

## МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 631.4

М.А. Смирнова<sup>1</sup>, А.Н. Геннадиев<sup>2</sup>КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПОЧВЕННОГО РАЗНООБРАЗИЯ:  
ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изложены содержание и особенности существующих подходов к изучению и количественной оценке разнообразия почв: а) учения о структурах почвенного покрова; б) принципов и методов геостатистики; в) понятийного и методического арсенала концепции педоразнообразия. Приведены примеры использования и интерпретации полученных разными методами данных. Количественные параметры, учитываемые в учении о структурах почвенного покрова, имеют целью характеристику его генезиса и оценку степени взаимосвязи между его компонентами; задачи геостатистики концентрируются на пространственном изменении свойств почв; концепции педоразнообразия акцентируют внимание на информативном качестве почвенного покрова, определяемого количеством почвенных таксонов на определенной территории и их взаимным расположением. Оценка таксономического разнообразия и разнообразия свойств почв (функционального разнообразия) является взаимодополняющей и связана с дискретно-континуальным характером почвенного покрова.

*Ключевые слова:* структура почвенного покрова, геостатистика, педоразнообразие, охрана почв.

**Введение.** Разнообразие почв является их фундаментальным свойством, отражающим не только особенности строения и состояние почвенного покрова, но и характер ландшафта в целом. Следует отметить, что в самой физической географии уже в течение нескольких десятилетий разрабатываются собственные теоретические подходы и методы измерения разнообразия ландшафта, учитывающие иерархические уровни организации пространства и апробируемые как при наземных, так и при дистанционных исследованиях ландшафтного покрова [Пузаченко с соавт., 2002].

Разнообразие почв выступает также одним из факторов, определяющим направленность хозяйственного использования земель. Чем однороднее в почвенном отношении участок, тем легче он подвергается сельскохозяйственному освоению, поскольку в его пределах возможно применение единой системы обработки. В свою очередь, участки с высоким почвенным разнообразием требуют более дифференцированного подхода при освоении и больших материальных затрат. Кроме того, некоторые территории, характеризующиеся ярко выраженным разнообразием почв, в силу своей уникальности и соответствующего почвенному высокому биоразнообразию, должны находиться под особой охраной. Поэтому изучение почвенного разнообразия и разработка подходов к его оценке представляются весьма актуальными.

Представления о разнообразии компонентов почвенного покрова, а также основные его характеристики, были предложены еще основателями генетического почвоведения, однако внедрение ко-

личественных методов в описание почвенного разнообразия произошло относительно недавно. Значительный вклад в разработку количественных характеристик структур почвенного покрова, внес В.М. Фридланд [1967, 1972]. В своих работах он заложил основы теоретических и методологических подходов к оценке неоднородности почвенного покрова; многие его идеи нашли свое продолжение в работах соотечественников, некоторые положения получили развитие за рубежом, но заметная часть предложений Фридланда осталась слабо разработанной.

Независимо от идей В.М. Фридланда, активное внедрение геостатистических методов в географогенетическое почвоведение позволило обобщить большое количество численных данных о почвенном покрове, о неоднородности его строения. Применение теории информации в исследованиях почвенного покрова позволило Х.Х. Ибаньесу [1990] обосновать концепцию педоразнообразия (pedodiversity), предложить понятийный и методологический аппараты количественной оценки пространственного разнообразия почв. Несмотря на то, что обозначенные подходы – учение о структурах почвенного покрова, методы геостатистики и концепции педоразнообразия – применяются для описания одного и того же объекта (почвенного покрова), они характеризуют его с разных сторон: географии почв, статистики и теории информации. Целью настоящей работы является обзор существующих представлений о количественной оценке разнообразия компонентов почвенного покрова, анализ результатов и выявление проблем применения их на практике.

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: summerija@yandex.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, профессор, докт. геогр. н.; e-mail: alexagenna@mail.ru

**Теоретические подходы и методы исследования. Учение о структурах почвенного покрова.** Целью учения о структурах почвенного покрова (СПП) является анализ пространственной взаимобусловленности почв. Количественная характеристика компонентов почвенного покрова, согласно В.М. Фридланду [1972], должна проводиться на уровнях элементарных почвенных ареалов (ЭПА) и почвенных комбинаций. В табл. 1 и 2 представлен набор основных количественных критериев, предложенных В.М. Фридландом и некоторыми его последователями. Отметим, что термин «разнообразие» по отношению к почвенному покрову В.М. Фридландом использован не был. Вместе с тем, мы считаем, что такие свойства почвенного покрова как «сложность», «контрастность» и «неоднородность» в полной мере относятся к характеристикам разнообразия почв и могут выступать в качестве критериев его оценки. Понятие «почвенное разнообразие» в отечественной литературе было сформулировано значительно позже Е.Д. Никитиным с соавт. [1999] – главным образом, в связи с задачами сохранения почв (то есть охраны почвенных таксонов разных уровней и структур почвенного покрова в целом). Однако методических подходов к оценке педоразнообразия в этой работе сформулировано не было.

В работах Фридланда количественные характеристики ЭПА касаются в основном их геометрии и положения в пределах почвенных комбинаций; для

дырчатых ЭПА отдельно приводятся данные о размерах, формах, изрезанности внутренних и внешних границ. В случае почвенных комбинаций предлагается провести оценку уровня их сложности, контрастности и неоднородности. Подходы к определению последних двух показателей не являются строго формализованными и основаны на экспертном ранжировании почв (присвоении баллов почвам согласно их предполагаемой генетической сложности, уровню смытости и т. д.). Общая контрастность почвенного покрова определяется суммированием значенных коэффициентов контрастности по каждому из выбранных свойств; при этом предполагается, что различные свойства почв имеют равный вес.

Использование приведенных в табл. 1 и 2 индексов позволяет выявить и количественно подтвердить важные для географии почв закономерности. Например, В.М. Фридландом [1967] для западной части СССР было показано, что наиболее благоприятные условия формирования контрастного почвенного покрова наблюдаются в зонах, где баланс осадков и испаряемости отчетливо, но не очень сильно, сдвигается в сторону преобладания осадков (в подзону дерново-подзолистых почв), или испаряемости (подзону черноземов южных, обыкновенных и темно-каштановых почв). Вместе с тем, почвенный покров этих подзон характеризуется малыми значениями показателя сложности – в условиях относительно сбалансированного соотношения осадков и испаряемости,

Таблица 1

Количественные показатели характеристики ЭПА

Свойство	Количественный показатель
Геометрия	Среднее, минимальное, максимальное значение площади/длины контура
	$ДПК = \frac{\sum_{i=1}^k P_i - P}{kP}$ <p>ДПК – степень дифференциации величины почвенных контуров; <math>P_i</math> – площадь ЭПА или контура; <math>P</math> – средняя площадь ЭПА (или контуров); <math>k</math> – число ЭПА (или контуров)</p> $k = \frac{L1}{L2}$ <p><math>L1</math> – длина по наибольшей оси ЭПА; <math>L2</math> – длина по наименьшей оси ЭПА. Выделяются изоморфные (<math>k &lt; 2</math>); вытянутые (<math>2 &lt; k &lt; 4</math>) и линейные (<math>k &gt; 4</math>) ЭПА</p> $КР = \frac{S}{3,54\sqrt{A}}$ <p>КР – коэффициент расчленения; <math>S</math> – длина границы (периметр) ЭПА; <math>A</math> – площадь ЭПА. Выделяются нерасчлененные (<math>КР &lt; 2</math>), слаборасчлененные (<math>4 &gt; КР &gt; 2</math>), среднерасчлененные (<math>6 &gt; КР &gt; 4</math>) и сильнорасчлененные (<math>КР &gt; 6</math>).</p>
Место в почвенных комбинациях	Показатель характера границ (ПГХ), выражаемый процентами длины границ ареалов, приходящимися на резкие, ясные и постепенные границы; Резкие границы – точность проведения на карте определяется точностью перенесения на карту линии, выраженной на местности; ясные – точность проведения на карте определяется точностью перенесения природы на карту, и необходимостью установления этой линии в натуре; постепенные – переходные полосы, в которых свойства почв изменяются постепенно и граница устанавливается внутри полосы произвольно.
	Показатель смежности (ПС) выражается процентами от длины границы ЭПА, приходящиеся на классификационные группы почв, образующие соседние ЭПА.

Таблица 2

**Количественные показатели характеристики почвенных комбинаций**

Свойство	Количественный показатель
Сложность	Количество ареалов и их процентное соотношение в пределах участка
	$ИД = \frac{k}{\sum_{i=1}^k P_i}$
	ИД – индекс дробности; $k$ – число контуров, $P_i$ – площадь контуров
	$КС = \frac{\overline{KP}(A - S_{max})}{\bar{S} \cdot A}$
Контрастность	КС – коэффициент сложности; $\bar{S}$ – средняя величина ареала, на участке, $S_{max}$ – площадь наиболее крупного ареала на участке; $A$ – площадь участка
	$SD = \frac{100 \cdot n}{S}$
Неоднородность	$K = \frac{ax + by + cz \dots}{20}$
	<p><math>K</math> – коэффициент контрастности по определенному свойству, по Ю.К. Юодису, 1967; <math>a, b, c</math> и т. д. – площади почв, выраженные в процентах, от общей площади территории, <math>x, y, z</math> – степени контрастности соответствующих почв по отношению к доминирующей почве, определенные экспертным путем;</p> $КГ_{cp} \text{ (или } КМ_{cp} \text{ или } КС_{cp}) = \frac{\sum_{i=1}^k K_i L_i}{100}$ <p><math>КГ_{cp}</math> – коэффициент генетической (<math>КМ_{cp}</math> – механической, <math>КС_{cp}</math> – по смытости) контрастности (по Я.М. Годельману (1969)); <math>K_i</math> – градации контрастности, определенные экспертным путем, <math>L_i</math> – протяженность границ, разделяющих почвы с соответствующими градациями контрастности <math>K_i</math>, выраженная в процентах от общей протяженности границ всех ареалов изучаемой территории. Среднее значение разницы между бонитетными показателями почв, входящих в рассматриваемые почвенные комбинации [Фридрианд, 1967]</p>
Неоднородность	Показатель позиционной неоднородности – число ареалов, с которым граничит каждый из изучаемых ареалов почв; Индекс неоднородности, определяемый перемножением коэффициента контрастности на коэффициент сложности

перераспределение влаги не оказывает на процессы почвообразования сильного влияния.

При изучении СПП на региональном уровне показано, что литолого-геоморфологический фактор играет более важную роль в формировании контрастного почвенного покрова, чем климатический фактор. Так, для района валдайского оледенения Р.А. Сталбовым с соавт. [1979] было показано, что контрастность почвенного покрова минимальна в условиях озерно-ледникового рельефа, максимальна – конечно-моренного.

Определение индексов контрастности имеет важное практическое значение; количественные параметры СПП служат объективными показателями для проведения сельскохозяйственного районирования территорий, в том числе анализа размещения различных сельхозугодий, характера и объема мелиоративных мероприятий, а также определения масштаба почвенной съемки и количества точек опробования [Юодис, 1967; Годельман с соавт., 1975; Годельман, 1977].

Несмотря на то, что учение о СПП широко известно и описание СПП является общепринятым при

характеристике почвенного покрова, количественные показатели в этих работах используются довольно редко. Для иллюстрации этого заключения нами были проанализированы все статьи из журнала «Почвоведение» за 1965–2014 гг., имеющие в своем названии словосочетания «структура/структуры/структуре почвенного покрова» и «почвенный покров». Оказалось, что только в 26 работах из 77 используются количественные показатели при описании почвенного покрова; при этом в 15 работах авторы ограничиваются лишь показателем процентного соотношения площадей почвенных ареалов и их количеством; в оставшихся 11 работах, помимо процентного соотношения и количества ареалов, приводились данные о коэффициенте расчленения, показателе характера границ, сложности, контрастности и неоднородности почвенного покрова. Использование всего набора показателей не приводится ни в одной из работ.

Причинами редкого использования количественных показателей при изучении СПП может являться не только слабая разработанность и отсутствие строго формализованных подходов к определению

некоторых из них (контрастности, неоднородности), но и сама «идеология» учения о СПП. Учение о СПП ставит своей целью выявление генезиса и взаимобусловленности компонентов почвенного покрова, а не выраженность строения почвенного покрова в определенном наборе цифр; поэтому словесное описание почвенного покрова часто негласно признается более информативным, чем численное.

**Геостатистика.** Геостатистика, в отличие от теории СПП и обсуждаемой ниже концепции педоразнообразия, представляет собой полностью формализованный подход к описанию пространственной организации почвенного покрова, строго опирающийся на методы математической статистики. Целью геостатистики в почвенных исследованиях является описание функционального разнообразия компонентов почвенного покрова (то есть описание непрерывно изменяющихся свойств почв, например, кислотности и т. д.). Основное положение геостатистики заключается в том, что чем ближе между собой в пространстве расположены объекты (почвы), тем более тесная связь существует между ними, между их свойствами. Различия между всей существующей гаммой геостатистических подходов заключается лишь в том, каким методом проводится интерполяция данных [Lark, 2012; Chiles, Delfiner, 2012]. В настоящее время, крикинг является наиболее используемым методом для решения почвенных задач; он включает в себя построение семивариограммы выбранного свойства почвы (то есть графика, отражающего пространственную зависимость изменения свойства) и интерполяцию данных [Stein, 2012; Lark, 2012].

Использование геостатистических методов при проведении почвенно-географических исследований в настоящее время является повсеместным. В большинстве случаев, геостатистику используют для построения карт отдельных свойств почв [Lark, 2012; Macinnis-Ng et al., 2016; Pinto et al., 2014], реже – для определения характерных расстояний изменения параметров почвенного покрова [Сидорова, Красильников, 2007; Brus, De Gruijter, 1994]. Последнее, на наш взгляд, является наиболее перспективным и интересным направлением применения геостатистических методов для выявления особенностей пространственного изменения свойств почвенного покрова. Так, В.А. Сидоровой и П.В. Красильниковым [2007] было установлено, что для поверхностных горизонтов почв степной зоны варьирование содержания илистой фракции, физической глины и общего азота практически не наблюдается на расстояниях менее 150 м; кроме того, была статистически доказана связь между мощностью гумусового горизонта и радиусом крон деревьев [Liski, 1995], продолжительностью почвообразования [Благовещенский, Самсонова, 2001].

Несмотря на широкое применение геостатистики в почвоведении, исследователи часто высказывают определенный скептицизм при анализе результатов оценки изменения свойств почв в пространстве этими методами [Lark, 2012; Minasny

et al., 2011]. Во многом это связано с объектом изучения – почвенным покровом. Являясь результатом сочетания целого ряда факторов (одним из которых выступают геологические объекты), по-разному меняющихся во времени и пространстве, почвенный покров представляет собой оболочку более пространственно неоднородную, чем геологическая, для которой первоначально и были разработаны геостатистические методы. Тем не менее, перспективность геостатистических подходов для выявления пространственных особенностей почвенного покрова и необходимость их дальнейшей разработки применительно к почвам не вызывает сомнений.

**Педоразнообразие.** Концепция педоразнообразия (pedodiversity) изложена в работах испанского почвоведов Х.Х. Ибаньеса (J.J. Ibanez) и методологически основана на подходах, применяемых при оценке биоразнообразия. Определение педоразнообразия сводится к характеристике [Ibanez et al., 2013]: 1 – числа различных почвенных групп на исследуемой территории; 2 – параметров, характеризующих их пространственное распределение. В качестве количественных критериев оценки почвенного разнообразия предлагается [Ibanez et al., 1995, 2013] использование (табл. 3) индексов богатства ( $S$ ), разнообразия Шеннона (SHDI или  $H'$ ) и нормированного индекса Шеннона (SHEI); и, если первый индекс характеризует число различных почвенных групп на исследуемой территории, то два других – равномерность распределения почв в пространстве (SHDI; SHEI) и наличие почвенного доминанта в пределах исследуемой территории (SHEI).

Для оценки педоразнообразия могут быть использованы и другие индексы. Выбор вышеуказанных трех обосновывается Х.Х. Ибаньесом с соавт. [Ibanez et al., 2013] тем, что, с одной стороны, они являются общепринятыми и широко используемыми, с другой – характеризуют ключевые особенности почвенного покрова, однако методологически эти индексы не являются более корректными или правильными для оценки разнообразия в сравнении с другим, представленными в табл. 3. Основные различия между указанными индексами заключаются лишь в том, какой вес придается количеству объектов, а какой – особенностям пространственного размещения. Именно поэтому указанные индексы характеризуются высокой степенью корреляции по отношению друг к другу [Caniego et al., 2007; Ibanez et al., 2013].

Работы по количественной оценке педоразнообразия в различных регионах мира относительно немногочисленны: проведены оценки почвенного разнообразия мира в целом [Caniego et al., 2007; Minasny et al., 2010], регионов Испании [Ibanez et al., 1990; Saldana, Ibanez, 2004; Lo Papa et al., 2011], России [Алябина, 1996], США [Amundson, Guo, 2003; Guo et al., 2003; Phillips, Marion, 2005], Ирана [Toomanian et al., 2006, 2010; Kooch et al., 2015], Италии [Costantini, L'Abate, 2016], Мексики [Krasilnikov et al., 2009], Китая [Xuelei 2013], ЮАР и Намибии [Petersen, 2010]. Большая часть исследований по-

Таблица 3

Индексы разнообразия (по Алябина, 2004; Рикотта, 2005; Ибаньес с соавт., 2013)

Индекс	Формула расчета	Примечания
Богатства	$S$	$S$ – количество почвенных групп на исследуемой территории.
Разнообразия Шеннона	$SHDI = -\sum_{i=1}^n p_i \cdot \ln p_i$	$p_i$ – часть исследуемого участка, занятая почвенной группой $i$ и выраженная в долях от единицы; $n$ – количество почвенных групп на исследуемой территории.
Нормированный Шеннона	$SHEI = \frac{-\sum_{i=1}^n p_i \cdot \ln p_i}{\ln n}$	
Джини–Симпсона	$G = 1 - \sum_{i=1}^n p_i^2$	
Видового богатства Маргалефа	$D_{Mg} = \frac{S-1}{\ln N}$	$S$ – число выявленных групп почв на исследуемой территории, $N$ – общее число ареалов всех групп почв $S$ на исследуемой территории.
Видового богатства Менхиника	$D_{Mn} = \frac{S}{\sqrt{N}}$	
Бриллуэна	$HB = \frac{\ln N! - \sum_{i=1}^n \ln n_i}{N}$	$n_i$ – количество ареалов почв $i$ -ой группы почв; $N$ – общее количество ареалов всех групп почв.
Макинтоша	$D = \frac{N - \sqrt{\sum_{i=1}^n n_i^2}}{N - \sqrt{N}}$	
Симпсона	$D = \sum_{i=1}^n \left( \frac{n_i(n_i-1)}{N(N-1)} \right)$	
Бергера–Паркера	$d = \frac{N_{\max}}{N}$	$N_{\max}$ – число ареалов почв самой обильной группы; $N$ – общее количество ареалов всех групп почв.
Латеральной дифференциации	$ild = \frac{n}{M}$	$n$ – количество почвенных таксономических единиц; $M$ – доля площади, занимаемая преобладающей почвенной таксономической единицей в полигоне.

священа ранжированию исследуемых участков по степени разнообразия почвенного покрова и выявлению факторов, определяющих его неоднородность. Так, П.В Красильниковым с соавт. [2009] показано, что в полулистопадном лесном горном поясе Сьерра Мадре значения индексов почвенного разнообразия увеличивались с высотой, что, по мнению авторов, может быть вызвано ослаблением эрозионных процессов в этом направлении. Х.Х. Ибаньес [Ibanez, 1994], Н. Туманян и И. Эсфандиарпур [Toomanian, Esfandiarpour, 2010] исследовали связь между продолжительностью процессов почвообразования и педоразнообразием. По их данным, чем дольше протекает процесс почвообразования (больше возраст геоморфологической поверхности), тем выше значение индекса Шеннона. Именно поэтому указанные авторы предлагают использовать индекс Шеннона не только в качестве меры разнообразия, но и меры эволюции почвенного покрова. На основании 25-летних исследований в области педоразнообразия и анализа литературных данных Х.Х. Ибаньес

с соавт. [Ibanez et al., 2013] делается вывод о том, что особенности биоразнообразия, педоразнообразия, геоморфологического разнообразия имеют большое количество сходных черт и, видимо, регулируются законами, общими для биотической и абиотической природы.

Концепция педоразнообразия подверглась критике как в методологическом аспекте, так и с точки зрения полученных выводов по особенностям разнообразия почв регионов мира [Odeh, 1998; Wilding, Nordt, 1998; Yaalon, 1998; Camargo, 1999]. Основные методологические замечания касались применимости индекса Шеннона к оценке разнообразия почв. Напомним, что методика оценки пространственного разнообразия почв была заимствована из концепции биоразнообразия, а биологические объекты, в отличие от почв, обладают иными свойствами [Camargo, 1999]. Для них характерна межвидовая борьба и конкуренция. «Дискретность» живых организмов не вызывает сомнения, в то время как вопрос о континуальности

и дискретности почвенного покрова до сих пор является актуальным, а возможность «конкуренции» почв между собой за местообитание, естественно, исключается. Прямая зависимость значений индексов Шеннона от размеров исследуемой территории [Minasny et al., 2010] тоже вызывает вопрос о корректности использования этих индексов для оценки педоразнообразия. Так, сравнение индексов Шеннона, рассчитанных по почвенной карте мира [FAO-UNESCO Soil Map ..., 2003] для различных регионов показывает, что наибольшим почвенным разнообразием характеризуются регионы с наибольшей площадью (Северная Америка, Африка, Северная Азия), наименьшим – регионы с наименьшей площадью (Ближний Восток, Юго-Восточная Азия и Океания). Однако указанная критика не ослабляет интерес исследователей к этой теме и использованию предложенных методов для оценки педоразнообразия, а также к развитию новых подходов.

В последнее время, в дополнение к указанным индексам для оценки педоразнообразия используется индекс квадратной энтропии Рао [Rao, 1982]. Этот индекс учитывает не только количество индивидуальных групп почв, но и степень их близости (или контрастности) по отношению друг к другу:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} p_i p_j,$$

где  $p_i$  или  $p_j$  – часть исследуемого участка, занятая почвенной группой  $i$  или  $j$  и выраженная в долях от единицы,  $d_{ij}$  – коэффициент, отражающий меру сходства между почвенными группами  $i$  и  $j$ ;  $n$  – количество почвенных групп на исследуемой территории.

Применительно к почвенному покрову индекс квадратной энтропии впервые был использован Б. Минасни с соавт. [Minasny et al., 2010]; в качестве меры сходства исследователями было предложено использовать таксономическое расстояние между почвами. Определение таксономического расстояния является математической процедурой расчета сходства между группами почв на основании их свойств, в качестве которых, в зависимости от целей исследования, могут быть использованы любые (морфологические, химические и т. д.) свойства.

Изложенные выше представления о структурах почвенного покрова, геостатистике, концепции педоразнообразия и примеры использования рассматриваемых при этих подходах количественных показателей в почвенно-географических исследованиях показывают, что указанные подходы в общем обладают необходимым теоретическим и методологическим аппаратом для количественной оценки пространственного разнообразия почв. Принимая во внимание дискретно-континуальный характер почвенного покрова, представляется, что при его количественной оценке должны совместно изучаться как «таксономическое» (то есть разнообразие от-

дельных дискретных почв и их групп), так и «функциональное» (то есть непрерывное изменение свойств почв) разнообразие. Функциональное разнообразие наиболее полно может быть охарактеризовано геостатистическими методами; таксономическое – показателями из учения о СПП или концепции педоразнообразия (в зависимости от целей исследования). При этом важно учитывать, что результаты оценки таксономического разнообразия напрямую зависят от выбора почвенной классификации и используемой почвенно-картографической основы; а количественная характеристика пространственного изменения какого-либо из свойств почв не может выступать в качестве обобщающего критерия. При проведении сравнительно-географических исследований выбранные ключевые участки могут образовывать различные ряды по степени увеличения таксономического и функционального разнообразия: наибольшим таксономическим разнообразием может обладать участок с наименьшим функциональным разнообразием и наоборот (как, например, это было показано в работе [Saldana, Ibanez, 2004]), что не является противоречием.

Количественные показатели пространственного разнообразия почв, используемые в теории СПП, были разработаны непосредственно почвоведом-географами, в то время как показатели, используемые в геостатистике и в методах теории педоразнообразия, были заимствованы из смежных наук – геологии и биогеографии. Отмеченные особенности в некоторой степени объясняют индивидуальные черты подходов; так, теория СПП большое внимание уделяет генезису почвенного покрова, геостатистика – пространственному варьированию свойств, а концепции педоразнообразия количеству индивидуальных таксонов и их размещению в единице пространства. Наиболее используемым методом количественной оценки почвенного разнообразия в настоящее время является метод геостатистики, вероятно, в силу его высокой степени формализации и за счет этого простоты в использовании.

#### **Выводы:**

– учение о структурах почвенного покрова, геостатистика и концепция педоразнообразия обладают необходимой теоретической и методической основой для количественной оценки пространственного разнообразия почв;

– количественные параметры, учитываемые в учении о структурах почвенного покрова, имеют целью характеристику его генезиса и оценку степени взаимосвязи между его компонентами; задачи геостатистики концентрируются на пространственном изменении свойств почв и выявлении характерных расстояний изменения почвенных свойств; концепции педоразнообразия акцентируют внимание на информативном качестве почвенного покрова, определяемого количеством почвенных таксонов на определенной территории и их взаимным расположением;

– оценка таксономического разнообразия и разнообразия свойств почв (функционального разнообразия) является взаимодополняющей, и связана с дискретно-континуальным характером почвенного покрова;

– геостатистические методы являются наиболее используемыми при количественной оценке почвенного разнообразия, вероятно, в силу их высокой степени формализации и за счет этого относительной простоты в использовании.

**Благодарности.** Работа выполнена за счет гранта РФФИ (проект № 16-35-60056мол\_а\_дк).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алябина О.И. Количественная оценка разнообразия почв ЕТР // Проект создания экологической сети на Европейской части России: лесной аспект. М.: ПАИМС, 1996. С. 37–42, 96–103.

Благовещенский Ю.Н., Самсонова В.П. Использование показателя «фрактальной размерности» для характеристики вариабельности мощности гумусового горизонта на разновозрастных отвалах // Почвоведение. 2001. № 5. С. 544–548.

Годельман Я. М. Структура почвенного покрова и землеустроительное проектирование // Почвоведение. 1977. № 9. С. 13–25.

Годельман Я.М., Лейб Х.И., Пугачев А.П. Оценка детальности почвенных карт параметрами структуры почвенного покрова // Почвоведение. 1975. № 10. С. 19–27.

Красильников П.В., Старр М., Лантратова И.М. Количественная оценка разнообразия почвенного покрова Фенноскандии // Экологические функции почв Восточной Фенноскандии. Петрозаводск: Карел. Науч. Центр РАН, 2000. С. 108–123.

Никитин Е.Д., Шишкина Л.П., Воронцова Е.М. Экологические функции степной зоны и сохранение почвенно-биологического разнообразия // Проблемы сохранения и восстановления степных экосистем. Оренбург: УрО РАН, 1999. С. 109.

Пузаченко Ю.Г., Дьяконов К.Н., Алещенко Г.М. Разнообразие ландшафта и методы его измерения // География и мониторинг биоразнообразия. М.: Изд-во НУМЦ, 2002. С. 76–178.

Сидорова В.А., Красильников П.В. Почвенно-географическая интерпретация пространственной вариабельности химических и физических свойств почв поверхностных горизонтов почв степной зоны // Почвоведение. 2007. № 10. С. 1168–1178.

Сталбов Р.Я., Качков Ю.П., Яцухно В.М. Характеристика структуры почвенного покрова эродированных земель районов Валдайского оледенения // Почвоведение. 1979. № 9. С. 42–52.

Фридланд В.М. О структуре почвенного покрова главных почвенных зон и подзон западной части Советского Союза // Почвоведение. 1967. № 5. С. 12–22.

Фридланд В.М. Структура почвенного покрова. М.: Мысль, 1972. 424 с.

Юодис Ю.К. О структуре почвенного покрова Латвийской ССР // Почвоведение. 1967. № 11. С. 50–55.

Amundson R., Guo Y., Gong P. Soil diversity and land use in the United States // Ecosystems. 2003. V. 6. P. 470–482.

Brus D.J., de Grujter J.J. Estimation of non-ergodic variograms and their sampling variance by design-based sampling strategies // Math. Geol. 1994. V. 26. P. 437–454.

Camargo J.A. On the concept of pedodiversity and its measurement. A reply // Geoderma. 1999. V. 93. № 3–4. P. 339–344.

Caniego F.J., Ibanez J.J., Martinez F.F. Renyi dimensions and pedodiversity indices of the earth pedotaxa distribution // Nonlinear Processes Geophys. 2007. V. 14. P. 547–555.

Chiles J.-P., Delfiner P. Geostatistics: modeling spatial uncertainty (second edition). New York: John Wiley & Sons, 2012. 703 p.

Costantin E.A.C., L'Abate G. Beyond the concept of dominant soil: Preserving pedodiversity in upscaling soil maps // Geoderma. 2016. V. 271. P. 243–253.

Guo Y., Gong P., Amundson R. Pedodiversity in the United States of America // Geoderma. 2003. V. 117. P. 99–115.

Ibanez J.J. Evolution of Fluvial Dissection Landscapes in Mediterranean Environments: Quantitative Estimates and Geomorphic, Pedologic, and Phytocenotic Repercussions // Zeitschrift für Geomorphologie. 1994. V. 38. № 1. P. 105–119.

Ibanez J.J., Jimenez-Ballesta R., Garcia-Alvarez A. Soil landscapes and drainage basins in Mediterranean mountain areas // Catena. 1990. V. 17. P. 573–583.

Ibanez J.J., Vargas R.J., Vazquez-Hoehne A. Pedodiversity state of the art and future challenges // Pedodiversity. London: CRC press, 2013. P. 1–28

Ibanez J.J., De-Alba S., Bermudez F.F., Garcia-Alvarez A. Pedodiversity: concepts and measures // Catena. 1995. V. 24. P. 215–232.

FAO-UNESCO Soil Map of the World at 1:25 000 000 Scale, Rome, 2003.

Kooch Y., Hosseini S.M., Scharenbroch B.C. et al. Pedodiversity in the Caspian forests of Iran // Geoderma Regional. 2015. V. 5. P. 4–14.

Krasilnikov P.V., Garcia Calderon N.E., Ibanez Huerta A. Pedodiversity in mountainous tropical semi deciduous forests of Sierra Madre Del Sur, Mexico // Eurasian Soil Science. 2009. V. 42. P. 1435–1442.

Lark R.M., Webster R. Changes in variance and correlation of soil properties with scale and location: analysis using an adapted maximal overlap discrete wavelet transform // European J. Soil Science. 2001. V. 52. P. 547–562.

Lark R.M. Towards soil geostatistics // Spatial Statistics. 2012. V. 1. P. 92–99.

Liski J. Variation in soil organic carbon and thickness of soil horizons within a boreal forest stand – effect of trees and implications for sampling // Silva Fennica. 1995. V. 29. № 4. P. 255–266.

Lo Papa G., Palermo G.V., Dazzi C. Is land-use change a cause of loss of pedodiversity? The case of the Mazzarrone study area, Sicily // Geomorphology. 2011. V. 135. № 3–4. P. 332–342.

Macinnis-Nq C.M.O., Zeppel M.J.B., Palmer A.R., Eamus D. Seasonal variations in tree water use and physiology correlate with soil salinity and soil water content in remnant woodlands on saline soils // J. Arid environments. 2016. V. 129. P. 102–110.

Minasny B., McBratney A.B., Hartemink A.E. Global pedodiversity, taxonomic distance, and the World Reference Base // Geoderma. 2010. V. 155. № 3–4. P. 132–139.

Minasny B., Vrugt J.A., McBratney A.B. Confronting uncertainty in model-based geostatistics using Markov Chain Monte Carlo simulation // Geoderma. 2011. V. 163. № 3–4. P. 150–162.

Odeh I.O.A. In Discussion of: «J.J. Ibanez, S. De Alba, A. Lobo, V. Zucarello, 'Pedodiversity and Global Soil Patterns at Coarse Scales'» // Geoderma. 1998. V. 83. № 3–4. P. 203–205.

Petersen A., Grongroft A., Miehlich G. Methods to quantify the pedodiversity of 1 km<sup>2</sup> areas – results from southern African drylands // Geoderma. 2010. V. 155. № 3–4. P. 140–146.

Phillips J.D., Marion D.A. Biomechanical effects, lithological variations, and local pedodiversity in some forest soils of Arkansas // Geoderma. 2005. V. 124. P. 73–89.

Pinto E., Fidalgo F., Teixeira J., Aquiar A.A., Ferreira I. Influence of the temporal and spatial variation of nitrate

reductase, glutamine synthetase and soil composition in the N species content in lettuce (*Lactuca sativa*) // Plant science. 2014. V. 219–220. P. 35–41.

Rao C.R. Diversity and dissimilarity coefficients: A unified approach // Theoretical Population Biology. 1982. V. 21. № 1. P. 24–43.

Ricotta C. Through the jungle of biological diversity // ActaBiotheoretica. 2005. V. 53. P. 29–38.

Saldana A., Ibanez J.J. Pedodiversity analysis at large scales: An example of three fluvial terraces of the Henares River (central Spain) // Geomorphology. 2004. V. 62. № 1–2. P. 123–138.

Stein M.L. Interpolation of spatial data: some theory for kriging. New York: Springer, 2012. 247 p.

Toomanian N., Esfandiarpour I. Challenges of pedodiversity in soil science // Eurasian Soil Science. 2010. V. 43. № 13. P. 1486–1502.

Toomanian N., Jalalian A., Khademi H. et al. Pedodiversity and pedogenesis in Zayandeh-rud Valley, Central Iran // Geomorphology. 2006. V. 81. № 3–4. P. 376–393.

Wilding L.P., Nordt L.C. In Discussion of: «J.J. Ibanez, S.De Alba, A. Lobo, V. Zucarello, 'Pedodiversity and Global Soil Patterns at Coarse Scales'» // Geoderma. 1998. V. 83. № 3–4. P. 196–199.

Xuelei Z. Pedodiversity Studies in China // Pedodiversity. London: CRC press, 2013. P. 211–228.

Yaalon D.H. In Discussion of: «J.J. Ibanez, S.De Alba, A. Lobo, V. Zucarello, 'Pedodiversity and Global Soil Patterns at Coarse Scales'» // Geoderma. 1998. V. 83. № 3–4. P. 193–196.

Поступила в редакцию 05.12.2016

Принята к публикации 31.03.2017

M.A. Smirnova<sup>1</sup>, A.N. Gennadiev<sup>2</sup>

### THE QUANTITATIVE ASSESSMENT OF SOIL DIVERSITY: THEORY AND METHODS OF STUDY

The essence and specific features of existing approaches to the investigation and quantitative assessment of soil diversity are outlined, namely: a) the theory of soil cover structures; b) the principles and methods of geostatistics; and c) the concepts and methods of the pedodiversity theory. Application and interpretation of data obtained by different methods are exemplified. The quantitative parameters which are considered in the theory of soil cover structures characterize the genesis of soil cover and the degree of connection between its components. The principal tasks of geostatistics are to describe the spatial variation of soil properties, while the pedodiversity studies aim mainly at the «information content» of soil cover which depends on the number of soil taxa and their spatial distribution within a certain territory. The assessment of taxonomic diversity and the diversity of soil properties (functional diversity) is complementary, and fully reflects the discrete-continuous nature of the soil cover.

*Key words:* soil cover structure, geostatistics, pedodiversity, soil preservation.

*Acknowledgements.* The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project № 16-35-60056 мол\_а\_дк).

#### REFERENCES

Alyabina O.I. Kolichestvennaya ocenka raznoobraziya pochv ETR [The quantitative assessment of soil diversity in ETR]. M., Paimis, 1996. P. 37–42, 96–103 (in Russian).

Amundson R., Guo Y., Gong P. Soil diversity and land use in the United States // Ecosystems. 2003. V. 6. P. 470–482.

Blagoveshchenskii Yu.N., Samsonova V.P. The fractal dimension index as applied to the description of the variable thickness of humus horizons on dumps of various ages // Eurasian Soil Science. 2001. V. 34. № 5. P. 479–483.

Brus D.J., de Gruijter J.J. Estimation of non-ergodic variograms and their sampling variance by design-based sampling strategies // Math. Geol. 1994. V. 26. P. 437–454.

Camargo J.A. On the concept of pedodiversity and its measurement. A reply // Geoderma. 1999. V. 93. № 3–4. P. 339–344.

Caniego F.J., Ibanez J.J., Martinez F.F. Renyi dimensions and pedodiversity indices of the earth pedotaxa distribution // Nonlinear Processes Geophys. 2007. V. 14. P. 547–555.

Chiles J.-P., Delfiner P. Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty (second edition). New York: John Wiley & Sons, 2012. 703 p.

Costantin E.A.C., L'Abate G. Beyond the concept of dominant soil: Preserving pedodiversity in upscaling soil maps // Geoderma. 2016. V. 271. P. 243–253.

FAO-UNESCO Soil Map of the World at 1:25 000 000 Scale, Rome, 2003.

Fridland V.M. O strukture pochvennogo pokrova glavnykh pochvennykh zon i podzon zapadnoj chasti Sovetskogo Soyuz [About the structure of soil cover of the major soil zones and subzones in the western part of the Soviet Union] // Pochvovedenie. 1967. № 5. P. 12–22 (in Russian).

Fridland V.M. Struktura pochvennogo pokrova [Structure of soil cover]. Moscow, Mysl', 1972, 424 p. (in Russian).

Godelman Ya.M. Struktura pochvennogo pokrova i zemleustroitelnoe proektirovanie [The structure of soil cover and land design] // Pochvovedenie. 1977. № 9. P. 13–25 (in Russian).

Godelman Ya.M., Lejb H.I., Pugachev A.P. Ocenka detalnosti pochvennykh kart parametrami struktury pochvennogo pokrova [Assessment of the degree of detail of soil maps using the parameters of soil cover structure] // Pochvovedenie. 1975. № 10. P. 19–27 (in Russian).

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Scientific Researcher, PhD in Geography; e-mail: summerija@yandex.ru

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: alexagenna@mail.ru

- Guo Y., Gong P., Amundson R. Pedodiversity in the United States of America // *Geoderma*. 2003. V. 117. P. 99–115.
- Ibanez J.J. Evolution of Fluvial Dissection Landscapes in Mediterranean Environments: Quantitative Estimates and Geomorphic, Pedologic, and Phytocenotic Repercussions // *Zeitschrift für Geomorphologie*. 1994. V. 38. № 1. P. 105–119.
- Ibanez J.J., De-Alba S., Bermudez F.F., Garcia-Alvarez A. Pedodiversity: concepts and measures // *Catena*. 1995. V. 24. P. 215–232.
- Ibanez J.J., Jimenez-Ballesta R., Garcia-Alvarez A. Soil landscapes and drainage basins in Mediterranean mountain areas // *Catena*. 1990. V. 17. P. 573–583.
- Ibanez J.J., Vargas R.J., Vazquez-Hoehne A. Pedodiversity State of the Art and Future Challenges // *Pedodiversity*. London: CRC press, 2013. P. 1–28.
- Koosh Y., Hosseini S.M., Scharenbroch B.C. et al. Pedodiversity in the Caspian forests of Iran // *Geoderma Regional*. 2015. V. 5. P. 4–14.
- Krasilnikov P.V., Garcia Calderon N.E., Ibanez Huerta A. Pedodiversity in mountainous tropical semi deciduous forests of Sierra Madre Del Sur, Mexico // *Eurasian Soil Science*. 2009. V. 42. P. 1435–1442.
- Krasilnikov P.V., Starr M., Lantratova I.M. Kolichestvennaya ocenka raznoobraziya pochvennogo pokrova Fennoskandii [Quantification of the Fennoscandia soil diversity] // The ecological functions of Eastern Fennoscandia soils. Petrozavodsk. Karelia.Sci. Center of Russian Academy of Sciences, 2000. P. 108–123 (in Russian).
- Lark R. M. Towards soil geostatistics // *Spatial Statistics*. 2012. V. 1. P. 92–99.
- Lark R.M., Webster R. Changes in variance and correlation of soil properties with scale and location: analysis using an adapted maximal overlap discrete wavelet transform // *European J. Soil Science*. 2001. V. 52. P. 547–562.
- Liski J. Variation in soil organic carbon and thickness of soil horizons within a boreal forest stand – effect of trees and implications for sampling // *Silva Fennica*. 1995. V. 29. № 4. P. 255–266.
- Lo Papa G., Palermo G.V., Dazzi C. Is land-use change a cause of loss of pedodiversity? The case of the Mazzarrone study area, Sicily // *Geomorphology*. 2011. V. 135. № 3–4. P. 332–342.
- Macinnis-Nq C.M.O., Zeppel M.J.B., Palmer A.R., Eamus D. Seasonal variations in tree water use and physiology correlate with soil salinity and soil water content in remnant woodlands on saline soils // *J. Arid environments*. 2016. V. 129. P. 102–110.
- Minasny B., McBratney A.B., Hartemink A.E. Global pedodiversity, taxonomic distance, and the World Reference Base // *Geoderma*. 2010. V. 155. № 3–4. P. 132–139.
- Minasny B., Vrugt J.A., McBratney A.B. Confronting uncertainty in model-based geostatistics using Markov Chain Monte Carlo simulation // *Geoderma*. 2011. V. 163. № 3–4. P. 150–162.
- Nikitin E.D., Shishkina L.P., Voroncova E.M. Ekologicheskie funkcii stepnoj zony i sohranenie pochvenno-biologicheskogo raznoobraziya [Ecological functions of the steppe zone and conservation of soil and biological diversity] // Problems of preservation and restoration of steppe ecosystems. Orenburg, UDRAS, 1999. 109 p. (in Russian).
- Odeh I.O.A. In Discussion of: «J.J. Ibanez, S.De Alba, A. Lobo, V. Zucarello, 'Pedodiversity and Global Soil Patterns at Coarse Scales'» // *Geoderma*. 1998. V. 83. № 3–4. P. 203–205.
- Petersen A., Grongroft A., Miehlich G. Methods to quantify the pedodiversity of 1 km<sup>2</sup> areas - results from southern African drylands // *Geoderma*. 2010. V. 155. № 3–4. P. 140–146.
- Phillips J.D., Marion D.A. Biomechanical effects, lithological variations, and local pedodiversity in some forest soils of Arkansas // *Geoderma*. 2005. V. 124. P. 73–89.
- Pinto E., Fidalgo F., Teixeira J., Aquiar A.A., Ferreira I. Influence of the temporal and spatial variation of nitrate reductase, glutamine synthetase and soil composition in the N species content in lettuce (*Lactuca sativa*) // *Plant science*. 2014. V. 219–220. P. 35–41.
- Puzachenko Ju.G., Djakonov K.N., Aleshchenko G.M. Raznoobraziye landshafta i metody ego izmereniya [Landscape diversity and methods of its measurement] // *Geography and monitoring of biodiversity*. M.: NUMC, 2002. P. 76–178 (in Russian).
- Rao C.R. Diversity and dissimilarity coefficients: A unified approach // *Theoretical Population Biology*. 1982. V. 21. № 1. P. 24–43.
- Ricotta C. Through the jungle of biological diversity // *Acta Biotheoretica*. 2005. V. 53. P. 29–38.
- Saldana A., Ibanez J.J. Pedodiversity analysis at large scales: An example of three fluvial terraces of the Henares River (central Spain) // *Geomorphology*. 2004. V. 62. № 1–2. P. 123–138.
- Sidorova V.A., Krasilnikov P.V. Soil-geographic interpretation of spatial variability in the chemical and physical properties of topsoil horizons in the steppe zone // *Eurasian Soil Science*. 2007. V. 40. № 13. P. 1042–1051.
- Stalbov R.Ja., Kachkov Ju.P., Jacuhno V.M. Charakteristika struktury pochvennogo pokrova erodirovannyh zemel' rajonov Valdajskogo oledeneniya [Characteristic of the structure of soil cover on the eroded land within the Valdai Ice Age areas] // *Pochvovedenie*. 1979. № 9. P. 42–52 (in Russian).
- Stein M.L. Interpolation of spatial data: some theory for kriging. New York: Springer, 2012. 247 p.
- Toomanian N., Esfandiarpour I. Challenges of pedodiversity in soil science // *Eurasian Soil Science*. 2010. V. 43. № 13. P. 1486–1502.
- Toomanian N., Jalalian A., Khademi H. et al. Pedodiversity and pedogenesis in Zayandeh-rud Valley, Central Iran // *Geomorphology*. 2006. V. 81. № 3–4. P. 376–393.
- Uodis I.U.K. O strukturu pochvennogo pokrova Latvijas SSR [About the structure of soil cover of the Latvian SSR] // *Pochvovedenie*. 1967. № 11. P. 50–55 (in Russian).
- Wilding L.P., Nordt L.C. In Discussion of: «J.J. Ibanez, S.De Alba, A. Lobo, V. Zucarello, 'Pedodiversity and Global Soil Patterns at Coarse Scales'» // *Geoderma*. 1998. V. 83. № 3–4. P. 196–199.
- Xuelei Z. Pedodiversity Studies in China // *Pedodiversity*. London: CRC press, 2013. P. 211–228.
- Yaalon D.H. In Discussion of: «J.J. Ibanez, S.De Alba, A. Lobo, V. Zucarello, 'Pedodiversity and Global Soil Patterns at Coarse Scales'» // *Geoderma*. 1998. V. 83. № 3–4. P. 193–196.

Received 05.12.2016

Accepted 31.03.2017