

Пространственное распределение почвенных свойств, контролирующих устойчивость почвы к эрозии, на кофейных плантациях Сьерра Сюр де Оахака

Гарсиа Кальдерон Н. Е.¹, Уриостеги Дельгадо Я.¹,
Альварес Ортеага Г.¹, Ибаньес Уэрта А.¹, Красильников П. В.^{1,2}

¹*Факультет естественных наук, УНАМ, Мехико, Мексика*

²*Институт биологии КарНЦ РАН*

Введение

Для горных территорий характерно широкое развитие склоновых процессов. Особенно большое влияние на почвенный покров оказывают последние во влажных горных тропиках и субтропиках, где осадки часто носят ливневый характер (Drees et al., 1987). Кроме того, глинистые почвы с высоким содержанием каолинита, которые обычны для тропических и субтропических природных зон, подвержены, с одной стороны, оползневым явлениям (Dykes, 2002), с другой же стороны – интенсивной поверхностной водной эрозии (Veihe, 2002). Развитие склоновых процессов приводит к формированию крайне неоднородной, мозаичной структуры почвенного покрова, где глубоковыветрелые глинистые почвы соседствуют со сравнительно молодыми профилями на поверхностях, экспонированных эрозией и оползнями (Krasilnikov et al., 2005).

В результате пространственная организация почвенного покрова в горных тропиках и субтропиках во многом зависит от склоновых процессов. В то же время, очевидно, что склоновые процессы регулируются в большой степени внутренними свойствами почв, связанными с устойчивостью последних. Одним из важных показателей, характеризующих устойчивость почв к эрозионным процессам, является стабильность почвенных агрегатов (Gavande, 1992; Martí et al., 2001). Пространственные закономерности распределения стабильности агрегатов довольно трудно предсказать, поскольку, в свою очередь, стабильность агрегатов зависит от целого ряда почвенных параметров, и эта зависимость носит сложный характер. Большинство исследователей указывают на тесную зависимость стабильности агрегатов от гранулометрического состава почв. Обычно считается, что возрастанию содержания илистой фракции

сопутствует увеличению стабильности почвенных агрегатов (Gavande, 1992); при этом в глинистых почвах уже основную регуляторную функцию выполняют характеристики глинистого вещества, такие как минералогический состав и состав поглощающего комплекса (Akaigbo et al., 1999; Warrick, 2002). В последних работах (например, Veihe, 2002) отмечается, что в практических целях удобнее оценивать корреляцию содержания песчаной фракции (противоположной содержанию ила, но более простой и точной в определении) со стабильностью агрегатов; при этом наблюдалась негативная зависимость стабильности агрегатов и содержания песка. Эффект совместного действия содержания илистой фракции и органического вещества на стабильность агрегатов отмечался для тропических почв Бразилии и Венесуэлы (Roth, 1992). На позитивное влияние присутствия органического вещества почвы на стабильность агрегатов указывали многие исследователи (van der Watt and Valentin, 1992; Gavande, 1992; Warrick, 2002). В то же время отмечалось, что агрегирующее действие органического вещества выражено более ярко в почвах лёгкого гранулометрического состава (van der Watt and Valentin, 1992). Ряд авторов (van der Watt and Valentin, 1992) подчёркивает существенный вклад минералогического состава илистой фракции в формирование стабильных агрегатов почвы: согласно этим авторам, наиболее стабильные агрегаты формируются в почвах с преобладанием каолинита, в то время как почвы, содержащие преимущественно смектиты и иллиты, оказываются менее стабильными. Аналогичные результаты приводит А. У. Уоррик (Warrick, 2002), который обнаружил, что почвы с высоким содержанием каолинита и оксидов железа менее компактны (то есть более оструктурены), чем почвы, в которых преобладают минералы структуры 2:1. В то же время последние данные показывают (Denef et al., 2002), что степень устойчивости агрегатов зависит не столько от минерального состава почв или содержания органического вещества по отдельности, сколько от их совместного присутствия. В указанной работе сообщается о том, что максимальная стабильность почвенных агрегатов была обнаружена в почвах, содержащих преимущественно минералы структуры 2:1 в илистой фракции и с высоким содержанием органического вещества. Результаты были интерпретированы как подтверждение существенной роли органо-минераль-

ных соединений в формировании почвенной структуры. Минералы 1:1 и (гидр)оксиды железа и алюминия довольно слабо взаимодействуют – в силу отсутствия постоянного заряда – с органическими веществами почвы, в то время как большинство минералов структуры 2:1 в почве имеет отрицательный заряд (иллиты, вермикулиты, смектиты и смешанослойные образования); поэтому эти минералы формируют комплексы с отрицательно же заряженными гумусовыми соединениями через «мостики» двухвалентных обменных оснований (Nayan et al., 2002). Таким образом, стабильность агрегатов в некоторой степени может быть представлена как сложная функция гранулометрического состава, минералогического состава илистых фракций, содержания и состава органического вещества почв. Очевидно, что каждый из указанных параметров имеет собственные закономерности распределения; в то же время нельзя и отрицать их некоторой взаимной зависимости. Поэтому следует ожидать довольно сложного пространственного распределения устойчивости агрегатов почвы в пространстве. Также очевидно, что в большой степени данное распределение будет иметь локальный характер, зависящий от местных ландшафтных условий.

Задачами данного исследования было: (1) оценить стабильность агрегатов на территории кофейной фермы Эль Синаи, расположенной в субтропическом высотном поясе Сьерра Мадре де Оахака, (2) выявить факторы, определяющие стабильность агрегатов в районе исследований, (3) установить закономерности пространственного варьирования стабильности агрегатов и контролирующих её свойств методом вариографии и интерпретировать полученные результаты.

Объекты и методы

Работы проводились на южном (тихоокеанском) макросклоне горной системы Сьерра Мадре дель Сюр; исследованная часть относится к горной цепи Сьерра Мадре де Оахака.

Коренные породы Сьерра Мадре де Оахака представлены в основном палеозойскими гнейсами и амфиболитами и кайнозойскими интрузиями гранитов; отдельными участками встречаются осадочные породы, в том числе и карбонатные (Hernández et al., 1996). Орография региона связана с мощными тектоническими поднятиями в Плиоцене; ряд данных подтверждает, что менее интенсивное

поднятие происходило и в более позднее время, в том числе и в четвертичное (Morán et al., 1996). В историческое время была зафиксирована повышенная тектоническая активность в регионе: последнее из сильных землетрясений было зафиксировано в 1999 году (Rojas et al., 1987). Тектоническое поднятие привело к сильной расчленённости рельефа. Горные территории характеризуются крутыми склонами, иссечёнными множественными оврагами и ущельями. Вертикальная поясность природных зон в горной системе выражена достаточно чётко. Высоты более 1500 метров заняты сосновыми ксерофитными лесами с единичными фрагментами горных туманных лесов. Ниже 500 метров располагаются тропические ксерофитные леса. Между этими двумя поясами располагаются влажные субтропические леса, которые в Мексике классифицируются как *Bosque tropical subcaducifolio*, Тропические полулистопадные леса (Rzedowsky, 1978). Наиболее распространённые виды древесной растительности в поясе: *Brosimum alicastrum*, *Enterolobium cyclocarpus*, *Pterocarpus acapulcensis*, *Bursera simaruba*, *Caesalpinia coriacea*, *Ceiba pentandra*, *Cordia alliodora*, и *Ficus* spp. (Lorence and García, 1989; Flores and Manzanero, 1999). В настоящее время естественная растительность в некоторой степени изменена, однако, не коренным образом. Основной сельскохозяйственной культурой для региона является кофе, который выращивается под сенью естественной древесной растительности; только кустарниковый ярус вырубается, и практически не используется никакая обработка почвы, кроме копки лунок под кофейные деревья и локального внесения отжимок кофейных ягод. Считается, что качество кофе, выращенного в тени деревьев, выше, чем у кофе, выращенного под открытым солнцем (хотя урожайность существенно ниже) (Moguel and Toledo, 1996); также сохранение естественной растительности предохраняет почву на крутых склонах от эрозии (Staver, 1998).

В поясе субтропических лесов климат характеризуется как тёплый влажный изотермический (García, 1973) со среднегодовым количеством осадков от 1800 до 2000 мм и средними годовыми температурами от 21 до 21.9°C. В регионе выделяется два сезона: сухой с декабря по май и влажный с июня по ноябрь. Следует отметить, что климатические данные недостаточно точны в связи с малым количеством метеорологических станций в регионе.

Предварительные исследования выявили, что на данной территории преобладающими почвенными разностями являются Акрисоли, Алисоли, Лювисоли, Умбрисоли, Файозёмы и Камбисоли (García Calderón et al., 2000; Krasilnikov et al., 2005); почвы классифицировались в соответствии с Мировой Реферативной базой Почвенных ресурсов (WRB), официально используемой для почвенной съёмки в Мексике (FAO-ISRIC-ISSS, 1998).

Исследования проводились на участке «Эль Синаи», расположенном на 16°07'41.5" СШ и 97°06'12.9" ЗД на абсолютных высотах от 700 до 1300 м. Для исследования пространственного распределения факторов, контролирующих эрозионную устойчивость почв, были заложены два квадрата 100x100 м с шагом 1 м. С каждого из квадратов было отобрано по 100 образцов с поверхности (0-20 см) по регулярной сетке. Также для оценки репрезентативности квадратов была составлена картограмма распределения содержания органического углерода в почвах всей территории кофейной плантации на общей площади 156 га на основании 152 пробных точек (образцы также отбирались с поверхности (0.20 см) по регулярной сетке, шаг 100 м).

Содержание органического углерода определялось методом мокрого озоления (van Reeuwijk, 2002), аналогичном определению углерода по Тюрину. Содержание песчаной фракции (частиц размером 0,02–2 мм) определялось просеиванием на ситах после растирания почвы. Степень агрегированности почвы определялась путём подсчёта водостойких агрегатов после погружения 10 агрегатов в воду (метод, аналогичный методу Саввинова), при этом степень агрегированности подразделялась на 4 класса по увеличению числа водостойких агрегатов в почве (Martí et al., 2001). Для интерпретации полученных данных также использовались результаты анализа минералогического состава илистых фракций нескольких почвенных профилей. Илистые фракции выделялись отмучиванием в воде и исследовались в ориентированных препаратах на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 (НПО «Буревестник», Санкт-Петербург), Cu-K α излучение, пропущенное через графитовый монокроматор, 2θ 2-45°, U = 40 kV, I = 25 mA.

Для статистической обработки данных и построения графиков регрессионных зависимостей использовались стандартные версии па-

кетов программ Excel и Statistica (Microsoft). Для построения семивариограмм применялись пакеты программ VARIOWIN 2.2 (Pannatier, 1996) и GenStat (2002) (оценочная версия). Картограммы пространственного распределения свойств строились с помощью программы SURFER, версия 6.02 (Copyright © 1993-1996, Golden Software, Inc.).

Результаты

Обычно отражение свойств почвы в виде картограмм является последним этапом исследований пространственного распределения свойств почв. Однако в настоящем случае задачи не сводились к графическому отражению свойств, последнее было лишь этапом в анализе пространственных закономерностей.

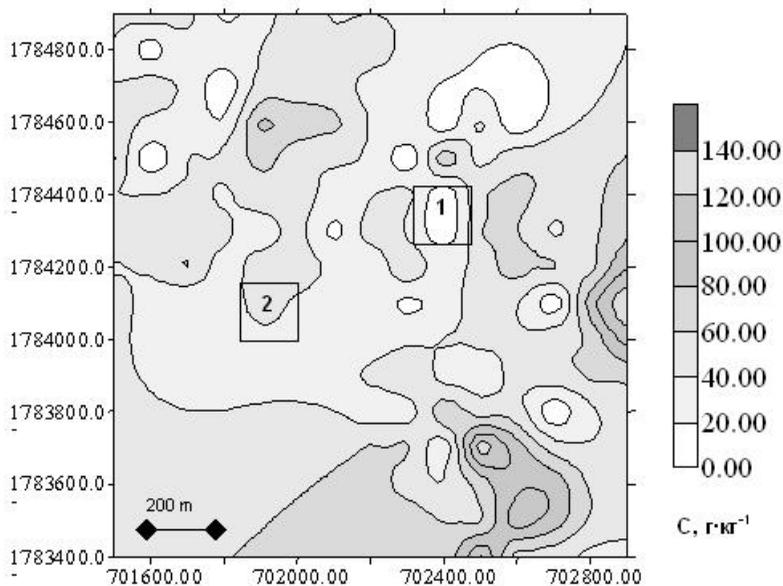


Рис. 1. Пространственное распределение содержания органического углерода в поверхностном горизонте почв кофейной фермы Эль Синаи; 1 – первый малый квадрат, 2 – второй малый квадрат

Распределение содержания органического углерода в верхнем горизонте почв показано на Рис. 1. Разброс значений очень велик:

от почти 0 до более 140 г/кг органического углерода. Связь с формами и элементами рельефа прослеживается только в общих чертах (данные не приводятся): относительно пологие возвышенные участки и днища балок характеризуются наличием почв с более высоким содержанием углерода, а крутые склоны, в особенности выпуклые – почв с низким содержанием углерода. Более точное определение связи содержания органического углерода с формами и элементами рельефа, к сожалению, было невозможно, поскольку подробных топографических карт на регион не существует. Составленная нами топографическая карта (на основании 400 точек съёмки координат с помощью системы геопозиционирования и высот с помощью альтиметра) не отражала всех мелких элементов рельефа, которые, возможно, имеют первостепенное значение для перераспределения органического углерода на поверхности.

На территории фермы были выбраны два квадрата 100x100 м, на участках со сравнительно низким и высоким содержанием органического углерода (Рис. 1). Распределение свойств внутри квадратов было сложным. В первом квадрате отмечается большой разброс значений содержания органического углерода (от 1 до 12 %) (Рис. 2). В основном почвы с высоким содержанием С сосредоточены в юго-западной части квадрата (которая расположена ниже всего по склону). Распределение содержания песчаной фракции имеет несколько иное расположение (вдоль небольшого оврага содержание песка имеет самые высокие значения), однако в целом просматривается связь более песчаных почв с более высоким содержанием углерода. Стабильность агрегатов имеет распределение, мало связанное с содержанием органического С и песчаной фракции: наиболее стабильные агрегаты наблюдаются как в наиболее гумусированных песчаных почвах, так и почвах, бедных органическим С и низким содержанием песка. Во втором квадрате разброс содержания углерода в почве не так велик. По рельефу наиболее гумусированные почвы находятся на возвышенном выровненном участке и в небольших оврагах (скорее, вымоинах). Содержание песчаной фракции варьирует в значительно большей степени и имеет внешне мало общего с распределением содержания С. Внешне стабильность агрегатов соотносится с содержанием органического углерода.

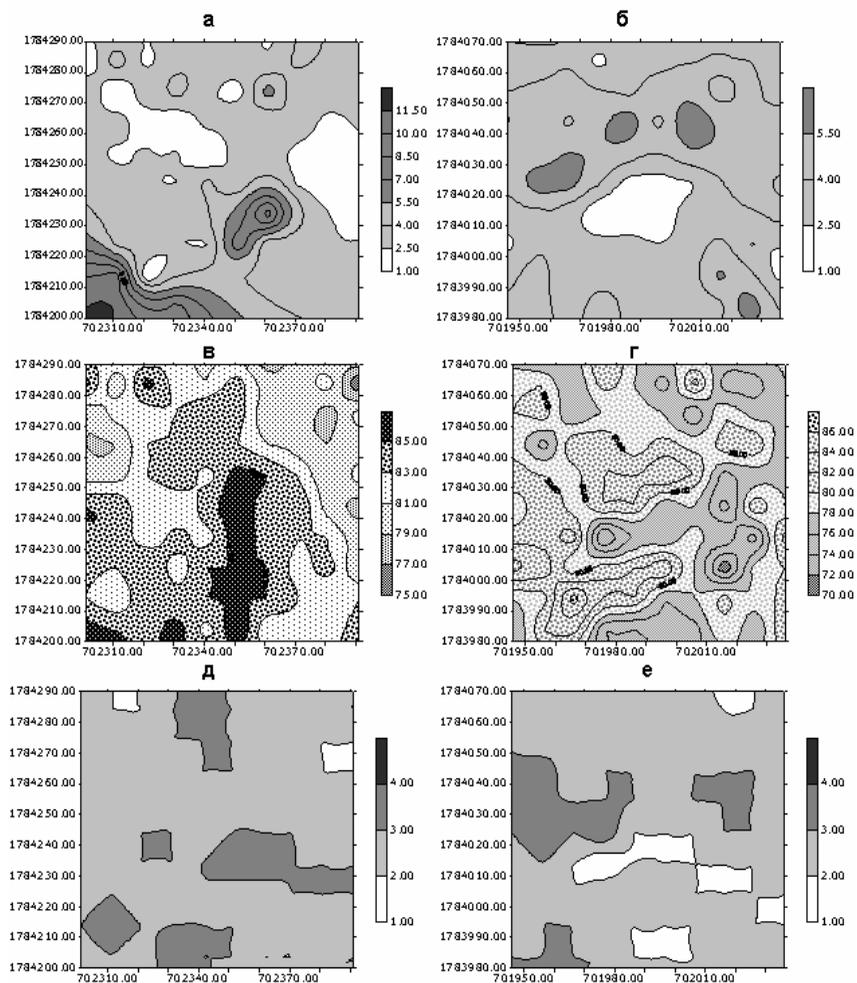


Рис. 2. Пространственное распределение содержания органического углерода (а – квадрат 1, б – квадрат 2), содержания песчаной фракции (в – квадрат 1, г – квадрат 2) и стабильности агрегатов (д – квадрат 1, е – квадрат 2) в поверхностном горизонте почвы

Линейная регрессия показала положительную связь стабильности агрегатов с содержанием органического С и песчаной фракции в почве (Рис. 3). Не обсуждая результаты в подробностях

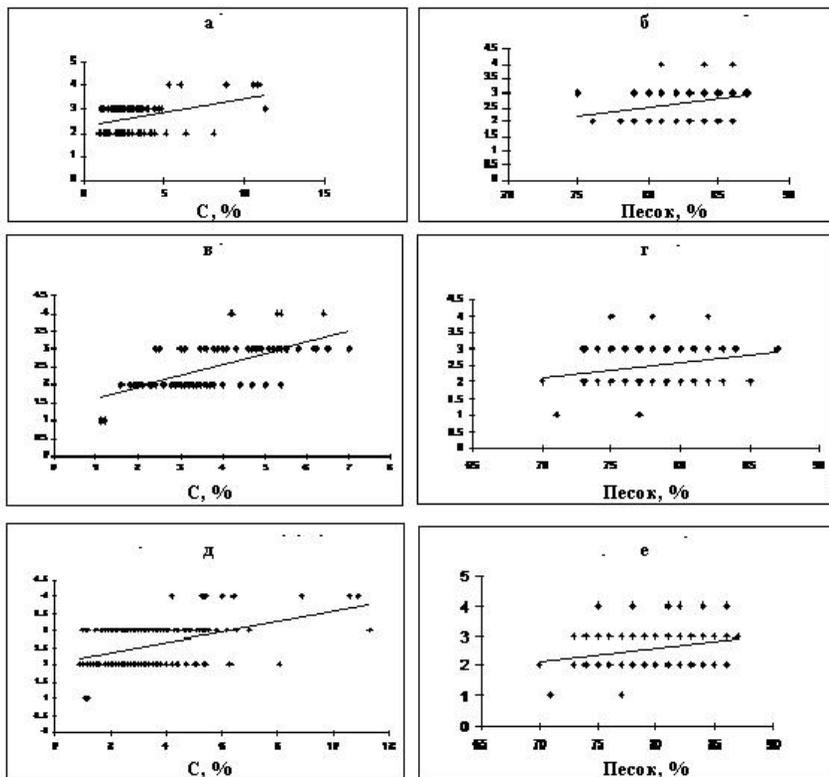


Рис. 3. Линейные регрессионные зависимости стабильности агрегатов от содержания органического углерода (а – квадрат 1, в – квадрат 2, д– для двух квадратов вместе) и содержания песчаной фракции (б – квадрат 1, г – квадрат 2, е– для двух квадратов вместе)

(см. предыдущую публикацию авторов, García Calderón et al., 2004), отметим, что степень достоверности регрессионных зависимостей была довольно низка, что объяснялось дискретным характером оценки стабильности агрегатов. Тем не менее, закономерность была получена на двух квадратах на достаточном количестве образцов, и не может считаться случайной. Положительная зависимость стабильности агрегатов от содержания органического вещества в почве отмечалась многими авторами (van der Watt and Valentin, 1992; Gavande, 1992; Warrick, 2002). Однако возрастание стабильности аг-

регатив с увеличением содержания песка противоречит как общим выкладкам (Gavande, 1992), так и конкретным результатам, полученным другими исследователями (Akaigbo et al., 1999; Veihe, 2002). Была выдвинута гипотеза, что гранулометрический состав связан с минералогией илистой фракции почв, которая и влияет в большей степени на стабильность агрегатов. Гипотеза базировалась на полученных ранее данных, показывающий существенное различие в минералогии почв разного гранулометрического состава на территории как всего региона Сьерра Сюр де Оахака (García Calderón et al., 2000; Krasilnikov et al., 2005), так и конкретно фермы Эль Синаи (García Calderón et al., 2005). Поэтому нами дополнительно в 6 точках, где ранее были заложены разрезы, были проведены анализы минералогического состава илистой фракции. Результаты представлены в Табл. 1; в таблице точки приводятся по возрастанию содержания песчаной фракции в составе почвенных образцов. Из таблицы видно, что в почвах с меньшим содержанием песка в составе ила абсолютно преобладает каолинит и гиббсит. В почвах с высоким содержанием песка в составе ила, наряду с каолинитом, присутствует существенное количество минералов структуры 2:1.

Таблица 1. Полуколичественное определение минералогического состава глин и процентного содержания песчаной фракции в поверхностных горизонтах почв кофейной плантации «Эль Синаи»

Участок	Содержание песка, %	Минералогический состав илистой фракции			
		Слюда	Слюда-вермикулит	Каолинит	Гиббсит
Лос Санхонес	54.0			XX*	
Ла Преса	68.0		X	XX	XX
Ла Примавера	68.8		X	XX	X
Эль Мирадор	64.0		XX	XX	X
Эль Портийо	74.8	X	X	XX	X
Эль Эспинасо	77.6	X	X	XX	

*XX – минерал доминирует; X – минерал присутствует

Пространственное распределение изученных свойств было обработано геостатистическими методами. Вариограммы, полученные при обработке данных по содержанию органического С и песчаной фракции и стабильности агрегатов, приведены на Рис. 4.

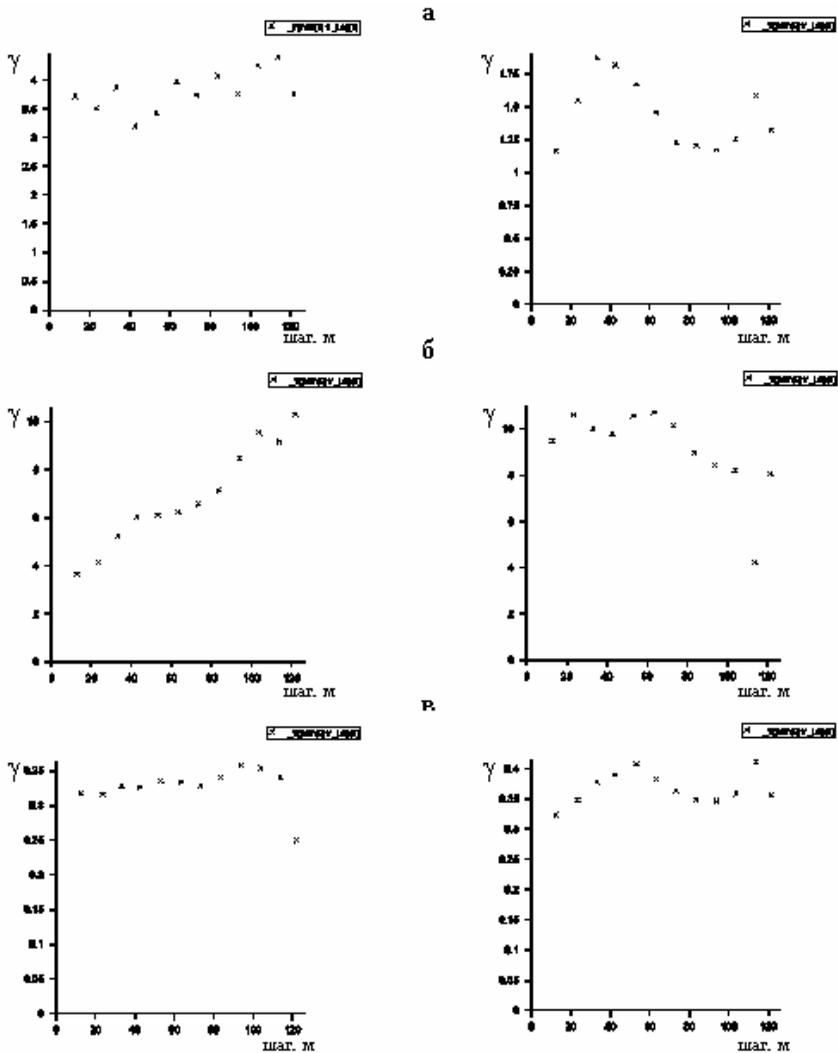


Рис. 4. Экспериментальные вариограммы распределения органического углерода (а), содержания песчаной фракции (б) и стабильности агрегатов (в) в поверхностных горизонтах малых квадратов; левая колонка – данные для квадрата 1, правая – квадрата 2

Экспериментальные вариограммы показали необычное распределение. Вопреки ожиданиям, не обнаружилось общих закономерностей пространственного распределения ни между показателями внутри квадратов, ни между двумя исследованными квадратами. В первом квадрате распределение органического С близко к чистому наггету. Распределение содержания песка имеет линейный характер, что указывает на наличие тренда. Распределение стабильности агрегатов имеет тенденцию к псевдопериодичности. Во втором квадрате распределение всех параметров имеет характер, близкий к нечёткому периодическому. Распределение органического С имеет максимумы полудисперсии на шагах около 40 и 120 м, песчаной фракции – около 20 и 60 м, а стабильности агрегатов – около 60 и 120 м. Только для второго квадрата отчасти можно говорить о некотором соответствии пространственного распределения содержания органического С и стабильность агрегатов.

Для всей территории фермы также были проанализированы данные распределения содержания органического углерода и стабильности агрегатов с учётом данных, полученных для двух малых квадратов. Вариограммы для обоих параметров имеют отчётливо периодический характер (Рис. 5). Подбор соответствующих стандартных модельных вариограмм возможен, однако очевидно, что ни экспоненциальная (для распределения органического С), ни Гауссова (для стабильности агрегатов) модели не описывают экспериментальные данные должным образом. Применение периодических моделей также затруднительно, поскольку максимумы полудисперсии носят нецелочисленный характер. Распределение органического углерода имеет максимумы на шагах около 120, 250, 350, 600, 850 и 1300 м, причём величина максимумов сильно варьирует. Обращает на себя внимание выброс в районе шага 1300 м. Обычно подобные выбросы связывают с недостаточной выборкой или с погрешностями анализов, однако в нашем случае (выборка более 400 точек) подобное объяснение трудно принять. Кроме того, этот же максимум, и также с очень высокой полудисперсией, наблюдается для стабильности агрегатов. Последняя показывает также максимумы на шагах около 250 и 750 м. В целом можно отметить, что часть максимумов периодической экспериментальной вариограммы совпадает для содержания органического С и ста-

бильности агрегатов, что указывает на частичную общность их пространственного распределения.

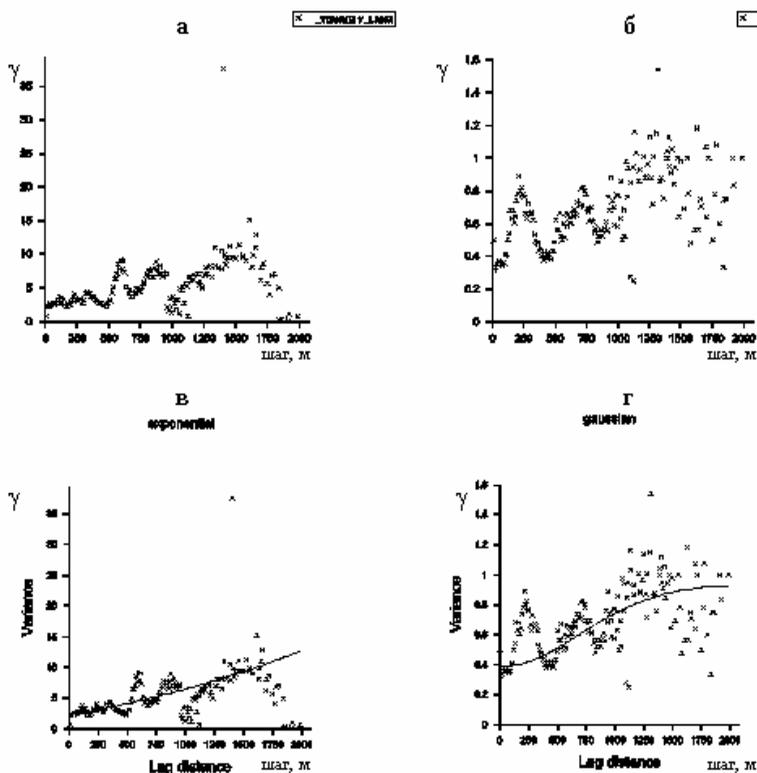


Рис. 5. Экспериментальные вариограммы (а, б) и их стандартные модели (в, г) для распределения содержания органического углерода (а, в) и стабильности агрегатов (г, д) на всей территории кофейной фермы Эль Синаï; для распределения органического С подобрана экспоненциальная модель, для стабильности агрегатов – Гауссова

Обсуждение

Пространственное распределение стабильности агрегатов в исследованной зоне имеет закономерный характер, что позволяет прогнозировать эрозионную устойчивость почв. Для изученного района установлено закономерное возрастание стабильности агре-

готов с возрастанием содержания органического углерода в почвах, что согласуется с литературными данными. Также была установлена положительная зависимость стабильности агрегатов от содержания песчаной фракции в почвах, хотя формирование более стабильных агрегатов в почвах лёгкого гранулометрического состава противоречит данным, приводимым в литературе. Нами предложена гипотеза, объясняющая подобную необычную зависимость. Почвы, имеющие высокое содержание глины, имеют довольно большой возраст и содержат в илистой фракции преимущественно каолинит, который не образует комплексов с органическим веществом почв. Почвы несколько более лёгкого гранулометрического состава содержат, наряду с каолинитом, минералы структуры 2:1, которые образуют комплексы с гумусовыми веществами через «мостики» двухвалентных оснований (Nayan et al., 2002). Наличие комплексов, во-первых, стабилизирует гумусовые вещества, и почвы с большим содержанием песчаной фракции содержат больше органического углерода. Во-вторых, как известно, органо-глинистые комплексы стабилизируют почвенную структуру более эффективно, чем свободное органическое вещество почвы. Таким образом, наиболее стабильные агрегаты наблюдаются в почвах относительно лёгкого гранулометрического состава, содержащих существенное количество органического углерода.

Ранее нами (García Calderón et al., 2005) для изученной территории была предложена схема формирования почвенного покрова территории. Согласно этой схеме, 0-моментом развития почв является экспозиция поверхности в результате склоновых процессов. На этом этапе наблюдаются слаборазвитые почвы (Регосоли) лёгкого гранулометрического состава, с малым содержанием гумуса, насыщенные основаниями. Далее происходит развитие почв, что связано с накоплением органического вещества, выщелачиванием оснований, а впоследствии накоплением глины и иллювиированием последней. На последнем этапе почвы разрушаются в результате оползней по водонасыщенному глинистому горизонту (Dykes, 2002). Собственно, территорию данного горного региона можно представить как мозаику разновозрастных поверхностей, экспонированных склоновыми процессами, занятыми почвами разных этапов развития. Данная работа позволяет объяснить дополнительный

механизм формирования разновременной почвенной мозаики. Поверхность, экспонированная склоновыми процессами, на начальном этапе имеет песчаную малогумусовую почву. Вскоре на поверхности накапливается органическое вещество, которое образует комплексы с имеющимися минералами структуры 2:1 и стабилизирует, таким образом, агрегаты. Однако по прошествии тысячелетий ситуация меняется. Во-первых, выщелачиваются основания, которые служат «мостиками» для глинисто-органических комплексов. Во-вторых, постепенно разрушаются слоистые силикаты структуры 2:1 и остаются инертные каолинит и гиббсит. Несвязанное органическое вещество быстро минерализуется, агрегаты теряют стабильность, и почва эродируется. На экспонированной поверхности начинается новый этап почвообразования.

Поскольку приведённая схема изначально связана со склоновыми процессами, очевидно, что и распределение стабильности агрегатов, равно как и определяющих его свойств, связано с геоморфологической ситуацией. Как оползни, так и эрозионные формы рельефа имеют определённые характерные размеры; например, оползень не может произойти, если масса грунта не имеет определённой критической величины. Поэтому понятно, что структура почвенных свойств реализуется только в определённых масштабах. Как видно из полученных нами результатов, в пределах малых квадратов закономерностей распределения свойств практически не наблюдалось, точнее, они носили локальный характер (зависели от экспозиции, крутизны, формы и расчленённости склона) и не отражали региональной специфики.

Распределение содержания органического углерода и стабильности агрегатов в масштабе всей фермы показало периодическое распределение, что отражает очень ярко выраженную структуру распределения данных. Шаги, отражающиеся в вариограммах и содержания органического C, и стабильности агрегатов (250 и 1300 м), скорее всего, отражают расчленение рельефа разных порядков. Это соответствует полевым наблюдениям: малые овраги разделены дистанциями в 150-300 м, а крупные ущелья – чуть менее 1500 м.

Особое внимание вызывает нецелочисленная последовательность максимумов в периодических вариограммах исследованных свойств. Мы предполагаем, что она отражает наложение несколь-

ких периодических структур. К сожалению, аппарат анализа подобных распределений пока не разработан. Возможно, методы, применяемые для расшифровки смешанослойных неупорядоченных структур кристаллов, могут оказаться полезными. В любом случае, методическая база геостатистических исследований имеет ещё большой потенциал для дальнейшего совершенствования.

Литература

- Akaigbo F.O.R., Igwu C.A.I., Mbagwu J.S.C. Chemical and mineralogical properties of soils in relation to aggregate stability // *Geoderma*, 1999, vol. 92, p. 111-123.
- Denef K., Six J., Merckx R., Paustian K. Short-term effects of biological and physical forces on aggregate formation in soils with different clay mineralogy // *Plant Soil*, 2002, vol. 246(2), p. 185-200.
- Drees L.R., Wilding L.P., Owens P.R., Wu B., Perotto H., Sierra H. Steepland resources: characteristics, stability and micromorphology // *Catena*, 2003, vol. 54, p. 619-636.
- Dykes A.P. Weathering-limited rainfall-triggered shallow mass movements in undisturbed steepland tropical rainforest // *Geomorphology*, 2002, vol. 46, p. 73-93.
- FAO-ISRIC-ISSS. World Reference Base for Soil Resources. Rome, 1998. Soil Resources Report 84.
- Flores A., Manzanero G.I. Tipos de vegetación del estado de Oaxaca. In: *Sociedad y Naturaleza de Oaxaca 3: Vegetación y Flora*. (Ed. M.A. Vasques). Oaxaca, 1999, p. 7-45.
- García E. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. UNAM, México, 1973.
- García Calderón N.E., Alvarez Arteaga G., Ibañez Huerta A., Krasilnikov P., Hernández Jiménez A. Soil diversity and properties in mountainous subtropical areas, in Sierra Sur de Oaxaca, Mexico // *Canad. J. Soil Sci.*, 2006, vol. 86, p. 61-76.
- García Calderón N.E., Ibañez Huerta A., Fuentes Romero E. *et al.* Características de los suelos de un sector de Pluma Hidalgo, Sierra Sur de Oaxaca, México. In: *La edafología y sus perspectivas al Siglo XXI*. (Eds. T. I. R. Quintero et al.). CPCA-UNAM- UACH, México, 2000, p. 61-67.
- García Calderón N.E., Urióstegui Delgado Y., Alvarez Arteaga G., Ibañez Huerta A., Krasilnikov P. Distribución espacial de las propiedades de los suelos en la zona cafetalera de la Sierra Sur de Oaxaca, México // *Memorias del III Seminario Latinoamericano de Geografía Física, Sección Geografía de Suelos*, 2004, CD-ROM, 11 p.

- Gavande S.A. Física de suelos. Principios y Aplicaciones. LIMUSA, Mexico, 1992.
- GenStat Release 6.2. Lawes Agricultural Trust (Rothamsted Experimental Station), 2002.
- Glade T. Landslide occurrence as a response to land use change: a review of evidence from New Zealand // *Catena*, 2003, v. 51, p. 297-314.
- Hernández J.R., Ortiz M.A., Zamorano J.J. Regionalización morfoestructural de la Sierra Madre del Sur, México // *Investigaciones Geográficas*, 1996, vol. 31, p. 45-67.
- Ibañez J.J., De Alba S., Bermudez F.F., García Alvarez A. Pedodiversity: Concepts and measures // *Catena*, 1995, vol. 24, p. 215-232.
- Krasilnikov P.V., García Calderón N.E., Sedov S.N., Vallejo Gómez E., Ramos Bello R. The relationship between pedogenic and geomorphic processes in mountainous tropical forested area in Sierra Madre del Sur, Mexico // *Catena*, 2005, vol. 62(1), p. 14-44.
- Lorence D.H., García A. Oaxaca, Mexico. *In*: Floristic Inventory of Tropical Countries. D.G. Campbell and H.D. Hammond (Eds.). NY Bot. Gard. Publ. Bronx, 1989, p. 253-269.
- Martí C., Abadía D., Buesa M.A. Determinación de la estabilidad de la estructura de suelos de Alto Aragón, por tamizado en húmedo y lluvia simulada // *Edafología*, 2001, vol. 8, p. 21-30.
- Moguel P., Toledo V.M. El café en México, ecología, cultura indígena y sustentabilidad // *Ciencias*, 1996, vol. 43, p. 40-55.
- Morán D.J., Corona P., Tolson G. Uplift and subduction-erosion in southwestern México since Oligocene: pluton barometry constraints // *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, vol. 141, p. 51-65.
- Nayan A., Varadachari Ch., Ghosh K. Soil clay-humus complexes. II Bridging cations and DTA studies // *Austr. J. Soil. Res.*, 2002, vol. 40, p. 691-704.
- Pannatier Y. VARIOWIN: Software for Spatial Data Analysis in 2D. Springer-Verlag, New York, NY, 1996.
- van Reeuwijk L.P. (ed.) Procedures for soil analysis. 6th edition. ISRIC-FAO, 2002. ISRIC Technical Paper No. 9.
- Rojas T.R., Pérez J.M., Acosta G. "Y volvió a temblar". Cronología de los sismos en México" Cuadernos de la Casachata 13J. Centro de Investigación y Estudios Superiores de Antropología Social. México, D. F., 1987.
- Roth C.H. Soil Sealing and Crusting in Tropical South América. *In*: Soil Crusting. Chemical and Physical Processes (Eds. Summer M.E. et al.). Lewis Publishers, USA, 1992.
- Rzedowsky J. Vegetación de México. Limusa, México, D. F., 1978.
- Staver C. Managing ground cover heterogeneity in coffee (*Coffea arabica* L.) under managed tree shade: from replicated plots to farmer practice

- // Agroforestry in Sustainable Agricultural Systems (Eds. E. L. Buck et al.).
CRC Press, Lewis Publ. Boca Raton, FL, 1998, p. 67-96.
- Veihe A. The spatial variability of erodability and its relation to soil types: a study from northern Ghana // *Geoderma*, 2002, vol. 106, p. 101-120.
- Warrick A.W. *Soils Physics Companion*. CRC Press, London, 2002
- van der Watt H.H., Valentin C. Soil Crusting: The African View. *In: Soil Crusting. Chemical and Physical Processes* (Eds. Summer M.E. et al.). Lewis Publishers, USA, 1992.