

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СОПРЯЖЕННОСТЬ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОЧВ

Рассмотрен морфогенез почвенных слоев как взаимосвязь относительного положения верхней и нижней границ поверхностей.

Определим почвенно-морфологическую поверхность (ПМП) как пространственное положение точек границ слоев почвенных горизонтов или других выделенных морфологических элементов (морфемы, морфоны, по Б.Г. Розанову [1]). ПМП представляет собой пространственно распределенную случайную величину, которая в любой точке в момент времени определена как функция [2]:

$$z = f(x, y), \quad (1)$$

где x, y – плановые координаты; z – высота/глубина границы, которая является границей раздела морфоструктур. X и Y рассматриваются в качестве базы системы с параметрами, определяющими шаг измерений в пространстве. В данном случае шаг измерений по координате Y задан постоянной величиной – 5 см, а по координате X зависит от положения характеристических точек. Шаг по координате Y определялся соответственно среднему расстоянию между измерениями по координате H (см), а границы горизонтов – глубиной Z (см). Разница между морфологическими поверхностями является толщиной слоя (мощность, см). Такой подход в морфологических исследованиях представляется как инвариант, не зависящий от масштаба отображения объекта. Формализованное представление поверхности позволяет отображать её с помощью топографических и векторно-топографических карт [2].

Геометрически структура поверхности слоев почвенного профиля формируется при условии вертикальной и радиальной сопряженности почвообразующих процессов (ПП). ПП воздействует на структуру морфологической поверхности (СМП), в свою очередь структура, изменившись, корректирует интенсивность и направленность ПП (ПП → СМП → ПП). Саморазвитие почвенного профиля (СПП) есть результат почвообразовательных процессов и морфогенеза: СПП = ПП ↔ СМП. Акты морфогенеза могут иметь самое разное выражение. Например, рост корня на границе гумусового и элювиального горизонтов приведет к частично вытеснению материала элювиального горизонта. После выпадения дерева и деструкции древесины корня, то место, где он находился, замещается корнями многолетних трав и минеральной основой с большей частью аккумулятивно-гумусового горизонта. В том же месте, куда вытеснялся осветленный материал элювиального горизонта, будет наблюдаться существенное увеличение его мощности. Часто причиной увеличения мощности осветленного элювиального горизонта является не локальное действие кислых растворов опада, а всего лишь механическое вытеснение минеральной части слоя при росте корней дерева. Следуя логике Аристотеля, важность имеют не столько способ образования и материал тела, сколько его форма, так как

именно она придает телу смысл его существования и определяет дальнейшие процессы. Тем самым в материальность объекта вплетается идея.

Есть попытки объединить почвенный процесс и морфогенез в одном термине – морфопроцесс [3], который представляет множество взаимосвязанных актов, приводящих к изменению формы. Однако введение морфопроцесса, скорее всего, является избыточной сущностью (брита Оккама), так как для обозначения подобных явлений существуют вполне определенные и самодостаточные понятия – метаморфоз и морфогенез. Тогда СПП – это закономерный ряд метаморфозы, фиксируемый через изменение границ пedomорфологических поверхностей. Получается, что СПП в самом простом виде можно рассматривать как результат изменения положения границ почвенно-морфологических поверхностей. Очевиден и обратный тезис: всякие изменения СМП есть результат СПП. Тогда положение границы слоя, следующее из формулы (1), выражает текущий акт ПП.

Теоретические и методические предпосылки

Наиболее детальные и последовательные исследования формы границ поверхностей почвы и слоев элювиальной части профиля проведены В.И. Бондарь, М.Н. Строгоновой (1979) [4]. По их мнению, неоднородность строения почвенных слоев является «важной особенностью почв подзолистого типа», которая наблюдается на макро-, мезо- и микроуровнях, выраженная варьированием «в широких пределах морфологических, физических и химических свойств их верхних горизонтов (A_1, A_{1A_2}, A_2, A_2B)». Моделирование почвенной поверхности основано на изучении естественного варьирования [5, 6]. Описана эрозионная модель, принимающая во внимание декомпрессионную память микрорельефа (нанорельефа) поверхности при имитации стадий его развития [7, 8]. Концептуальная важность микро топографии в моделировании образования стока, депрессий, оценки эрозии на поверхности почвы получила общее признание [8–10]. С использованием микро топографии изучаются морфологические и физические неоднородности лесных почв [11]. Показано, что высокая вариабельность поверхности почвы свойственна лесным почвам [12–14]. Основной идеей данного исследования являлось использование микро топографии для фиксации морфологических поверхностей границ почвенных слоев элювиальной части профиля [15].

Изменения пedomорфологических поверхностей всегда согласуются с изменением плотности сложения почвы. Плотность определяется составом твердой фазы и плотностью упаковки слагающих ее частиц. Изменение плотности в результате почвообразования обуславливает изменение геометрических размеров границ почвен-

ных горизонтов. На ровной поверхности почвы действие почвообразующих факторов распределено равномерно. При условии равной интенсивности почвообразования границы горизонтов должны изменяться согласованно с изменением поверхности, т.е. должен формироваться слой равной мощности независимо от изменения высоты поверхности. Всякое искажение этого условия связано с тем или иным нарушением естественного сложения слоя или наличием участков, где пониженное сопротивление почвообразованию. При морфологических исследованиях это положение вводится априори, однако в реальности равенство интенсивности почвообразования не соблюдается и существует множество явлений, нарушающих эти дефиниции.

Объекты исследования

Исследования проводились в Ижморском районе Кемеровской области в поселке Ломачевка на стационаре НИИ ББ. Объекты располагались на просеке ЛЭП-500 кВ и окружающем сосновом лесу. Из всего спектра типов почв, присутствующих на ключевой площади, для изучения трехмерного морфологического строения почв выбраны дерново-подзолистые почвы со вторым гумусовым горизонтом. Этот тип почв широко распространен в лесной зоне Южной тайги Западной Сибири, что дает возможность для широких практических приложений результатов данной работы. Выбор элювиального слоя в качестве объекта исследования определен несколькими причинами. По наблюдениям на стенках разрезов и в траншеях, карьерах в районе исследования отсутствует пространственная сопряженность границ горизонтов элювиального и иллювиальных, поэтому исследования ограничены только слоем до верхней границы горизонта В₁. Горизонт В₁ постепенно переходит в горизонт В₂, и границу с той же точностью, что и вышележащие слои, определить достаточно сложно, поэтому нижняя граница иллювиального горизонта исключена из исследования.

Другой причиной выбора элювиального слоя в качестве объекта исследования является то, что элювиальный слой наиболее отзывчив на воздействие биогенных и антропогенных факторов, что делает его удобным для изучения саморазвития почвенного профиля. Морфологические, физические, химические свойства горизонтов дерново-подзолистых почв района исследования близки к типовыми свойствами этих почв Западной Сибири [15]. Элювиальный слой с накоплением кремнезема (SiO₂) назовем осветленным (оподзоленным) (El). Элювиальный слой включает все горизонты, из которых происходит вымывание полуторных окислов и оснований до верхней границы иллювиального слоя (В₁). Обычно его называют элювиальной толщей [16]. Однако слово «толща» используется в тех случаях, когда форма границ не имеет значения. В данной статье именно форма границ является предметом обсуждения, поэтому термин «толща» используется только в смысле толщины.

Методика исследования

Изменение положения границ почвенных горизонтов можно зафиксировать методом последовательных вертикальных срезов [17]. Трехмерное изображение

морфологических свойств почв можно получить с помощью последовательных вертикальных срезов с фиксированным шагом измерений. Данный метод позволяет проводить измерения положения границы в трех координатах. На вертикальной стенке среза фиксируются границы горизонтов. В пределах горизонта выделяются и очерчиваются области, отличные от остальной части горизонта по морфологическим свойствам. Для проведения измерений границ горизонтов и положения морфонов в трехмерной системе координат использовалась установка, представляющая систему реек, организующих базовую плоскость, на которую проецируются поверхности почвы и горизонтов.

Трехмерная морфометрия дает возможность зафиксировать рисунок поверхности морфы с точностью до 1 мм, что позволяет перейти от вертикального среза к его горизонтальному отображению в виде карты горизонталей нанорельефа поверхности почвы и горизонтов. Так как поверхности раздела горизонтов оцифрованы в натурных условиях, то имеется возможность визуализировать «обратную сторону» почвенных горизонтов и пространственно сопоставить визуальные морфоструктуры поверхности горизонтов с другими наблюдаемыми морфами и провести обработку данных методами, принятыми в геодезии, картографии, статистике. Для визуализации изображения использовался Serfer. Базовый масштаб картографирования – 1:5. В этих масштабах хорошо прослеживаются изменения высот, глубин слоев в пределах 5–10 мм, что позволяет с высокой точностью отображать рельеф поверхности, значимый для морфологических исследований почв, который рассматривается как пространственно распределенная случайная величина. Положения границ слоев могут существенно изменяться в течение года, поэтому при сопоставлении морфологических поверхностей требуется обязательный учет влажности и объемной массы [18].

Для выяснения обстоятельств сопряжения границ слоев горизонтов почвенного профиля использован метод последовательных вертикальных срезов, позволяющий с определенной степенью дробности создать модели поверхностей. При этом часть информации о строении пedomорфологической поверхности теряется в срезаемом слое. Очевидно, что потерю можно минимизировать, делая более тонкие срезы, но при этомкратно возрастает объем работы. Следовательно, нужно выбирать золотую середину и на основе анализа изменения границ слоя на первоначальном срезе сделать выбор параметров базы таким образом, чтобы частота измерений вдоль стенки разреза была сопоставима с шагом вертикальных срезов.

Кроме потери информации в срезаемой части почвы существуют другие методические сложности при проведении эксперимента. Прежде всего, следует указать на неопределенности диагностики естественных границ почвенных слоев, обусловленные колебанием границ за счет смещения их на один диаметр почвенного агрегата вверх или вниз, что задает нижней уровень неопределенности ФМП в интервале примерно 5 мм от границы горизонта. Верхний предел точности измерений обусловлен тем, что колебания границ морфологических поверхностей почвы более 10 мм считались значимыми, особенно в антропогенно-измененных

почвах, где весь сформированный слой иногда составляет первые сантиметры. В этих почвах при меньшей точности форма границы сильно упрощается и даже превращается в прямую линию.

Другой вид неопределенности обусловлен отклонениями от вертикали. Эти отклонения контролировались с помощью уровня. Чем глубже положение измеряемой границы от положения базовой плоскости, тем больше возможное отклонение от вертикали, тем выше неопределенность. Ровность стенки проверялась рейками и препарировалась ножом до нужной степени. Таким образом, область неопределенности обусловлена использованными уровнями, вертикальностью и ровностью препарированной вертикальной стенки разреза.

Третий вид неопределенности связан с трудностью диагностики почвенных горизонтов и их различиями на границах. Например, трудности фиксации положения границы возникают в случае затухания прокраски в некоторой области на границе слоя, так что невозможно точно сказать, где он заканчивается. Поэтому для трехмерной морфометрии выбраны почвы, где границы слоев ясно обозначены на вертикальном срезе. Различия свойств, на основе которых эти границы выделены, должны быть оговорены до проведения эксперимента. При трехмерном морфологическом изучении дерново-подзолистых почв горизонты A_1 , E , второй гумусовый очевидно отличались по цвету и плотности сложения. Учитывая все эти неопределенности, возникающие при фиксации границы слоя, значимыми считались всякие изменения положения границы более 0,5 см.

Таким образом, несмотря на то, что морфологические поверхности представляют собой сложный и малоизученный объект в почвоведении, можно предположить, что процессы, их формирующие, должны быть пространственно сопряжены.

Результаты

Всякую поверхность можно моделировать наклонной плоскостью, расположив её так, что она окажется в середине между точками высотных уровней. При минимизации среднеквадратичных отклонений натурных высотных отметок получается планарная регрессионная модель:

$$Z(X,Y) = C + BY + AX,$$

где C – свободный член, отражающий начальную точку отсчета (уровень высоты пересечения координатной оси); B – уклон поверхности по координате Y ; A – уклон поверхности по координате X .

При формировании мощности гумусового слоя верхняя и нижняя границы должны быть сопряженными, а зависимость между ними изменяться в различных почвенно-экологических ситуациях (Захарченко и др., 2006) (рис. 1). Проведя дисперсионный анализ зависимости высоты рельефа поверхности почвы от глубины границы

A_1 , выявлено несколько основных типов взаимосвязи между этими морфологическими поверхностями.

Первый тип – линейно согласованные поверхности, фиксированные на месте, где произрастала сосна до строительства ЛЭП (рис. 1, 1). Это «молодая» поверхность, формирующаяся так, что чем выше верхняя граница, тем ниже нижняя. Второй тип – S-образная кривая, которая наблюдается на рис. 1, 2. На рис. 1, 3 форма зависимости искажена в результате антропогенного воздействия при прокладке просеки. Деревья бульдозерами стаскивались по краю просеки. Часть площадки была подвержена механическому воздействию при волочении так, что пострадали высоты более 8 см. Формирование границы A_1 до отметки глубины –3 см наблюдается в пониженных формах рельефа поверхности почвы, близких к нулевой отметке, но на возвышенных элементах рельефа поверхности почвы наблюдается поднятие границы A_1 до относительной отметки глубины –1 см от нулевого уровня (рис. 1, 3). Возможен и третий тип – несогласие верхней и нижней границ (рис. 1, 4). В этом случае согласование границы A_1 и рельефа поверхности почвы выполняется только на небольших интервалах границы A_1 , а доверительные интервалы высоты рельефа поверхности почвы перекрываются при изменении глубины границы A_1 , что указывает на отсутствие какой-либо взаимосвязи между ними. По-видимому, такие взаимодействия между границами почвенных слоев вызваны действием случайных факторов.

Модель формирования аккумулятивно-гумусового горизонта можно рассмотреть как взаимосвязь трех переменных: верхняя граница A_1 (см) (поверхность почвы), мощность A_1 (см) и его нижняя граница (см). Анализ этой статистической модели показал, что выработка мощности A_1 на одних участках осуществляется через изменения поверхности почвы, а на других преобладающее значение имеют изменения нижней границы. Если почвообразование направлено вертикально от поверхности почвы, то до некоторой глубины граница A_1 должна следовать изменениям поверхности. Изменения мощности можно рассматривать как результат изменения верхней и нижней границ горизонта A_1 . На начальном этапе при малых мощностях изменение границы следует за изменением мощности. С некоторой критической точки величины мощности A_1 углубление нижней границы приводит к увеличению верхней (поверхности почвы). Малые мощности A_1 (1–3 см) характерны для уровней выше 5,5 см и наименьших отрицательных форм рельефа поверхности (рис. 2).

Началу кривой 2 соответствуют возвышенности с минимальными значениями мощности A_1 . Это те места, которые подверглись механическим воздействиям при ветровале или другим способом. На поверхности почвы наблюдаются аномально высокие возвышенности с малой мощностью гумусового горизонта, возникшие в результате педотурбаций. Чуть большие мощности характерны для глубоких депрессий на поверхности почвы.

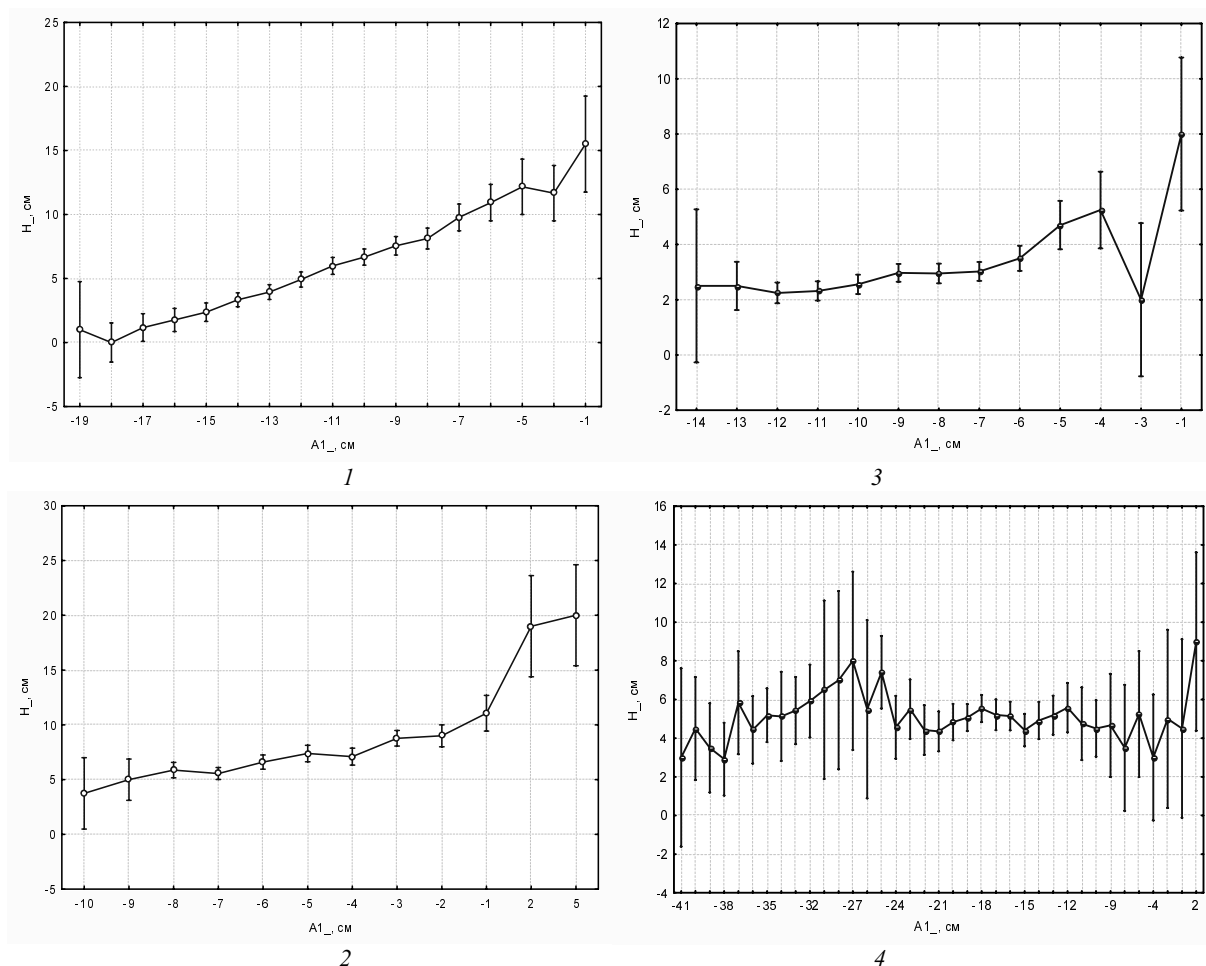


Рис. 1. Результаты дисперсионного анализа взаимосвязи рельефа границы аккумулятивно-гумусового горизонта (A_1 , см) и относительные высоты рельефа поверхности почвы (H , см) на просеке (1, 2) и лесных полянах (3, 4). Нулевой уровень соответствует минимальному значению на поверхности почвы

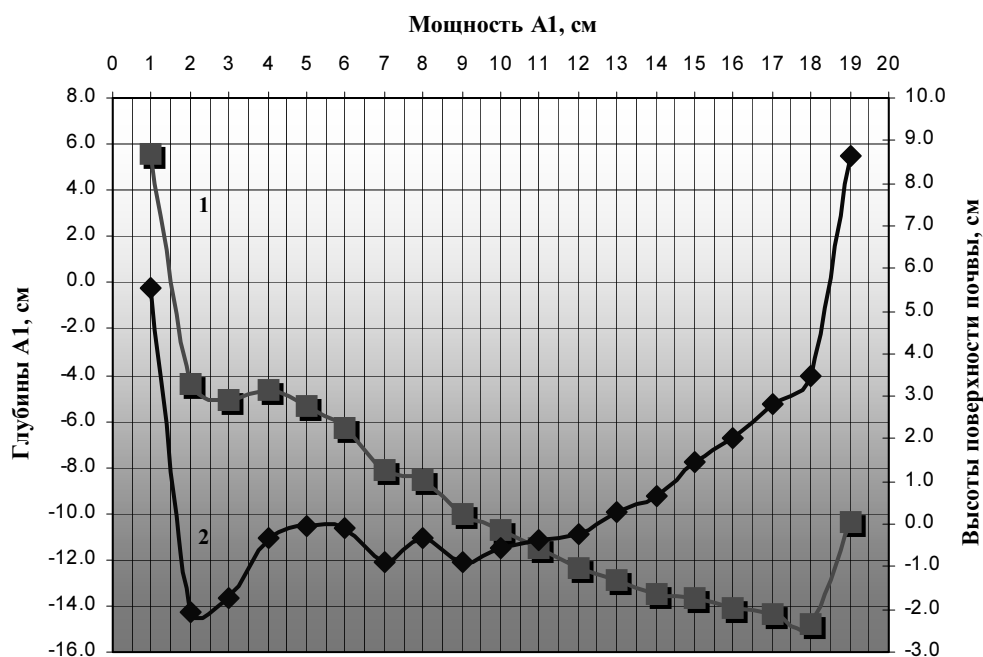


Рис. 2. Зависимость средних величин глубины горизонта A_1 (см) (кривая 1) и высотных уровней рельефа поверхности почвы (кривая 2) от мощности (см) для трех площадей: 02, 06, 061. За нулевой уровень принята плоскость планарной регрессии поверхности почвы

Нижняя граница A_1 следует за изменением рельефа поверхности почвы до определенной мощности. Но постепенно с ростом мощности A_1 начинает подниматься поверхность почвы. Точка пересечения кривых 1 и 2 равна 11,5 см мощности A_1 , при отклонении от планарной плоскости, равной $-0,5$, и глубине A_1 $-10,5$ см. Это положение границ и мощности A_1 является критической точкой для данной почвы. До этой мощности все точки поверхности почвы одинаково отзываются на действие факторов почвообразования, формируя слой, который изменяется в зависимости от рельефа. Её превышение связано с тем, что пространство физически неоднородно и локально возникает возможность углубления нижней границы, что вызывает локальное возрастание поверхности и формирование

бугра. Двухфакторный дисперсионный анализ подтверждает наличие критической точки на кривых зависимостей глубины границы и высотного уровня рельефа поверхности почвы. Мощность гумусового горизонта более 18 см приурочена к аномально высоким отметкам рельефа поверхности – буграм [19].

Воздействие факторов реализуется через систему взаимоотношений между мощностью и границами горизонта. Центральным звеном организации морфологических поверхностей элювиального слоя является элювиальный горизонт. В отдельных местах элювиальный горизонт отсутствует и его мощность равна 0, при этом его верхняя граница A_1 непосредственно контактирует с нижней границей – вторым гумусовым горизонтом (ВГГ). Эта ситуация отражена в начале координат (рис. 3).

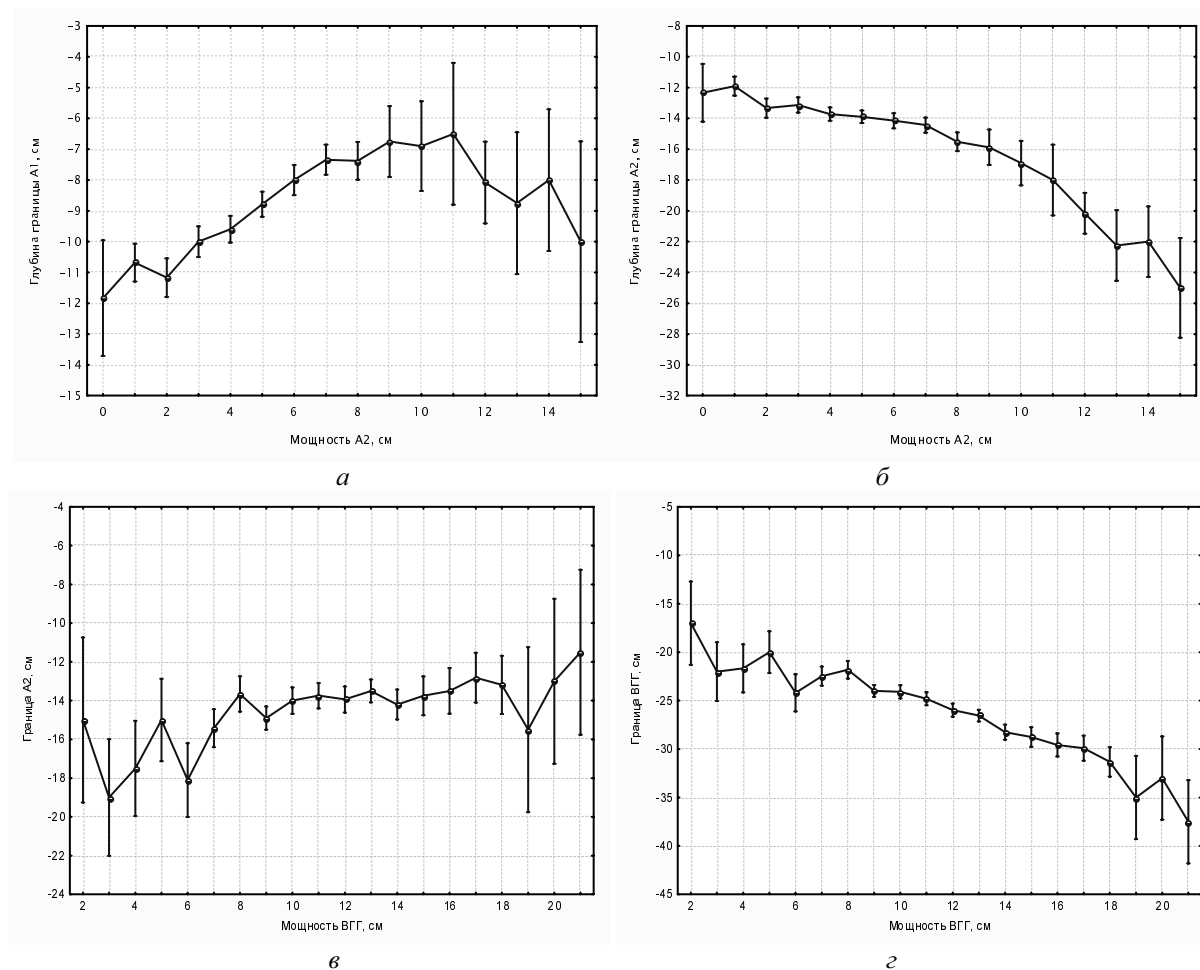


Рис. 3. Зависимость положения верхней (а) и нижней (б) границ от мощности E_1 и соответственно (в), (г) – от изменения мощности ВГГ

Увеличение мощности элювиального горизонта A_2 от 0 до 9 см обусловлено поднятием кверху его границы с горизонтом A_1 с глубины -12 до $-7,5$ см (рис. 3, а). При дальнейшем увеличении мощности A_2 начинает увеличиваться глубина границы гумусового горизонта, но при этом возрастает дисперсия так, что достоверные различия глубины границы A_1 отсутствуют (при $p > 0,95$). Если происходит увеличение глубины верхней границы, то увеличение мощности горизонта может быть обеспечено только через углубление нижней границы горизонта (рис. 3, б).

Углубление границы элювиального горизонта в области трещин обуславливает экспоненциальный рост мощности A_2 . Экспоненциальное увеличение глубины нижней границы за счет сокращения размеров ВГГ и A_2B создает условия для увеличения мощности A_2 при линейном увеличении глубины его верхней границы. При увеличении мощности A_2 до ~ 11 см границы горизонта изменяются в противофазе: чем выше поднимается верхняя, тем ниже опускается нижняя. Равновесная ситуация возникает при мощности A_2 , равной 8 см при глубине верхней границы, равной $-7,4$ см,

нижней — 15,5 см. При увеличении мощности A_2 более 11 см тенденция изменяется. Дальнейшее увеличение мощности A_2 локализовано в области трещин и местах воздействия корней древесной растительности и деструкции этих корней, поэтому существенно возрастает дисперсия границы гумусового горизонта, вызванная случайными факторами, хотя заметна тенденция положительной корреляции верхней и нижней границ при мощности более 11 см. В таких случаях формирование границ несопряженное (тип III). Поэтому существенное возрастание мощности A_2 наблюдается в парцеллах лесного биогеоценоза и их следах на просеке.

Второй гумусовый горизонт представляет собой прокраску верхней части A_2B и нижней части A_2 горизонтов и выделяется в виде пятен. Мощность второго гумусового горизонта обусловлена процессами на его границах и не сопровождается изменением плотности. Поэтому изменения в противофазе вызваны тем, что развитие вниз A_2 возможно только при деградации гумуса и опускании верхней границы ВГГ вниз. В отдельных местах A_1 пространственно сопряжен с ВГГ (точки нулевой мощности A_2).

Верхняя граница ВГГ испытывает существенные колебания относительно поверхности почвы, и можно отметить лишь общую тенденцию её возрастания с увеличением мощности второго гумусового горизонта. Устойчивое снижение глубины верхней границы ВГГ (нижняя A_2) можно отметить только в интервале мощности ВГГ от 9 до 17 см. Равновесная точка этих двух процессов наблюдается при мощности 10,9 см на глубинах — 14 см A_2 и — 25 см. Получена достаточно высокая сходимость наблюдаемых и расчетных значений.

Нижняя граница горизонта A_2B_1 является верхней поверхностью иллювиального горизонта. Дисперсионный анализ позволил установить зависимость — чем глубже опускается граница B_1 , тем больше мощность переходного горизонта и тем глубже опускается серая прокраска второго гумусового горизонта. Следовательно, нижняя граница второго гумусового горизонта (ВГГ) на некотором расстоянии отслеживает уровень поверхности B_1 — границы согласованы по типу I.

На ровной поверхности почвы действие почвообразующих факторов распределено равномерно, что вызывает пространственную однородность морфологических свойств. При достижении некоторого предела мощности дальнейшее углубление границы нижнего горизонта таким способом становится невозможным. При объемной массе более $1,5 \text{ г/см}^3$ корни травянистых растений не способны преодолевать эту плотность, что ограничивает мощность гумусового горизонта и интенсивность формирования профиля [20]. При условии равной интенсивности почвообразования границы горизонтов должны изменяться согласованно с изменением поверхности. Равномерность распределения и пространственная однородность действия внешних факторов почвообразования вызывают формирование границ слоев так, что возникает линейная зависимость между нижней и верхней границами, при этом развитие горизонта стремится к некоторой предельной величине, обусловленной интенсивностью воздействия факторов почвообразования (тип I).

Дальнейшее увеличение мощности может происходить при поступлении минерального материала с атмосферы. Но если в радиальном направлении присутствуют литологические неоднородности, где плотность менее $1,5 \text{ г/см}^3$, то интенсивность почвообразования локально существенно возрастает. За счет этого появляется дополнительная возможность локального увеличения мощности слоя. В области вертикальных трещин элювиального слоя объемная масса составляет $1,2 \text{ г/см}^3$. Если сравнивать плотность слоя в трещине и на удалении от трещины, то различия оказываются достоверны при $p > 0,95$. В областях, прилегающих к вертикальным трещинам элювиального слоя, создаются благоприятные условия для существенного углубления положения границы слоя и формирования языка.

Присутствие неоднородностей сложения нижележащих слоев осложняет рельеф границы и вызывает формирование языков на вертикальном срезе. Следуя логике Б.Г. Розанова [1], при почвообразовании часть грунта переходит из состояния с меньшей (материнская порода) в состояние с большей (почва) скважностью, что должно вызывать появление возвышенности на поверхности горизонта. В тех местах, где локальные условия благоприятны для развития корней травянистых растений, их масса существенно возрастает, дополнительный объем реализуется в поднятии поверхности почвы относительно мест, где объем корней меньше. Тогда в некотором интервале изменения мощности верхняя и нижняя границы горизонтов должны быть пространственно сопряжены в противофазе (тип II).

Возникновение языковатой границы слоя создает дополнительные возможности для саморазвития почвы, ведь теперь поверхность границы между слоями существенно возрастает. Почвообразование протекает не только сверху вниз, но и радиально от стенок языка к центру отдельности, выделяемой этими языками. Следовательно, использование корнями растений различий в плотности сложения почвы позволяет им проникать на большую глубину, а почвообразованию — охватывать больший объем. Однако и этот пространственный ресурс оказывается ограниченным, тогда с некоторой мощностью слоя зависимость положения верхней и нижней границ приобретает случайный характер изменений и не сопряжена с мощностью (тип III).

Рассматривая зависимость между случайными величинами координат точек верхней и нижней поверхностей горизонта и его мощностью с использованием многомерного дисперсионного анализа, появляется возможность оценить этот интервал. Обнаружена некоторая переходная точка мощности слоя, начиная с которой дальнейшее углубление границы возможно только при использовании литологической неоднородности сложения почвенного горизонта. Противофазное изменение верхней и нижней границ может происходить в результате множества других явлений, изменяющих как сложение, так и форму границы. Так, рост древесного корня выдавливает материал снизу и создает возвышенность сверху. При деструкции древесины выработанная форма может закрепляться корнями растений, тогда наблюдается противофазное изменение границ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Розанов Б.Г. Морфология почв: Учеб. для высшей школы. М.: Академический проект, 2004. 431 с.
2. Ласточкин А.Н. Системно-морфологические основания наук о Земле (Геотопология, структурная география и общая теория геосистем). СПб.: Изд-во НИИХ СПбГУ, 2002. 762 с.
3. Миньковский Г.М. Структурный подход в почвоведении // Почвоведение. 1995. № 7. С. 9–18.
4. Бондарь В.И., Строгонова М.Н. Разнокачественность морфонов и микрокомплексность почвенного покрова. Генезис и экология почв Центрального лесного государственного заповедника. М.: Наука, 1979. С. 87–110.
5. Burrough P.A. Multiscale sources of spatial variation in soil. I. The application of fractal concepts to nested levels of soil variation // J. Soil Sci. 1983a. № 34. P. 577–597.
6. Clarke K.C. Scale-base simulation of topographic relief // Amer. Cartogr. 1988. Vol. 15, № 2. P. 173–181.
7. Hansen B., Schönning P., Sibbesen E. Roughness indices for estimation of depression storage capacity of tilled soil surfaces // Soil Till. Res. 1999. № 52. P. 103–111.
8. De Roo A.P.J., Wesseling C.G., Ritsema C.J. LISEM: a single event physically based hydrological an erosion model for drainage basins. I: Theory, input and output // Hydrol. Processes. 1996. № 10 (8). P. 1107–1117.
9. Favis-Mortlock D.T., Boardman J., Parsons A.J., Lascelles B. Emergence and erosion: a model for rill initiation and developments // Hydrol. Processes. 2000. № 14. P. 2173–2205.
10. Govers G., Takken I., Helming K. Soil roughness and overland flow // Agronomie. 2000. № 20. P. 131–146.
11. Planchon O., Esteves M., Silvera N., Lapetite J.M. Microrelief induced by tillage: measurement and modelling of surface storage capacity // Catena. 2001. № 46. P. 141–157.
12. Phillips J.D. The relative importance of intrinsic and extrinsic factors in pedodiversity // Ann. Assoc. Am. Geogr. 2001. № 91. P. 609–621.
13. Phillips J.D., Marion D.A. Pedological memory in forestsoil development // For. Ecol. Manage. 2004. № 188. P. 363–380.
14. Phillips Jonathan D., Marion Daniel A. Biomechanical effects, lithological variations, and local pedodiversity in some forest soils of Arkansas // Geoderma. 2005. № 124. P. 73–89.
15. Захарченко А.В. Метод изучения формы границ почвенных горизонтов в трехмерной системе координат // Вестник Том. гос. ун-та. Информ. бюл. 2004. № 30. С. 58–69.
16. Корсунов В.М., Ведрова Э.Ф. Диагностика почвообразования в зональных лесных почвах. Новосибирск: Наука, 1982. 160 с.
17. Захарченко А.В., Захарченко Н.В. Опыт трехмерного отражения поверхностей почвенных горизонтов в натурных исследованиях // Почвоведение. 2006. № 2. С. 153–160.
18. Андрианов П.И. Об изменениях объема почвы и измерениях вертикальных размеров почвенных слоев // Научно-агрономический журнал. 1928. № 1. С. 9–15.
19. Захарченко А.В. Морфологические особенности нанорельефа поверхности дерново-подзолистых почв лесных биогеоценозов // Вестник ТГПУ. 2005. Вып. 7 (51). Естественные и точные науки. С. 118–126.
20. Зубкова Т.А., Карпачевский Л.О. Матричная организация почв. М.: РУСАКИ, 2001. 296 с.

Статья поступила в редакцию журнала 18 августа 2006 г., принята к печати 11 декабря 2006 г.