почвоведение. – 1994. – № 4. – С. 53-57.
- Blunt M., King P. Relative Permeability's from Two- and Three-Dimensional Pore Scale Network Modelling // Transport in Porous Media. – 1991. – Vol. 6, № 2. – P. 407-433.
- Kolb M., Botet R., Jullien R. // Phys. Rev. Lett. – 1983. – Vol. 51. – P. 1123
- Lenormand R., Zarcone C. Capillary Fingering: Percolation and Fractal Dimension // Transport in Porous Media. – 1989. – Vol. 4, № 3. – P. 599-612.
- Stauffer D. Introduction to percolation theory. – Taylor & Francis, 1985. – 256 p.
- Tyler S. W., Wheatcraft S. W. Fractal processes in soil water retention // Water Resour. Res. – 1990. – Vol. 26. – P. 1047-1054.
- Witten T. A., Sander L. M. // Phys. Rev. Lett. – 1981. – Vol. 47. – P. 1400.

*Надійшла до редколегії 19.02.04*