

УДК 631.4

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ФРАКЦИЙ КРУПНОЗЕМА ИЗ ПОЧВЕННЫХ ОБРАЗЦОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ ФОТОСНИМКОВ

© 2019 г. Я. Чжуан¹, А. Е. Хартеминк¹, *, Ц. Хуан¹¹Висконсинский университет в Мадисоне, факультет почвоведения,
Обсерватория Драйв, 1525, Мадисон, WI 53706 США

*e-mail: hartemink@wisc.edu

Поступила в редакцию 05.12.2018 г.

После доработки 13.12.2018 г.

Принята к публикации 25.12.2018 г.

Разработан метод количественного анализа почвенного крупнозема с использованием цифровых фотоснимков. Охарактеризовано содержание и формы грубых обломков в профиле альфисоли, сформированной на лёссах, подстилаемых ледниковыми наносами. Проанализировано 45 образцов (600–1000 г почвы), отобранных с интервалом 10 см из толщи 0–150 см по трем колонкам в стенке изученного разреза. Цифровые фотографии грубых обломков обработаны в программе “ImageJ”. Определены общее число, общая площадь и средняя округлость щебней в каждом образце. Для каждого щебня определены параметры формы (округлость, лещадность, окатанность и непрямолинейность). Количественные показатели (отношения общего числа от массы и общей площади от массы щебней) неравномерно распределены по профилю, с повышенными значениями в горизонтах щебнистой морены (2C1) и смешанного моренно-лёссового материала (BC) и пониженными значениями в слоях лёсса и суглинистой морены. Около 9.6% общей массы и 14.5% общего количества щебня перемещено в результате вымораживания крупнозема из морены в вышележащую лёссовую толщу (горизонты Bt и Ap). В моренном материале (на глубине 50–110 см) разнообразие форм щебней больше, а средние величины их округлости, окатанности и непрямолинейности меньше, чем у щебней из вышележащих лёссовых горизонтов, что указывает на более быстрое вымораживание более гладких и округлых щебней. Предложенный метод обеспечивает быструю и надежную количественную характеристику почвенного крупнозема и может найти применение для интерпретации почвообразовательных процессов.

Ключевые слова: ледниковые наносы, лёссы, округлость, окатанность, морозное пучение, вымораживание крупнозема

DOI: 10.1134/S0032180X19080173

ВВЕДЕНИЕ

Согласно классификации США, дресва и щебень в почвах определяются как совокупность частиц размером от 2 мм до 25 см под общим названием “грубые обломки” – “coarse fragments” [27]. Другими фракциями почвенного крупнозема являются камни/булыжники (25–60 см) и глыбы/валуны (>60 см в диаметре) [24]. Содержание грубых обломков в почве может выражаться тремя способами: в процентах массы (R_m), процентах объема (R_v) и в процентах площади поверхности почвы (R_s) [19]. Основными характеристиками обломков являются размер и форма (окатанность). Различают шесть категорий окатанности грубых обломков: очень угловатые, угловатые, слабоугловатые, слабоокатанные, окатанные и хорошо окатанные [19]. Грубые обломки могут

быть представлены магматическими, осадочным или метаморфическими горными породами [15].

Каменистые почвы широко распространены и встречаются, как правило, в эрозионных и аккумулятивных позициях или на моренных отложениях [15, 19]. Количественное описание фракций крупнозема в почвах имеет большое значение при планировании землепользования [12]. Физические свойства почв меняются в зависимости от степени каменистости, а также формы, характера распределения и ориентации грубых обломков [10]. Объемная плотность почвенного мелкозема снижается с возрастанием содержания крупнозема [29]. В каменистых почвах также увеличена насыщенная гидравлическая проводимость на фоне повышенного количества макропор и пониженных значений общей пористости, водоудерживающей способности и влагосодержания [4, 12]. На-

личие грубых обломков на поверхности почв и в общей массе горизонтов влияет на впитывание влаги атмосферных осадков, то есть инфильтрацию и поверхностный сток, а также испарение и капиллярное поднятие воды [19]. В почвах с оптимальным содержанием крупнозема понижается поверхностный сток атмосферной влаги и усиливается секвестрация углерода [32, 33]. Присутствие грубых обломков влияет на запасы углерода и азота в почвах [23]. В то же время наличие камней в почве подразумевает сокращение объема корнеобитаемой зоны и количества мелкозема, способного к накоплению влаги и питательных веществ.

Влияние каменистости на рост и развитие растений по-разному проявляется в зависимости от типов почв и растительности, а также климатических условий [19]. Известно, что урожайность сельскохозяйственных культур снижается при высокой степени каменистости почв [4, 8], а при умеренном содержании грубых обломков урожайность возрастает, особенно в случае глинистых почв [14]. В умеренных широтах каменистые почвы характеризуются лучшей прогреваемостью в весенний период, что благоприятно для прорастания семян [3].

Процессы вертикального и латерального перераспределения почвенного крупнозема связаны с педотурбациями и хозяйственной деятельностью человека [11], а также с вымораживанием грубых обломков к поверхности в результате промерзания–оттаивания почв [5, 25]. Для количественной оценки латерального распределения почвенного крупнозема в полевых условиях используют семивариограммы [35].

Для описания формы грубых обломков обычно оценивают их окатанность и округлость [20, 24]. Эти параметры отражают генезис крупнозема и палеоэкологические условия [13, 18]. Количественное содержание крупнозема в почве традиционно определяют в процентах массы или объема. Описание формы каждого грубого обломка из почвенного образца занимает много времени и в итоге дает лишь субъективную оценку. Компьютерный анализ цифровых фотоснимков дает возможность получать объективную количественную характеристику морфологических элементов почвы [9]. Например, проведение количественных оценок распределения почвенных кротовин [31] и признаков оглеения в почвенных профилях [16].

Возможности количественного описания содержания и формы грубых обломков в почвах недостаточно освещены в литературе.

Цель работы — разработка инновационного метода количественной оценки содержания и формы грубых обломков и анализ их распределения в почвенном профиле на основе использования цифровых фотоснимков.



Рис. 1. Профиль альфисоли тяжелосуглинистой (полное определение почвы по американской классификации: Alfisol, fine-loamy, mixed, superactive, mesic Typic Hapludalfs, Pecatonica series), ферма О'Брайена, Висконсин, США.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Описание почвенного профиля. Почвенный профиль был заложен на юге центральной части штата Висконсин (42.88° N, 89.40° E) на ферме О'Брайен (рис. 1). За период 1981–2010 гг. минимальная и максимальная температура здесь составляла 2.7 и 13.3°C соответственно, и среднегодовое количество осадков — около 876 мм. Среднегодовое испарение равнялось 902 мм за период 1971–2000 гг.

Почва сформирована на лёссовых отложениях, подстилаемых ледниковыми наносами. Глубина заложения разреза составляла 1.5 м, при ширине передней стенки 2 м. В левой, средней и правой частях передней стенки описаны три колонки почвенного профиля.

Левая колонка: Ap (0–10 см), Bt1 (10–33 см), Bt2 (33–49 см), BC (49–72 см), 2C1 (72–85 см), 2C2 (85–100 см), 2C3 (100–120 см), 2C4 (120–150 см).

Средняя колонка: Ap (0–14 см), Bt1 (14–30 см), Bt2 (30–38 см), BC (38–59 см), 2C1 (59–83 см), 2C2 (83–97 см), 2C3 (97–102 см), 2C4 (102–130 см), 2C5 (130–150 см).

Правая колонка: Ap (0–12 см), Bt1 (12–30 см), Bt2 (30–47 см), BC (47–68 см), 2C1 (68–80 см), 2C2 (80–95 см), 2C3 (95–128 см), 2C4 (128–150 см).

В целом, в пределах передней стенки разреза мощность гор. Ap варьировала от 10 до 20 см.

В соответствии с американской классификацией, исследованная почва была определена как альфисоль тяжелосуглинистая — Alfisol, fine-



Рис. 2. Цифровая фотосъемка грубых обломков, извлеченных из почвенного образца.

loamy, mixed, superactive, mesic Typic Hapludalf, Pecosonca series.

Отбор и анализ почвенных образцов. Из левой, средней и правой колонок почвенного профиля отобрано в общей сложности 45 образцов (массой 0,6–1 кг) от дневной поверхности до глубины 150 см, с интервалом 10 см. Образцы высушивали на воздухе, растирали и пропускали через сито с отверстиями 2 мм. Гранулометрический состав мелкозема определяли с помощью гидрометра. Крупнозем (грубые обломки размером 2 мм–25 см) отобрали и взвешивали отдельно от мелкозема для расчета его массовой доли в почве по формуле:

$$R_m = \frac{\text{Масса грубых обломков}}{\text{Общая масса почвы}}. \quad (1)$$

Анализ цифровых фотоснимков. Все грубые обломки, извлеченные из каждого почвенного образца, распределяли по прозрачному столику и фотографировали в камеральных условиях (рис. 2). Использовали цифровой фотоаппарат Nikon v1 (корпорация Nikon, Токио, Япония) в режиме ручной настройки выдержки и экспозиции. Полученные изображения (в формате JPEG) обрабатывали в программе “ImageJ” [22] в следующем порядке:

- установка масштаба фотоснимка (функция Set scale);
- обрезание фотоснимка с сохранением изображения грубых обломков (Crop);
- конвертирование цветного фотоснимка в бинарное изображение (Make binary); если окраска некоторых обломков была слишком светлая, то сначала проводили конвертирование цветного фотоснимка в 8-битное изображение с настройкой пороговых величин с тем, чтобы все обломки были видны, и потом – конвертирование в бинарное изображение;
- анализ форм отдельных обломков и суммы всех обломков (Analyze particles). Нижний порог анализируемого размера обломка устанавливали

на 0,04 см², чтобы исключить из анализа более мелкие частицы (<0,2 см в поперечнике).

На основании полученных данных составили две таблицы (рис. 3): таблицу результатов подсчета общего числа, общей площади и средних значений округлости грубых обломков в каждом образце и итоговую таблицу результатов анализа формы каждого обломка в образце: округлости, лещадности, окатанности и непрямолинейности (см. ниже). Также рассчитывали отношение общего числа и общей площади обломков к общей массе почвенного образца.

Характеристика формы грубых обломков. Каждый обломок характеризовали по стандартным шкалам окатанности [20] и округлости [24], которые включают шесть категорий окатанности (гладкости граней) и пять категорий округлости обломков (близости формы контура к окружности) (рис. 4). Параметры каждого обломка (округлость, лещадность, окатанность и непрямолинейность) в каждом образце определяли путем обработки цифровых фотоснимков в программе “ImageJ” [37]. Округлость (уравнение (2)) указывает на степень близости формы контура щебня к окружности и измеряется значениями от 0 (бесконечно длинный многоугольник) до 1 (идеальный круг), которые рассчитывают по соотношению площади к квадрату периметра обломка. Лещадность щебня, то есть соотношение его длины и толщины (уравнение (3)), – это соотношение длинной и короткой осей эллипса, наиболее соответствующего форме обломка. Окатанность щебня (уравнение (4)) также указывает на степень округлости обломка и измеряется значениями от 0 до 1, рассчитанными как отношение площади к длинной оси эллипса. Окатанность отличается от округлости тем, что исключает из рассмотрения неровности естественных граней щебня. Непрямолинейность (уравнение (5)) описывает степень выгнутости или вогнутости поверхности щебня, которая рассчитывается как отношение его общей площади к площади его выгнутой части и измеряется значениями от 1 до

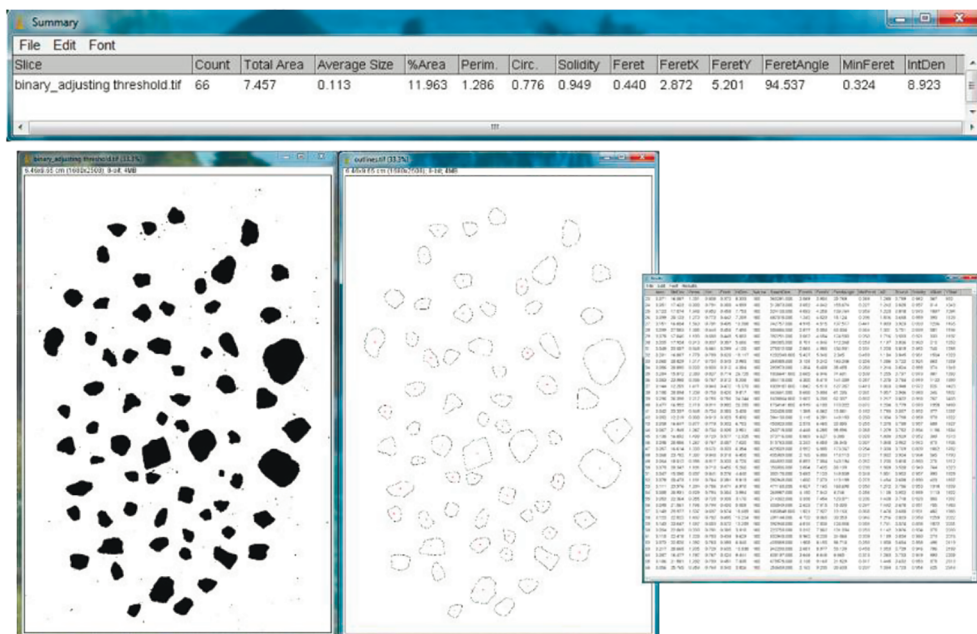


Рис. 3. Контуры грубых обломков и результаты обработки изображений в программе “Image J” (по [22]): окна итоговой таблицы с параметрами каждого щебня.

0 (абсолютно выгнутый и вогнутый соответственно).

$$\text{Округлость} = 4\pi \frac{\text{Площадь}}{(\text{Периметр})^2}, \quad (2)$$

$$\text{Лещадность} = \frac{\text{Длинная ось}}{\text{Короткая ось}}, \quad (3)$$

$$\text{Окатанность} = 4 \times \frac{\text{Площадь}}{\pi(\text{Длинная ось})^2}, \quad (4)$$

$$\text{Непрямолинейность} = \frac{\text{Общая площадь}}{\text{Площадь выгнутой части}}. \quad (5)$$

Обработка данных. Для указанных параметров каждого щебня рассчитывали среднее и стандартное отклонение. Для оценки взаимосвязей параметров формы анализируемого крупнозема и гранулометрического состава мелкозема были построены точечные диаграммы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Распределение грубых обломков в почвенном профиле. Выявлены сходные тренды распределения значений отношений общего числа от массы и общей площади от массы грубых обломков по профилю почвы, с максимумами на глубинах 80 и 110 см и минимумами на глубинах 0, 90 и 150 см (рис. 5). Наблюдалось сильное варьирование абсолютных значений указанных соотношений на глубине 80 см, соответствующей контакту лёссов с подстилающими ледниковыми наносами.

Усредненные значения округлости щебня сильно варьировали в пределах верхнего горизонта (0–30 см) и мало изменялись вниз по профилю.

Доля песка в мелкоземе возрастала от 30 до 90% вниз по профилю, при этом доля пыли уменьшалась в толще лёсса до 50%, а в ледниковых наносах пыль полностью отсутствовала (рис. 6). Доля ила возрастала до 30% в пределах верхнего горизонта (0–30 см) затем снижалась до менее 5% на дне профиля (150 см). Содержание крупнозема в целом увеличивалось вниз по профилю — от дневной поверхности до глубины 100 см, с сильным варьированием в слое 50–100 см. Между содержанием крупнозема и гранулометрических фракций отсутствовала значимая корреляция, однако местами наблюдались совпадения локальных максимумов содержания крупнозема и песка.

Характеристика формы грубых обломков. Из 45 почвенных образцов было выделено в общей сложности 14573 грубых обломков с различными степенями округлости и окатанности. Корреляция между окатанностью и округлостью щебня была положительной (рис. 7). При значениях окатанности и округлости, близких к 1, форма щебня приближается к идеально круглой. Сни-

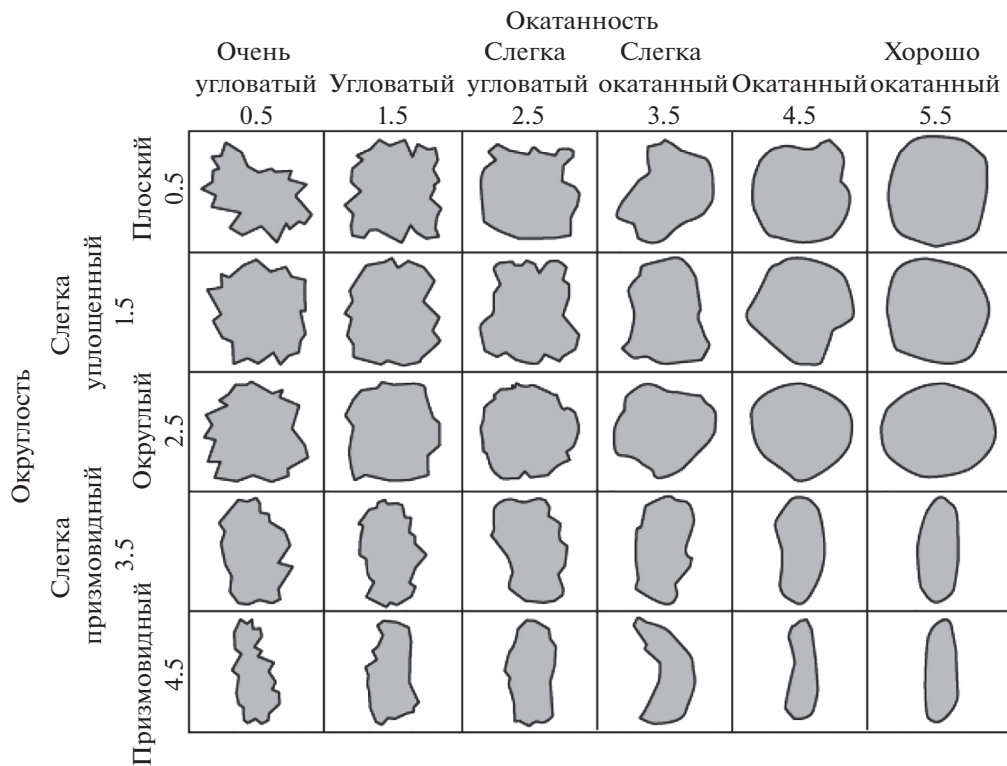


Рис. 4. Окатанность и округлость грубых обломков в почвах (по [24]).

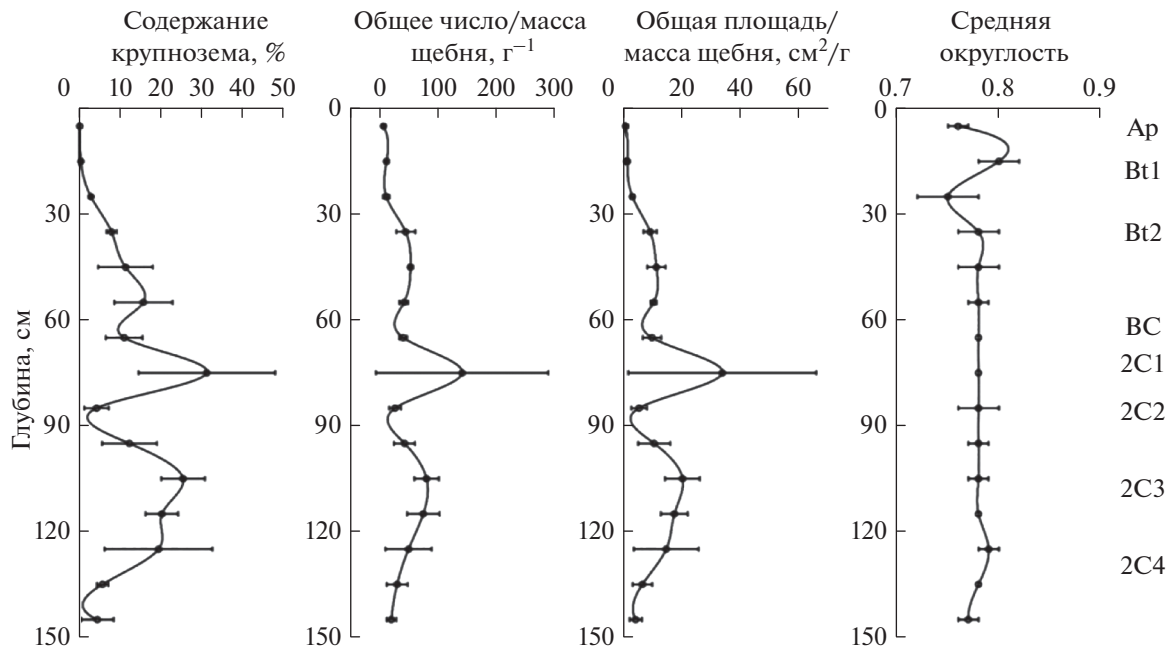


Рис. 5. Распределение грубых обломков и их параметров в профиле альфисоли до глубины 150 см. Отрезками отмечены стандартные отклонения от средних значений (по трем колонкам почвенного профиля). Кривые начерчены с использованием сплайн-функции. Индексы почвенных горизонтов даны справа от графиков.

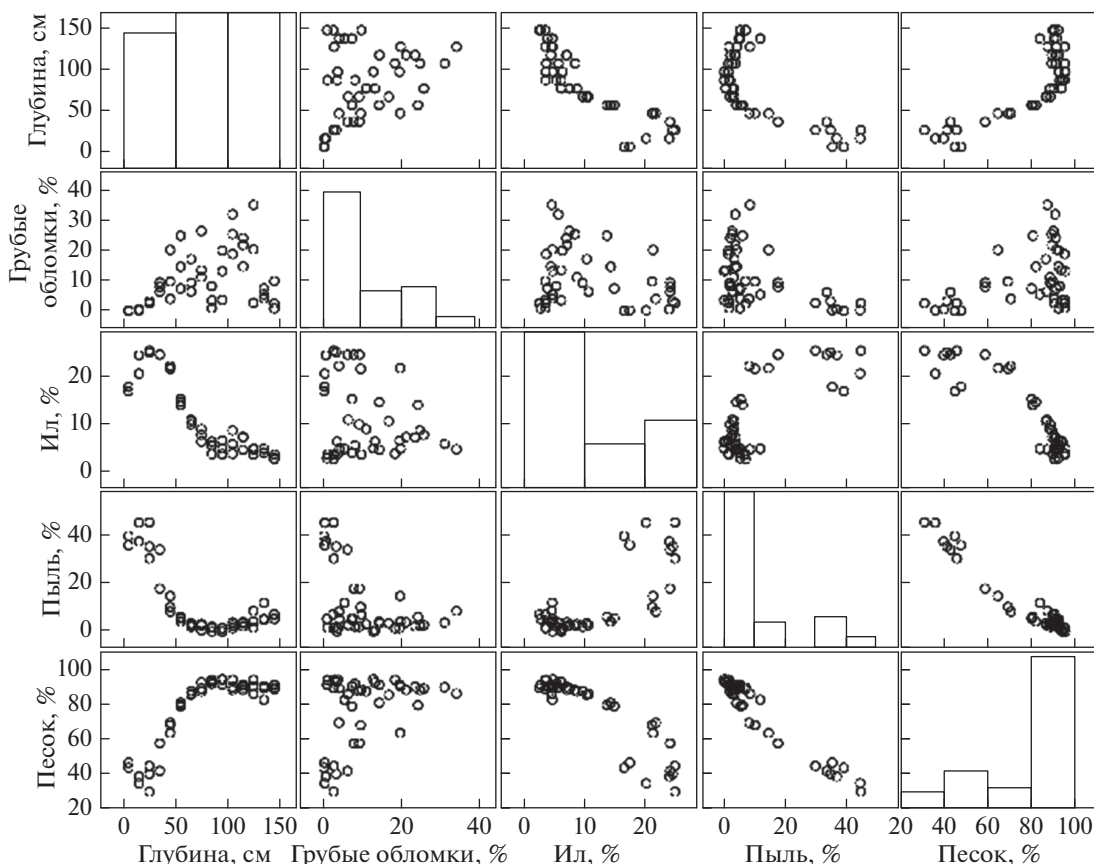


Рис. 6. Точечные диаграммы содержания крупнозема (грубых обломков) и гранулометрических фракций мелкозема в 45 почвенных образцах.

жение значений данных параметров соответствует более вытянутой форме и более неровной поверхности щебня.

Точечная диаграмма значений параметров формы всех 14573 щебней представлена на рис. 8. Эти значения характеризовались нормальным распределением и широким варьированием на глубинах около 50 и 110 см. Округлость щебня отрицательно коррелировала с лещадностью и положительно – с окатанностью и непрямолинейностью. Лещадность отрицательно нелинейно коррелировала с окатанностью.

ОБСУЖДЕНИЕ

Преимущества и ограничения метода. Предложенный новый метод анализа числа и форм грубых обломков в почве более экономичен по времени и более точен, чем традиционные методы с использованием шкал для визуальной оценки содержания и формы щебня. Данный метод является надежной основой для оценки содержания грубых обломков различной формы в почвенном образце.

Однако новый метод анализа имеет и некоторые ограничения. Во-первых, подготовка образца

требует времени на распределение грубых обломков по прозрачному столику. В будущем можно модифицировать данный метод для других вари-

Округлость	Окатанность							
	0.2–0.3	0.3–0.4	0.4–0.5	0.5–0.6	0.6–0.7	0.7–0.8	0.8–0.9	0.9–1.0
0.3–0.4								
0.4–0.5								
0.5–0.6								
0.6–0.7								
0.7–0.8								
0.8–0.9								
0.9–1.0								

Рис. 7. Взаимосвязь окатанности и округлости грубых обломков, отобранных из 45 почвенных образцов. Пустые ячейки означают отсутствие обломков с соответствующими характеристиками.

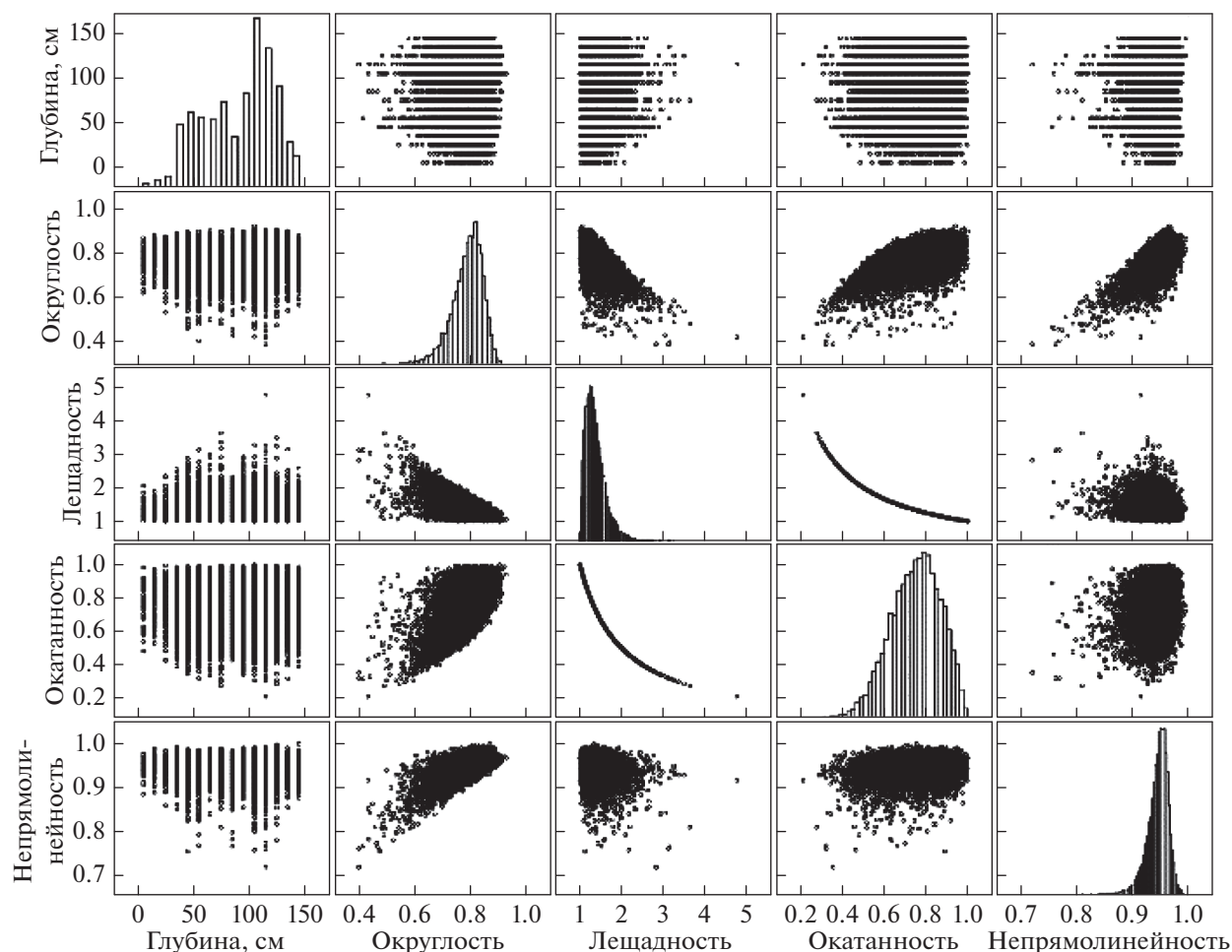


Рис. 8. Точечные диаграммы параметров формы 14573 щебней из 45 почвенных образцов.

антов фона, например, для фотографий включений крупнозема в естественной стенке почвенного разреза [6]. Во-вторых, прозрачный фон обусловил искажение цветопередачи, из-за этого грубые фрагменты на фотографиях кажутся более темными, чем в реальности, что исключает возможность оценки геологического происхождения анализируемых обломков. В-третьих, плоские щебни всегда ложатся широкой гранью на фотографируемый столик, что приводит к завышенной оценке общей площади фрагментов крупнозема в почвенном образце и искаженной характеристике форм щебня.

Распределение грубых обломков в почвенном профиле. В изученном профиле альфисоли наибольшее содержание крупнозема было выявлено в гор. 2С1 (щебнистая морена) и ВС (перемешанный моренный и лёссовый материал). Горизонты ледниковых наносов 2С2 и 2С3 также характеризовались высоким содержанием щебня. Низкое содержание крупнозема было отмечено в гор. Ар (пахотный), Вt1 и Вt2 (лёсс и суглинистый ледниковый нанос соответственно).

Моренные отложения образовались во время таяния ледника, содержащего песчаный и щебнистый материал, который подвергался сортировке в потоках талых вод. Лёссы образовались путем ветрового переноса и отложения более мелких частиц — преимущественно пыли, а также тонкого песка и ила [21]. В районе исследований лёссы сложены в основном переотложенной пылью, принесенной ветром из речных долин Миссури и Миссисипи, где были сосредоточены процессы ледниковой седиментации в конце последней ледниковой эпохи [36]. Поскольку в лёссах практически не содержится крупнозема из-за ветрового генезиса данных пород, присутствие щебня в верхнем и средних горизонтах изученной альфисоли связано, в основном, с вымораживанием крупнозема из нижележащей морены и перемешиванием лёссового и моренного материалов за счет педотурбаций.

Вымораживание крупнозема — процесс поднятия грубых обломков из нижних горизонтов в верхние в ходе промерзания почвы [17]. Почва промерзает сверху вниз, при этом под щебнями

лед образуется быстрее, чем в окружающем мелкоземом, за счет более высокой теплопроводности/холодопроводности щебня по сравнению с окружающим мелкоземом. Когда под грубым обломком образуется линза льда (фронт промерзания), происходит увеличение объема замерзающей влаги и щебень выталкивается вверх относительно вмещающей мелкоземистой породы [30]. Когда происходит оттаивание почвы в весенний период, лед под щебнями вытает быстрее, а освободившееся пространство быстро заполняется частицами мелкозема и щебень сохраняет свое положение. Во время последующего зимнего сезона щебень поднимается еще выше по профилю и так, в ходе последовательных циклов промерзания—оттаивания почвы, постепенно выталкивается к поверхности.

Скорость вымораживания крупнозема зависит от минерального состава почвы, гранулометрического состава мелкозема, формы и размера щебней. В частности, в почвах, сформированных на монтмориллонитах, данный процесс развивается медленнее, чем в почвах на каолинитах [26]. Известна регрессионная зависимость между относительной скоростью вымораживания и удельной поверхностью материала в разных типах почв [26]. Показано, что вымораживание крупнозема происходит быстрее в суглинистых и супесчаных гор. В, чем в песчаных гор. В и Ae [2].

В профиле изученной альфисоли 9.6% общей массы и 14.5% общего количества щебня было перемещено из нижележащей морены (гор. С) в вышележащую толщу лёсса (гор. Вt и Ap) в результате вымораживания крупнозема. Этот физический процесс водного и энергетического обмена и транслокации твердых частиц отличается от криотурбации в почвах, сформированных на многолетней мерзлоте (гелисолях), и приводит к перемешиванию материалов разных горизонтов [1].

Характеристика форм грубых обломков. В некоторых предыдущих работах была исследована взаимосвязь форм грубых обломков с факторами окружающей среды. Установлено, что средний размер грубых обломков может служить индикатором разных седиментационных процессов, формирующих речные дельты, озы, морены и другие элементы пост-ледниковых тундровых ландшафтов [13]. Разработаны аналитические методы оценки расстояния, на которое были перемещены грубые обломки, в частности, по степени их окатанности [13]. Выявлено, что взаимосвязь окатанности и округлости грубых обломков является результатом ледниковой абразии и последовательных циклов седиментации, сопровождающихся водной сортировкой мелкозема с осаждением менее округлых частиц на более ранних стадиях по сравнению с более округлыми частицами [18].

В исследованной почве наибольшее разнообразие форм щебня приурочено к интервалу глубин 50–110 см, включавшему верхний слой щебнистой морены и перемешанный материал морены и лёсса. Меньшее разнообразие форм щебня наблюдалось в нижних слоях морены, а также в лёссовой толще. Средние значения параметров формы грубых обломков в слое 0–50 см отличались от значений аналогичных параметров на глубине 50–110 см. В верхнем слое зафиксированы в среднем более высокие значения округлости, окатанности и непрямолинейности, но более низкие значения лещадности щебня. Следовательно, в процессе вымораживания крупнозема более округлые обломки продвигаются вверх по профилю быстрее, чем более угловатые.

Возможности применения метода в почвоведении и земледелии. Предложенный метод количественной характеристики крупнозема в почвенном профиле может быть полезен для интерпретации процессов почвообразования и усовершенствования классификации почв путем введения новых диагностических критериев (например, параметров формы грубых обломков) [28]. Анализ цифровых фотоснимков позволяет составлять диаграммы вертикального и латерального распределения грубых фрагментов в почвенном профиле, что может послужить основой для количественной характеристики проницаемости почв для корней растений [27], а также для понимания гидрологических и других физических процессов, контролируемых уровнями увлажненности и содержания питательных элементов в почвах [7, 34].

Информация о содержании и форме грубых обломков в различных горизонтах почвы также важна для рационального планирования земледелия. В частности, содержание грубых обломков возрастает с вниз по профилю изученной почвы, достигая максимума на глубине 80 см и формируя непроницаемый для корней слой, при этом у большинства выращиваемых в данной местности культур (кукурузы и сои) глубина корнеобитаемого слоя составляет 60 см. Количественная характеристика почвенного крупнозема также важна для правильного выбора норм орошения сельскохозяйственных полей [12]. С одной стороны, в сильнокаменистых горизонтах возрастает насыщенная гидравлическая проводимость и количество макропор, при снижении общей пористости, вододерживающей способности почв и количества влаги, доступной для растений [4, 12]. С другой стороны, наличие крупнозема в почве необходимо для хорошей водопроницаемости, аэрации и обеспечения биоразнообразия микроорганизмов в корнеобитаемой зоне. Данные о содержании крупнозема необходимы также для определения запасов органического вещества в почве, так как расчеты запасов органического углерода и азота производятся для почвенного мелкозема за вычетом крупнозема.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод анализа почвенного крупнозема с использованием цифровых фотоснимков на примере характеристики содержания и формы грубых обломков в профиле альфисоли. Получены следующие выводы:

В изученном профиле грубые обломки распределены неравномерно, то есть в горизонтах щебнистой морены и смешанного моренно-лессового материала содержится больше крупнозема, чем в горизонтах суглинистой морены и лёсса. Максимальные значения отношений общего числа к массе и общей площади к массе грубых обломков зафиксированы на глубинах 80 и 110 см.

Формы щебней в слоях лёсса и суглинистой морены варьируют в меньшей степени, чем в горизонте щебнистой морены. Усредненные значения округлости, окатанности и непрямолинейности щебней в пахотном горизонте выше, чем на глубине 50–110 см. Эти данные свидетельствуют о том, что в процессе вымораживания крупнозема более округлые щебни быстрее продвигаются к поверхности, чем более угловатые щебни.

Предложенный метод позволяет оценить количество и формы щебня в каждом почвенном горизонте быстрее и надежнее, чем традиционные методы характеристики крупнозема с использованием визуальных шкал сравнения.

Данный метод может найти применение в фундаментальном почвоведении для интерпретации процессов почвообразования и для усовершенствования почвенной классификации путем введения новых диагностических критериев (формы щебня в материале почвы). Информация о вертикальном и латеральном распределении почвенного крупнозема имеет важное значение для планирования земледелия на каменистых почвах и может быть использована для оценки степени проницаемости почв для корней растений, характеристики дренажа и аэрации почв и расчета запасов почвенного органического углерода и азота.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность Цзинь Чжоу за помощь в отборе образцов, Ричарду Ли и Марине Штайнер за помощь в подготовке образцов и анализе изображений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bockheim J.G., Gennadiyev A.N.* The role of soil-forming processes in the definition of taxa in Soil Taxonomy and the World Soil Reference Base // *Geoderma*. 2000. V. 95. P. 53–72.
2. *Chantal M.D., Rita H., Bergsten U., Löfvenius M.O., Grip H.* Effect of soil properties and soil disturbance on frost heaving of mineral soil: a laboratory experiment // *Canadian J. Forest Res.* 2006. V. 95. P. 2885–2893.
3. *Childs S.W., Flint A.L.* Physical properties of forest soils containing rock fragments. Sustained productivity of forest soils // Eds. S.P. Gessel et al. (Proceedings of the 7th North American Forest Soils Conference), University of British Columbia, Faculty of Forestry Publication, Vancouver, 1990. P. 95–121.
4. *Chow T.L., Rees H.W., Monteith J.O., Toner P., Lavoie J.* Effects of coarse fragment content on soil physical properties, soil erosion and potato production // *Canadian J. Soil Sci.* 2007. V. 87. P. 565–577.
5. *Cooke R.U., Warren A., Goudie A.S.* Desert geomorphology. CRC Press, 2006. 534 p.
6. *Dunlop H.* Automatic rock detection and classification in natural scenes. Masters Thesis, Carnegie Mellon University, 2006.
7. *Grant W.J., Struchtemeyer R.A.* Influence of the coarse fraction in two main potato soils on infiltration, runoff and erosion // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1959. V. 23. P. 391–394.
8. *Hartemink A.E., Gennadiyev A.N., Bockheim J.G., Bero N.* Short-range variation in a Wisconsin soilscape (USA) // *Eurasian Soil Science*. 2017. V. 50. P. 198–209.
9. *Hartemink A.E., Minasny B.* Towards digital soil morphometrics // *Geoderma*. 2014. V. 230. P. 305–317.
10. *Hlaváčiková H., Novák V., Šimůnek J.* The effects of rock fragment shapes and positions on modeled hydraulic conductivities of stony soils // *Geoderma*. 2016. V. 281. P. 39–48.
11. *Hole F.D.* A classification of pedoturbations and some other processes and factors of soil formation in relation to isotropism and anisotropism // *Soil Science*. 1961. V. 91. P. 375–377.
12. *Khetdan C., Chittamart N., Tawornpruek S., Kongkaew T., Onsamrarn W., Garré S.* Influence of rock fragments on hydraulic properties of ultisols in Ratchaburi Province, Thailand // *Geoderma Regional*. 2017. V. 10. P. 21–28.
13. *King C.A.M., Buckley J.T.* The analysis of stone size and shape in arctic environments // *J. Sedimentary Res.* 1968. V. 38. P. 200–214.
14. *Lutz H.J., Chandler R.F.* Forest soils. London: Wiley & Sons, Inc., 1946. 514 p.
15. *Miller F.T., Guthrie R.L.* Classification and Distribution of Soils Containing Rock Fragments in the United States // *Erosion and productivity of soils containing rock fragments (erosionandprodu)*. 1984. P. 1–6.
16. *O'Donnell T.K., Goyne K.W., Miles R.J., Baffaut C., Anderson S.H., Sudduth K.A.* Identification and quantification of soil redoximorphic features by digital image processing // *Geoderma*. 2010. V. 157. P. 86–96.
17. *Perfect E., Miller R.D., Burton B.* Frost upheaval of overwintering plants: a quantitative field study of the displacement process // *Arctic and Alpine Research*. 1988. V. 20. P. 70–75.
18. *Pettijohn F.J., Lundahl A.C.* Shape and roundness of Lake Erie beach sands // *J. Sedimentary Res.* 1943. V. 13. P. 69–78.
19. *Poesen J., Lavee H.* Rock fragments in top soils: significance and processes // *Catena*. 1994. V. 23. P. 1–28.
20. *Powers M.C.* A new roundness scale for sedimentary particles // *J. Sedimentary Res.* 1953. V. 23. P. 117–119.

21. *Pye K.* The nature, origin and accumulation of loess // *Quarter. Sci. Rev.* 1995. V. 14. P. 653–667.
22. *Rasband W.* ImageJ. Bethesda: US National Institutes of Health, 1997.
23. *Rytter R.M.* Stone and gravel contents of arable soils influence estimates of C and N stocks // *Catena.* 2012. V. 95. P. 153–159.
24. *Schoeneberger P.J., Wysocki D.A., Benham E.C.* Field book for describing and sampling soils, version 3.0. Lincoln: USDA Natural Resources Conservation Service: National Soil Survey Center, 2012.
25. *Shaw C.F.* Erosion pavement // *Geographical Review.* 1929. V. 19. P. 638–641.
26. *She W., Cao X., Zhao G., Cai D., Jiang J., Hu X.* Experimental and numerical investigation of the effect of soil type and fineness on soil frost heave behavior // *Cold Regions Science and Technology.* 2018. V. 148. P. 148–158.
27. Soil Science Division Staff. Soil survey manual // *USDA Handbook 18 / Ed. C. Ditzler et al.* Washington, D.C.: Government Printing Office, 2017.
28. Soil Survey Staff. Keys to Soil Taxonomy. 12th ed. Washington, DC.: USDA-Natural Resources Conservation Service, 2014.
29. *Stewart V.I., Adams W.A., Abdulla H.H.* Quantitative pedological studies on soils derived from Silurian mudstones: II. The relationship between stone content and the apparent density of the fine earth // *J. Soil Sci.* 1970. V. 21. P. 248–255.
30. *Taber S.* Frost heaving // *The J. Geology.* 1929. V. 37. P. 428–461.
31. *Wang Q.B., Hartemink A.E., Jiang Z.D., Jin N.X., Sun Z.X.* Digital soil morphometrics of krotovinas in a deep Alfisol derived from loess in Shenyang, China // *Geoderma.* 2017. V. 301. P. 11–18.
32. *Wang X., Li Z., Cai C., Shi Z., Xu Q., Fu Z., Guo Z.* Effects of rock fragment cover on hydrological response and soil loss from Regosols in a semi-humid environment in South-West China // *Geomorphology.* 2012. V. 151. P. 234–242.
33. *Wang X., Liu G., Liu S.* Effects of gravel on grassland soil carbon and nitrogen in the arid regions of the Tibetan Plateau // *Geoderma.* 2011. V. 166. P. 181–188.
34. *Wang Z., Jury W.A., Tuli A., Kim D.J.* Unstable flow during redistribution // *Vadose Zone J.* 2004. V. 3. P. 549–559.
35. *Webster R.* Quantitative spatial analysis of soil in the field // *Adv. Soil Sci.* Springer, 1985. P. 1–70.
36. *Weil R.R., Brady N.C.* The Nature and Properties of Soils. 15th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Press, 2016.
37. *Zdilla M.J., Hatfield S.A., McLean K.A., Cyrus L.M., Laslo J.M., Lambert H.W.* Circularity, solidity, axes of a best fit ellipse, aspect ratio, and roundness of the foramen ovale: a morphometric analysis with neurosurgical considerations // *J. Craniofacial Surgery.* 2016. V. 27. P. 222.

Quantifying Coarse Fragments in Soil Samples Using a Digital Camera

Y. Zhang^a, A. E. Hartemink^{a,*}, and J. Huang^a

^aUniversity of Wisconsin-Madison, Department of Soil Science, 1525 Observatory Drive, Madison, WI 53706 USA

*e-mail: hartemink@wisc.edu

We developed a novel method using image analysis to quantify the content and shape characteristics of coarse fragments in an Alfisol developed from loess over outwash. A total of 45 soil samples (about 600–1000 g each) were collected at 10-cm depth interval from 0 to 150-cm deep at three transects in the profile. The coarse fragments were separated from the soil fine-earth particles and photographed in the laboratory. The images were processed using ImageJ processing software that provides total count, total area, and mean circularity of each sample, as well as shape characteristics (circularity, aspect ratio, roundness, and solidity) of each coarse fragment. The amount of coarse fragments (coarse fragments, total count/mass, and total area/mass) varied with depth and was highest in the 2C1 and BC horizons where the soil was developed from coarse glacial outwash and a mixing of coarse outwash and loess. The coarse fragments content was lower in the loess and fine glacial outwash horizons. Approximately 9.6% of coarse fragments in weight or 14.5% by count moved from the glacial outwash layer into the loess layer (Ap and Bt horizons). The shape characteristics showed large variations at 50–110 cm depth where the soil was developed from coarse glacial outwash and a mixing of coarse outwash and loess. The mean circularity, roundness, and solidity of the coarse fragments at the topsoil were larger than those at the 50–110 cm, indicating that rounder stones tend to move faster than irregularly shaped stones during the frost heaving. This method provides a robust, fast and quantitative way to estimate the distribution and the shape characteristics of coarse fragments in a soil sample that can be applied to help better understand soil formation.

Keywords: glacial outwash, loess, circularity, roundness, frost heaving, gravelization