
ТЕОРЕТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ҐРУНТОЗНАВСТВА

УДК 631.45

В. В. Медведев

НЕОДНОРОДНОСТЬ КАК ЗАКОНОМЕРНОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА

Национальный научный центр «Институт почвоведения и агрохимии им. А. Н. Соколовского»

Предложены диагностические средства для выявления горизонтальной неоднородности почвенного покрова. Объяснены причины появления неоднородности в малых почвенных контурах. Показаны примеры горизонтальных профилей отдельных свойств дерново-подзолистых и черноземных почв. Обсуждены некоторые следствия наличия горизонтальной неоднородности для практики точного земледелия.

Ключевые слова: неоднородность, диагностические средства, причины, горизонтальные профили.

В. В. Медведев

Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії ім. О. Н. Соколовського»

НЕОДНОРІДНІСТЬ ЯК ЗАКОНОМІРНИЙ ПРОЯВ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ҐРУНТОВОГО ПОКРИВУ

Запропоновано діагностичні засоби для виявлення горизонтальної неоднорідності ґрунтового покриття. Пояснено причини появи неоднорідності у малих ґрунтових контурах. Продемонстровано приклади горизонтальних профілів окремих властивостей дерново-підзолистих і чорноземних ґрунтів. Обговорено деякі наслідки існування горизонтальної неоднорідності для практики точного землеробства.

Ключові слова: неоднорідність, діагностичні засоби, причини, горизонтальні профілі.

V. V. Medvedev

National scientific center «A.N. Sokolovsky Institute for soil science and agrochemistry»

HETEROGENEITY AS NATURAL DISPLAY OF HORIZONTAL STRUCTURE OF A SOIL COVER

Diagnostic means for revealing of horizontal heterogeneity of a soil cover are offered. The reasons of heterogeneity occurrence in small soil contours are explained. Examples of horizontal profiles of separate properties of sod-podzol and chernozem soils are shown. Some consequences of horizontal heterogeneity presence for practice of precise agriculture are discussed.

Keywords: heterogeneity, diagnostic means, causes, horizontal profiles.

В данной статье неоднородность рассматривается как закономерное изменение свойств почвенного покрова в горизонтальном направлении в пределах небольших пространств – элементарного почвенного ареала или полипедона (в американском контексте). Такое понимание неоднородности следует отделить от традиционного взгляда на неоднородность как следствие формирования зональных типов почв под действием различных климатических, литологических и других факторов, а также от неоднородности, которая присуща почве на уровне профиля (неоднородность в вер-

тикальном направлении), отдельного генетического горизонта, агрегата и даже на молекулярном и ионном уровнях (Шеин, 2001).

Существование неоднородности в пределах малых ареалов является доказательством множественности выражения строения и свойств почв при почти полной идентичности факторов почвообразования (Раменский, 1937, по Карпачевскому, 2001; Иенни, 1948), следствием существования не жестких (функциональных), а более сложных (которые выявляются лишь с помощью методов вероятностной статистики) связей между свойствами почв и условиями среды (Михеева, 2005), разнонаправленного действия факторов почвообразования и особенно сложных и противоречивых связей растительности, почвы и климата (Карпачевский, 2001).

Ф. И. Козловский (2003) был одним из первых, кто пояснил неоднородность почвы статистической неоднородностью распределения, то есть не случайным характером варьирования характеристик почвы. Неоднородность Ф. И. Козловским рассматривается как следствие природы почвы, а не привносится искусственно за счет метода исследования. Иначе говоря, горизонтальная неоднородность – это закономерное, а не случайное явление. Для разделения закономерности и случайности используется так называемая теория регионализированных переменных, которая предлагает специальный математический аппарат. В частности, если какое-либо свойство почвы характеризуется значительным коэффициентом пространственной вариабельности, имеет достоверную автокорреляционную функцию и спектральную плотность дисперсии с явными пиками колебаний, с очевидностью можно констатировать наличие неоднородности.

Попытки изучить закономерности горизонтальной неоднородности почв и их свойств ранее предпринимались неоднократно. По сути, учение о структуре почвенного покрова – это одна из важнейших концепций, развитых в этом направлении (Фридланд, 1972). Еще ранее исследовали различные комплексы, комбинации, почвенные катены. Все это были попытки исследовать закономерности горизонтального распределения почв. По мнению С. В. Горячкина (2006), закономерности горизонтального распределения почв трансформировались сегодня в учение о горизонтальном профиле почв, которое находится на начальном этапе своего развития, да и то фактически относительно развито только в географии почв. Специалистам по гидрологии, физике, микробиологии, минералогии и другим разделам почвоведения еще только предстоит получить соответствующие пространственные данные. Да и агрохимики, которые предпочитают проводить агрохимическую паспортизацию с помощью маршрутной съемки вместо закладки регулярной сети точек опробования, получают искаженные данные об обеспеченности пространства поля питательными веществами (Самсонова, 2001).

ЦЕЛЬ И МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Цель статьи – выявить горизонтальную неоднородность почвенного покрова, ее причины, продемонстрировать примеры горизонтальных профилей и обсудить некоторые следствия существования горизонтальной неоднородности для практики точного земледелия.

В статье использованы материалы исследований горизонтальной неоднородности 6 полей пашни в Волынской (объекты Романив и Колки), Черниговской (Ведильцы), Харьковской (Коротыч и Коммунар) и Донецкой (Донецк) областях. Программа работ включала исследования морфологических, физических, физико-химических и химических свойств почв с использованием известных методов. В исследованиях принимали участие сотрудники Волынского и Черниговского производственных центров по охране плодородия почв и качества продукции Минагрополитики Украины.

Почвенный покров полей в Полесье состоял преимущественно из дерново-подзолистых в различной мере оглеенных почв, в Лесостепи – чернозема типичного и темно-серой оподзоленной почвы, в Степи – чернозема обыкновенного. Измерения и отбор образцов осуществляли на элементарных делянках, заложенных по регулярной сетке. На 1 га примерно попадало по 1–2 делянки размером 5 × 5 м. Всего делянок было от 27 до 51, а площадь полей – от 11 до 105 га.

Математическую (статистическую и геостатистическую) обработку осуществляли с использованием стандартных программ Statistica, Surfer и MapInfo. Наиболее важными представлялись оценки вариабельности, дисперсии, размаха колебаний, гистограмм (для определения типа распределения и меры его отклонения от гауссового – нормального распределения), вариограмм (для определения специфических геостатистических параметров – полудисперсии, порога дисперсии, наггет-эффекта и радиуса корреляции), 3-D-диаграмм и особенно 2-D-диаграмм (для установления контуров с различными параметрами плодородия и построения горизонтальных профилей), автокорреляционной функции и ее спектральной плотности дисперсии (для оценки достоверности существования неоднородности и характеристики ее колебаний).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Особенности горизонтальной неоднородности почв и ее причины. Наибольшей неоднородностью характеризуются полесские и лесостепные поля (средние коэффициенты вариации соответственно составляют 0,42 и 0,49), наименьшей (0,30) – поле в Степи (табл. 1). Если воспользоваться известной классификацией Б. Г. Розанова (1975), то при таких коэффициентах неоднородность исследованных почв гарантируется. И действительно, геостатистические оценки подтверждают этот вывод. Автокорреляционная функция почти для всех показателей достоверна, а спектральная плотность дисперсии образует явные пики колебаний. Геостатистические оценки различаются между собой только тем, что достоверность функции прослеживается на разных расстояниях, а пики – в области разных волновых частот. Полудисперсия в большинстве случаев аппроксимируется сферической моделью, на которой ясно выделяются порог дисперсии и радиус корреляции.

Пространственная неоднородность визуализируется на 2-D- и 3-D-диаграммах, причем она почти всегда присутствует независимо от величины коэффициента вариации почвенного свойства.

В качестве примера продемонстрируем результаты статистической и геостатистической обработки двух индивидуальных показателей (островариабельного – содержания подвижного фосфора и умеренно вариабельного – рН) – рис. 1, 2.

Таблица 1

Средние коэффициенты пространственной вариабельности свойств почв в исследованных полях

Свойства почв	Полесье	Лесостепь	Степь
Структурный состав посевного слоя:			
<i>глыбистость</i>	0,64	0,62	0,43
<i>агрономически ценная фракция</i>	0,13	0,13	0,12
<i>пыль</i>	1,90	0,46	1,09
Плотность сложения:			
<i>в посевном слое</i>	0,18	0,06	0,10
<i>в плужной подошве</i>	0,06	0,14	0,07
Твердость:			
<i>в посевном слое</i>	0,24	0,15	0,15
<i>в плужной подошве</i>	0,18	0,12	0,05
Содержание гумуса	0,40	0,09	0,10
рН	0,07	0,11	0,03
Суммарный минеральный азот	0,36	0,44	0,59
Подвижный фосфор	0,56	0,77	0,70
Подвижный калий	0,50	0,72	0,23
Урожай	0,29	0,19	0,18
Средний коэффициент вариации для зоны	0,42	0,49	0,30

Наибольшей неоднородностью характеризуется глыбистость посевного слоя почвы, содержание подвижного фосфора и далее в убывающей последовательности: суммарный минеральный азот, подвижный калий, плотность сложения и твердость посевного слоя, количество агрономически ценных агрегатов. Завершает этот ряд

содержание гумуса и рН. Неоднородность последнего показателя особенно низка (соответственно 0,07; 0,11 и 0,03 в полесских, лесостепных и степных объектах), что может быть следствием слабовыраженной природной гетерогенности рН и отсутствия применения химических мелиорантов в последние 20 лет.

Полученные нами многочисленные геостатистические картографо-аналитические оценки неоднородности позволяют выяснить некоторые закономерности ее проявления в исследованных объектах. Высокой величине вариабельности, как правило, сопутствует неоднородность на различных расстояниях поля. Значит, чем выше вариация и дисперсность, тем скорее в пространственной структуре появляются отклонения от теоремы Ляпунова, устанавливающей обязательную симметричность выборки для большинства природных объектов. Иначе говоря, логично предположить, что высокая вариация (как это констатируется в отношении пространственной неоднородности содержания макроэлементов питания) становится следствием не только разнонаправленного действия природных факторов, но и некоторых других. К ним можно отнести действие антропогенных факторов. Следовательно, при высокой величине вариабельности и отклонении выборки от гауссовой кривой заранее можно предполагать участие деятельности человека в формировании неоднородности.

Вероятность появления асимметричности и эксцесса выборки (или то же самое – усложнение пространственной структуры свойства) прямо связана с коэффициентом вариации и величиной дисперсии. Причем, подчеркнем вновь: при высокой величине вариабельности вероятность появления нагетт-эффекта (неоднородность на расстояниях меньше шага опробования) возрастает.

Появлению нагетт-эффекта, как правило, сопутствует автокорреляционная функция с достоверным коэффициентом корреляции. То есть пространственные оценки неоднородности, хотя во многом и различны и характеризуют различные стороны этого явления, все же вполне согласуются между собой. Поэтому есть все основания предполагать, что при высокой вариабельности свойства вероятность появления неоднородности высока на всем пространстве поля. Одновременно с этим возрастает вероятность появления достоверной автокорреляционной функции. Чем выше вариабельность, тем выше вероятность появления нескольких пиков волн на кривой спектральной плотности дисперсии. И, наконец, чем выше вариабельность, тем сложнее пространственная структура неоднородности свойства. Однако и при небольших коэффициентах пространственной вариации вероятность появления неоднородности достаточно высока.

Подчеркнем: для распознавания неоднородности необходимо, кроме коэффициента вариации, убедиться в наличии достоверной автокорреляционной функции и ясно выраженных пиков на кривой спектральной плотности дисперсии. Причем важно иметь в виду, что невысокий, как и высокий коэффициенты вариации, еще не свидетельствуют соответственно об отсутствии или наличии неоднородности. Коэффициент вариации, скорее всего, является индикатором меры хаоса в пространственных оценках поля (при отсутствии неоднородности), а неоднородность – мера их упорядоченности. Только при наличии неоднородности коэффициент вариации является ее мерой.

Кроме разнонаправленного действия факторов почвообразования, нельзя не упомянуть еще об одной причине появления горизонтальной неоднородности.

Априори (да и в литературе этому находится множество подтверждений) считается, что основным природным фактором дифференциации почвенного покрова является рельеф и связанное с ним перераспределение влаги и разнообразных соединений в пространстве поля с повышенных элементов в пониженные, либо под действием силы тяжести. Рельеф активно корректирует любой почвообразовательный процесс, усиливая его пространственную неоднородность. Это касается процессов эрозии/аккумуляции, оглеения либо оподзоливания, а также всех других процессов, существо которых в той или иной мере связано с разнообразными миграциями веществ.

Роль рельефа весьма отчетливо прослеживается при сопоставлении топографии местности и 2-D-диаграмм распределения на поле различных химических соединений. Как правило, зоны обогащения элементами совпадают с понижениями, зоны обеднения – повышениями. Такие миграции, осуществляющиеся под действием ла-

теральных и вертикальных потоков веществ, усиливают природную неоднородность свойств почв поля.

На рис. 3 демонстрируется совмещенная диаграмма топографии поля с диаграммой пространственной неоднородности подвижного фосфора. Такое совмещение, называемое кокригингом, позволяет, повторяем, выявить определенные тренды (направления) в миграции элементов под влиянием рельефа. Даже без проведения специального анализа хорошо заметно, что в пониженной северо-западной части поля отмечается явное накопление подвижного фосфора. Подчеркнем: это касается фосфора, миграционные способности которого весьма ограничены.

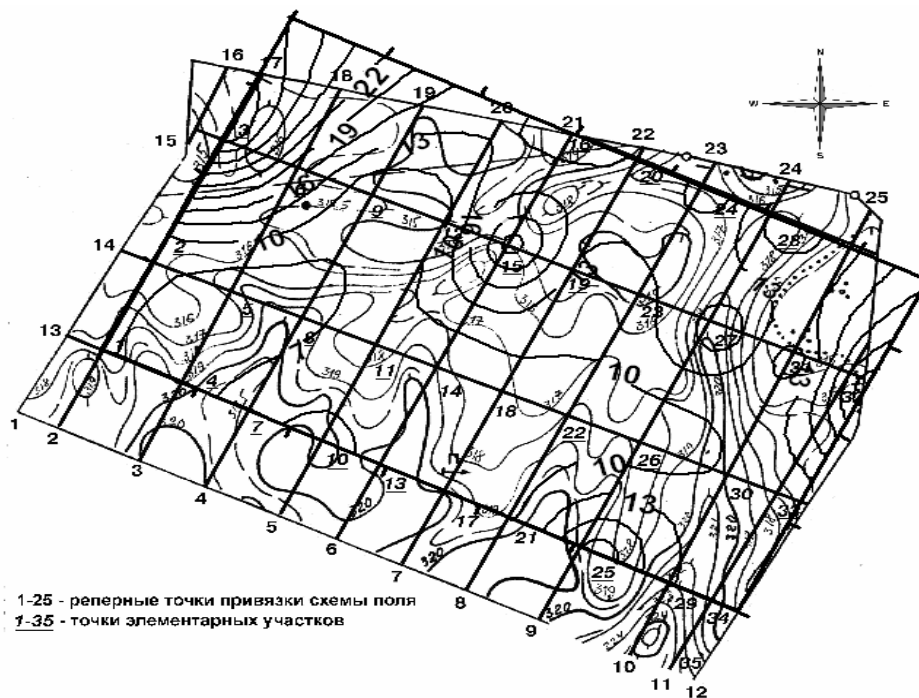


Рис. 3. Совмещенные 2-D-диаграммы (кокригинг) рельефа и пространственной неоднородности подвижного фосфора. Объект Романив

В зависимости от различных условий рельефа (точнее, мезорельефа) и в соответствии с этим различным увлажнением отдельных участков развиваются зависящие от последнего процессы агрегации/деагрегации, уплотнения/разуплотнения, изменяется воздушный и микробиологический режимы и в целом формируется неоднородность. Это своего рода отдаленные последствия различий в рельефе для неоднородности поля.

Некоторые из отдаленных последствий рельефа для формирования неоднородности свойств поля доказываются на примере пространственного распределения равновесной плотности сложения посевного слоя. На участке поля, где увлажнение повышено, этот показатель под действием давления ходовых систем машинно-тракторных агрегатов проявляет явную тенденцию к возрастанию.

Особенно наглядна дифференциация pH в зависимости от рельефа поля. Оказалось, что на возвышенных участках pH явно стремится в кислую сторону, на пониженных – становится почти нейтральной. Скорее всего, это может быть связано с особенностями миграции кальция с возвышенных частей поля в пониженные либо следствием более заметных потерь кальция с вертикальными потоками на возвышенных частях поля. Но как бы то ни было, явления дифференциации свойств почв под действием прошлых либо современных потоков представляются важным вкладом в формирование неоднородности.

Таким образом, рельеф, видимо, является первопричиной возникновения неоднородности почвенного покрова в природных условиях. Одновременно рельеф формирует механизм, благодаря которому неоднородность поддерживается во времени и не ослабевает даже спустя 150 лет химизации и обработки (Dawson, 2006; Godwin et al., 2002).

Примеры горизонтальных профилей. Горизонтальный профиль почв устанавливается на основе анализа 2-D- и 3-D-диаграмм, вариограмм, автокорреляционной функции (при условии достоверности ее отличия от нуля) и спектральной плотности дисперсии. Так, например, горизонтальный профиль такого важного в агрономическом отношении показателя, как глыбистость в посевном слое (на объекте Ведильцы), описывается следующим образом. В поле размером примерно 750 × 1300 м можно выделить два сравнительно больших контура («горизонта») с содержанием глыб менее 20 % и более 20 %. Такая величина, как известно, является допустимой при проведении основной обработки. Следовательно, более высокое содержание глыб определяет обязательность дополнительной послеплужной обработки.

Один из контуров состоит из трех отдельных кусков. Линии раздела между контурами показаны на 2-D- и 3-D-диаграммах (рис. 4). Максимальный горизонтальный размер контура составляет примерно 350–400 м, что соответствует радиусу корреляции на вариограмме. Пространственную неоднородность содержания глыбистости на поле следует признать достоверной, что доказывает автокорреляционная функция с достоверным отличием от нуля в области средних шагов (лаг-расстояние), а также ясно выраженный пик спектральной плотности дисперсии. В крупные контуры вложены несколько менее крупных контуров со значениями глыбистости соответственно 25–30 и 15–5 %. Возможность неоднородности в крупных контурах доказывается наличием наггет-эффекта.

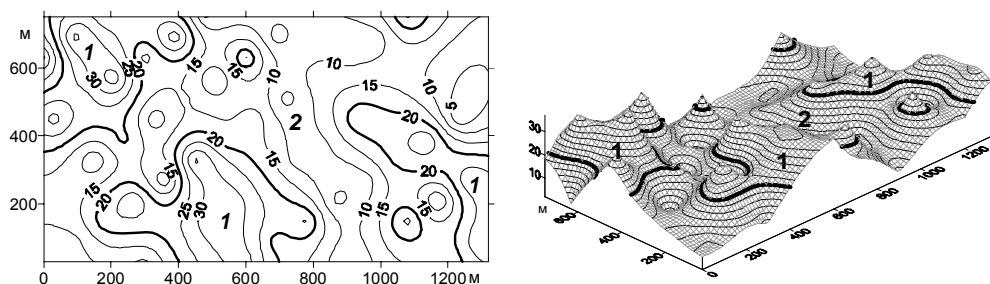


Рис. 4. Горизонтальный профиль почвенного покрова объекта Ведильцы по неоднородности частного свойства (содержания в посевном слое глыбистой фракции): 1 – > 20%; 2 – < 20%

Таким образом, горизонтальный профиль объекта Ведильцы, установленный по частному критерию, включает чередование участков с различной количественной и качественной характеристиками.

Горизонтальный профиль может быть также установлен по синтетической оценке, разумеется, при условии, что отдельные составляющие этой оценки совместимы и не образуют непреодолимых противоречий. Так, для того же объекта оказалось возможным построить горизонтальный профиль по суммарной оценке обеспеченности почв поля макроэлементами питания – суммарным азотом, подвижными формами фосфора и калия (рис. 5).

Примеры горизонтальных профилей других объектов, полученные на основании частных и интегральных оценок пространственной неоднородности, приведены на рис. 6 и 7. На рисунках демонстрируются профили, у которых достоверна автокорреляционная функция, явно выражен пик на спектрограмме дисперсии, а по вариограммам устанавливаются размеры радиусов корреляции.

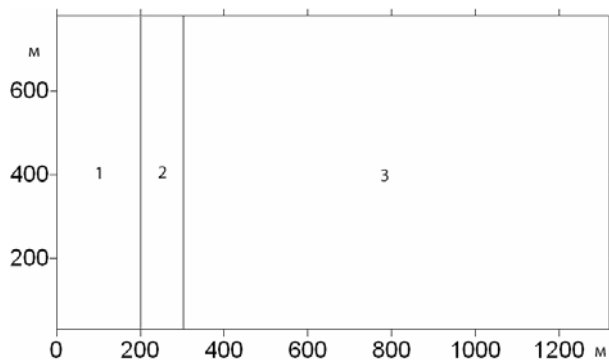


Рис. 5. Горизонтальный профиль почвенного покрова объекта Ведильцы по неоднородности интегрального свойства (обеспеченности почв элементами питания: 1 – высокая; 2 – умеренная; 3 – низкая)

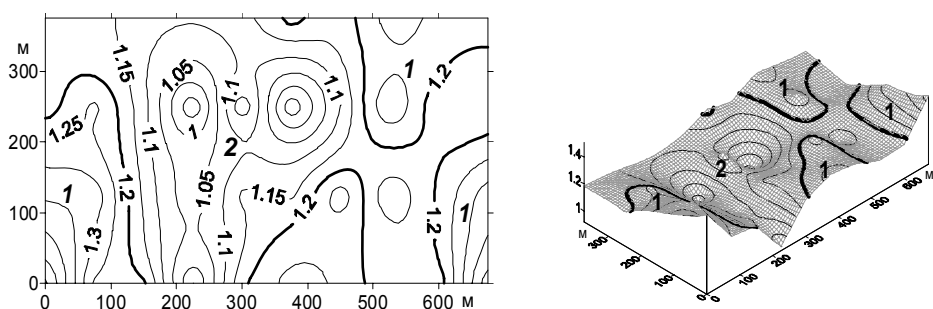


Рис. 6. Горизонтальный профиль почвенного покрова объекта Романив по неоднородности частного свойства (плотности сложения в посевном слое: 1 – $>1,2 \text{ г/см}^3$; 2 – $<1,2 \text{ г/см}^3$)

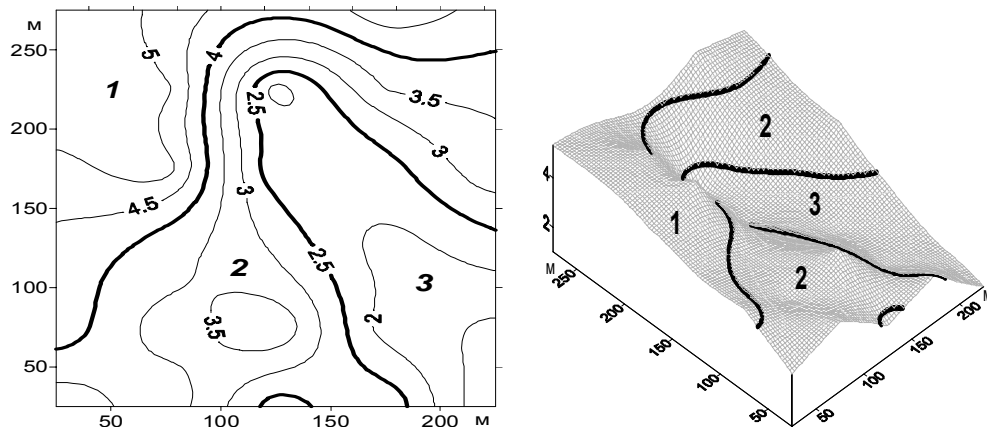


Рис. 7. Горизонтальный профиль почвенного покрова объекта Колки по неоднородности частного свойства (содержанию гумуса, %: 1 – > 4 ; 2 – $4-2,5$; 3 – $< 2,5$)

НЕКОТОРЫЕ СЛЕДСТВИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ДЛЯ ПРАКТИКИ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

Выше мы попытались описать горизонтальные профили на примере почвенного покрова исследованных полей. Подчеркнем: горизонтальный профиль – это, прежде всего, закономерное чередование в пространстве отдельных контуров порой очень

сложной конфигурации и самых разных размеров. Как мы можем вполне уверенно предположить, локализация и форма контуров регулируются главным образом мезорельефом и хозяйственной деятельностью человека. Контурные, полученные на основании интегральных критериев, как правило, намного проще, чем контурные, образованные с использованием частного критерия. Кажется, и у частных, и у интегральных контуров имеются определенные перспективы в точном земледелии. С помощью частных критериев можно образовать контурные, для которых может оказаться важным углубление обработки (например, при повышенных параметрах плотности сложения в плужной подошве), либо контурные, где в первую очередь требуется известкование (при крайне низких показателях рН), либо увеличить число предпосевных культиваций (вследствие повышенной глыбистости).

С помощью интегральных критериев и на образованных с их помощью контурных следует запланировать комплексные агротехнологии, направленные, например, на выравнивание плодородия разных частей поля, изменение структуры угодий либо севооборота. Наконец, может оказаться полезным постоянный или временный вывод части поля из обработки.

Итак, развитие представлений о горизонтальном профиле почв имеет безусловное значение для теории почвоведения как фундаментальной науки и для сельскохозяйственной практики.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Горячкин С. В. Проблема приоритетов в современных исследованиях почвенного покрова: структурно-функционально-информационный подход или парциальный анализ / С. В. Горячкин // Научные труды «Современные естественные и антропогенные процессы в почвах и геосистемах». – М., 2006. – С. 53-80.

Иенни Г. Факторы почвообразования / Г. Иенни. – М.: Изд-во иностр. лит., 1948. – 347 с.

Карпачевский Л. О. Некоторые методические аспекты учета пространственной неоднородности в почвоведении / Л. О. Карпачевский // Масштабные эффекты при исследовании почв. – М.: Изд-во МГУ, 2001. – С. 39-46.

Козловский Ф. И. Теория и методы изучения почвенного покрова / Ф. И. Козловский // Почвенный индивидуум и методы его определения. – М.: ГЕОС, 2003. – С. 249-267.

Михеева И. В. Пространственные флуктуации и вероятностно-статистические распределения свойств каштановых почв Кулундинской степи / И. В. Михеева // Почвоведение. – 2005. – № 3 – С. 316-327.

Розанов Б. Г. Генетическая морфология почв / Б. Г. Розанов. – М., 1975. – 286 с.

Самсонова В. П. Структуры пространственной вариабельности агрохимических свойств пахотной дерново-подзолистой почвы / В. П. Самсонова, Ю. Л. Мешалкина, Е. А. Дмитриев // Е. А. Дмитриев. Теоретические и методологические проблемы почвоведения. – М.: ГЕОС, 2001. – С. 318-331.

Фридланд В. М. Структура почвенного покрова / В. М. Фридланд. – М.: Мысль, 1972. – 423 с.

Шейн Е. В. Пространственная неоднородность свойств на различных иерархических уровнях – основа структуры и функций почв / Е. В. Шейн, Е. Ю. Милановский // Масштабные эффекты при исследовании почв. – М.: МГУ, 2001. – С. 47-61.

Dawson C. J. Implications of Precision Farming for Fertilizer Application Policies // Наук. вісник Національного аграрного університету. – 2006. – Вип. 101. – С. 27-42.

Godwin R. J., Earl R., Taylor C., Wood G. A., Bradley R. I., Welsh J. P., Richards T., Blackmore B. S., Carver M., Knight S. Precision farming of cereals // Practical guidelines and crop rotation. Project Report 267, Home-Grown Cereals Authority. – London. – 2002. – P. 8.

Надійшла до редколегії 02.06.10