



УДК 631.4

Высокочастотная изменчивость выноса почвенных агрегатов при эрозии почвы с хорошей структурностью

А.Ю.Сидорчук

Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 119891, Москва, ГСП-1,

Ленинские горы

sidorchuk@mtu-net.ru

Поступила в редакцию 06.09.2007.

Аннотация

С помощью высокоскоростной цифровой видеокамеры изучен процесс выноса почвенных агрегатов с площадок 7.3 и 1.5 м² в результате эрозии ламинарным бурным распластанным потоком малой глубины. Диаметры выносимых агрегатов характеризуются логарифмически-нормальным распределением, а интервалы времени между выносом двух последовательных агрегатов – экспоненциальным распределением. Это позволяет отнести процесс выноса агрегатов к классу сложных пуассоновских случайных процессов, который образуется в результате суммирования локальных независимых случайных процессов эрозии.

Введение

Современные стохастические модели эрозии почв [10, 18, 22, 24] включают информацию не только о средних величинах факторов эрозии и стока наносов, но и их изменчивости во времени и пространстве. Соответственно, эти модели позволяют рассчитать как осредненные темпы эрозии почв и выноса наносов, так и их пространственно-временные вариации. Для верификации таких моделей необходимы экспериментальные данные о высокочастотной изменчивости, как факторов эрозии, так и характеристик темпов эрозии и выноса наносов с эрозионных площадок. Это определило цель настоящего исследования: изучить стохастические свойства высокочастотного процесса выноса почвенных агрегатов при установившейся эрозии почвы естественного сложения с хорошей структурностью.

Мощным средством исследования высокочастотных процессов является высокоскоростная съемка. В почвоведении она впервые была применена Гуссаком [4, 5] для изучения почвенной эрозии и дала интересные результаты. Наиболее широко высокоскоростная киносъемка оптическими камерами с частотой до 500 кадров/с

применялась при исследовании движения несвязных наносов – частиц песка и гравия [8]. Применение оптических камер приводило к ручной обработке отснятого материала и большим затратам труда и времени (см. [11]).

Современные цифровые высокоскоростные видеокамеры дают возможность получать изображения с частотой более 500 кадров/с при достаточно высоком разрешении – 640 на 480 пикселей. Широко доступные USB-камеры позволяют получать изображения с частотой до 30-60 кадров/с при том же разрешении. Эти устройства постоянно совершенствуются и дешевеют. Изображения в цифровом виде допускают непосредственную массовую обработку на компьютерах, а программное обеспечение достаточно просто реализуется с помощью доступных коммерческих пакетов обработки цифровых изображений. В ходе полевого эксперимента по размыву распластанным потоком хорошо агрегированной почвы нами была проведена съемка движения почвенных агрегатов в конце эрозионной площадки с помощью цифровой высокоскоростной камеры Mega Speed MS25K, дальнейший анализ изображений с помощью пакета MATLAB7 и статистическая обработка полученных результатов.

Методика эксперимента

Характеристика полевой экспериментальной площадки. Эксперимент был организован на полевой станции Тирамоана в 30 км севернее г. Крайсчерч, Новая Зеландия (рис. 1). Это холмистая местность с отметками 50-350 м над уровнем моря, сложенная алевrolитами и известняками. Здесь выпадает 550-750 мм осадков в год, довольно равномерно распределенных по месяцам. Склоны используются под пастбища для выпаса овец.

Для эксперимента была выбрана верхняя прямая часть склона северо-западной экспозиции (около 200 м над уровнем моря) крутизной 14 -14.5°. Склон сложен выветрелыми известняками, на которых развита почва серии Ваикаахи – типичная темно-коричневая рендзина (Calcareous Orthic Melanic по [15]) с мощностью горизонтов А+АВ 40-60 см и содержанием органического углерода 3.5% в верхних 10 см. Почва состоит из 28% тонкого песка; 42% пыли и 30% глины при объемной плотности 1.27 г/см³. Пористость составила 51%, распределение размеров пор следует логарифмически-нормальному закону с модой на 0.1 – 0.2 мкм. Связность почвы, измеренная крыльчаткой, составила 2 КПа при 50% водонасыщении. Агрегатный состав определялся методами, близкими к методике Н.И. Саввинова [2]. Крупность почвенных агрегатов определялась аккуратным ручным рассевом воздушно-сухой

почвы. Выявилось бимодальное распределение агрегатов по крупности с модами 4 – 8 мм (24% по весу) и 2.8-1.4 мм (20%), 88.4% составляют агрегаты крупностью 10 – 0.25 мм. Водопрочность агрегатов крупностью 2 – 4 мм оценивалась на основании зависимости остаточного веса агрегатов на сите с ячейей 2 мм от времени осцилляции этого сита с амплитудой 5 см и периодом 2 с в бассейне с водой [23]. Разрушение агрегатов во времени происходит по зависимости Вейбулла-Гнеденко [9], для почвы серии Ваикаахи доля P веса водопрочных агрегатов, остающихся на сите через время t (с) описывается формулой

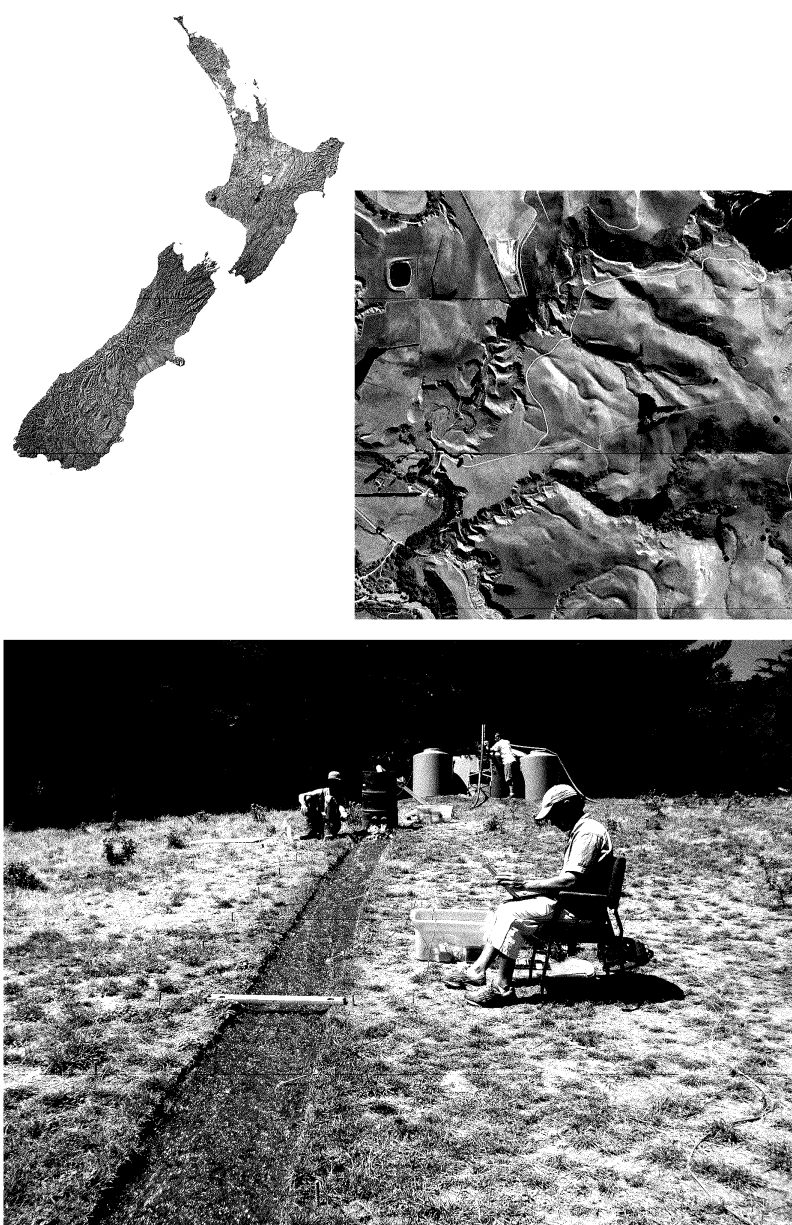


Рис. 1 Положение экспериментальных площадок (В) на Южном острове Новой Зеландии (А) в бассейне ручья Лаймстон Крик (Б)

$$P = \exp\left(-\frac{t^{0.23}}{5.78}\right) \quad (1)$$

с достоверностью аппроксимации $R^2=0.85$. Через 20 с (10 осцилляций, как принято в методике Саввинова) на сите осталось 70% первоначального веса агрегатов, через 30 мин (как рекомендовано Йодером [23]) – 38%.

С двух эрозионных площадок длиной 16 и 3.5 м, шириной 0.6 м был аккуратно снят верхний 3-5 см слой почвы, чтобы избавиться от влияния разреженной растительности, но не нарушить естественного сложения почвы. Борта площадок были покрыты стабилизирующим гелем для предотвращения боковой эрозии. Вода подавалась в вершину площадок электронасосом из резервуаров общей емкостью 22000 литров, что позволяло держать максимальный расход воды 3 л/с в течение 2 часов. Устойчивость расхода воды во времени контролировалась расходомером Fisher-Porter “Miniflow”. На длинной площадке проведено 6 экспериментов с расходами воды 0.5; 1.0; 1.5; 2.0; 2.5 и 3.0 л/с; на короткой 1 эксперимент с расходом 1.0 л/с. Перед началом экспериментов 2 суток подавался небольшой (около 0.2 л/с) расход воды до полного водонасыщения почвы, этот режим поддерживался и в периоды между экспериментами.

Каждый эксперимент продолжался 2 часа. Для достижения репрезентативности и сравнимости результатов необходимо было добиться стационарности процесса эрозии. Для этого первые полтора часа эрозионная площадка промывалась, проводились измерения гидравлических характеристик потока. В последние полчаса, после того как основная часть неустойчивых агрегатов почвы была удалена потоком и процесс эрозии стабилизировался, измерялся вынос наносов. Над нижними 3.5 метрами длинной эрозионной площадки и над всей короткой была разбита палатка из полупрозрачного белого материала, что обеспечивало внутри равномерный рассеянный свет. На нижних 0.8 м каждой площадки во всю ее ширину (0.6 м) вровень с поверхностью почвы была вкопана белая пластиковая доска с масштабной линейкой по краю, верхний стык доски с почвой был укреплен водостойким гелем. Над доской была установлена скоростная цифровая камера с обзором ~0.6 м по ширине и ~0.5 м по длине. Ниже доски под направляющим козырьком была вкопана 100 л приемная емкость с пластиковым мешком, наполненная чистой водой и закрытая крышкой. На последние полчаса каждого эксперимента крышка приемной емкости открывалась, и все транспортируемые почвенные агрегаты аккумулировались в стоячей воде. По

завершении эксперимента вода из емкости в основном откачивалась, пластиковый мешок с наносами извлекался и отправлялся в лабораторию.

Получение и анализ изображений. Структурность и водопрочность почвы серии Ваикакахи обеспечили отрыв частиц почвы и их перемещение в виде агрегатов диаметром более 0.3-0.5 мм. Эти практически черные агрегаты были хорошо видны на белой пластиковой доске в конце площадки. В период измерения стока наносов 1-5 раз включалась скоростная цифровая камера на 2-7 минут и изображения движущихся агрегатов фиксировались с частотой 60 кадров/с и разрешением 640 на 480 пикселей. Пиксель был размером 0.96 на 0.91 мм для длинной площадки и 1.07 на 1.08 мм для короткой. Файлы с изображениями занимали до 600 мегабайт в оперативной памяти компьютера (что и ограничивало длительность сеанса работы камеры). Их необходимо было периодически записывать на жесткий диск, после чего можно было снова проводить съемку 2-7 минут. Конечно, эти детали касаются только камеры Mega Speed MS25K и при применении другой аппаратуры будут другие ограничения по длительности, частоте и разрешению съемки.

Анализ изображений осуществлялся в среде MATLAB7, что не исключает применения приводимого алгоритма в других средах программирования. Программное обеспечение камеры Mega Speed MS25K позволяет передавать последовательные серые изображения в компьютер в виде фильмов - файлов с расширением ".avi", что обеспечивает хорошее сжатие информации. Для дальнейшей обработки ".avi" файлы разбивались на отдельные кадры, номер кадра нес информацию о времени его производства. Далее для каждого кадра съемки, представленного в цифровом виде, осуществлялись следующие процедуры:

- 1) Проводилось устранение с изображений всех неподвижных объектов, а также влияние малых колебаний освещенности между кадрами. Это достигалось вычитанием кадра n из предыдущего во времени кадра $n-1$.

- 2) Изображения из серого переводились в черно-белую шкалу, что облегчало дальнейшую цифровую обработку. Порог для этого перехода был установлен на 8% темнее фона изображения. Все более темные изображения становились черными, более светлые – белыми, сливаясь с фоном. Порог был выбран таким образом, чтобы количество светлых неучитываемых изображений было минимальным.

- 3) Выбиралась некая полоса прокрутки, которая пересекала все изображение поперек. Ширина B полосы (протяженность по потоку) подбиралась такой, что никакой

агрегат не мог миновать этой полосы за время между последовательными кадрами ($1/60$ с):

$$B = \frac{U_{\max}}{60} + \varepsilon \quad (2)$$

Здесь U_{\max} – максимальная скорость движения агрегатов по доске, ε – некоторая малая величина.

4) Фиксировалось время (то есть номер кадра) когда в полосу входил агрегат.

5) Подсчитывалась площадь проекции агрегата на горизонтальную плоскость в пикселях и переводилась в метрические меры (мм^2). Площадь одного пикселя составляла 0.86 для длинной площадки и 1.16 мм^2 для короткой. Если изображение занимало только часть пикселя, то его цвет "разбавлялся" цветом фона в соответствующей пропорции. Если фон составлял более 92%, то при переходе от серого изображения к черно-белому изображение терялось. Это означает, что частицы площадью менее 0.07-0.09 мм^2 применяемыми методами не регистрировались. Численные эксперименты с более низким порогом перехода от серого к черно-белому показали, что число таких частиц незначительно. Если фон составлял не более 92%, то при переходе от серого изображения к черно-белому изображение становилось черным. Такие агрегаты с фактической площадью менее 1 пикселя регистрировались как имеющие площадь в 1 пиксель. Таким образом, агрегаты с площадью $< 0.86-1.16 \text{ мм}^2$, но более 0.07-0.09 мм^2 , регистрировались с площадью 0.86 (длинная площадка) и 1.16 мм^2 (короткая площадка).

6) Определялась область, в которой агрегат появится при последующем движении. Это позволяло выявлять и устранять наличие этого самого агрегата в полосе прокрутки на последующих изображениях.

По длине полосы прокрутки могло одновременно (с точностью до $1/60$ с) появиться несколько агрегатов, тогда площадь подсчитывалась для каждого из них. Так как полоса прокрутки имела конечную ширину B , точность оценки времени вхождения i - того агрегата, движущегося со скоростью U_i , составляла

$$\varepsilon_i = \frac{B}{U_i} \approx \frac{U_{\max}}{60U_i} \quad (3)$$

В дальнейшем нас больше будет интересовать интервал τ_i между временем прохождения двух последовательных агрегатов i и $i+1$. Точность оценки длины этого интервала составляет

$$\varepsilon_{\tau} = \frac{U_{\max}}{60U_i U_{i+1}} |U_i - U_{i+1}| \quad (4)$$

что в большинстве случаев меньше разницы во времени двух последовательных кадров съемки 1/60 с. В дальнейших расчетах принимается, что если в полосе прокрутки "одновременно" появляется $n+1$ агрегатов, то интервал времени для первого из них равен τ_i , а для последующих $\tau = \frac{1}{60n}$. Если $\tau_i=1/60$, то для всех $n+1$ агрегатов

$$\tau = \frac{1}{60(n+1)}.$$

Результаты

В семи экспериментах по эрозии почвы на площадках определены характеристики потока и выноса почвенных агрегатов (табл. 1), на длинной площадке получено и обработано 12 фильмов общей продолжительностью 64 мин, зафиксирован вынос 43350 агрегатов; на короткой площадке получено и обработано 5 фильмов общей продолжительностью 19 мин, зафиксирован вынос 2560 агрегатов. Каждый из них характеризуется площадью проекции на горизонтальную плоскость и временем появления в створе (или интервалом между временем прибытия двух последующих агрегатов). Все эти данные были использованы для изучения изменчивости процесса транспорта почвенных агрегатов. Количество неучтенных самых мелких агрегатов и частиц площадью менее 0.07-0.09 мм² было незначительно (для отдельных фильмов близко к нулю) и не оказало влияния на результаты анализа экспериментов.

Гидравлические характеристики потока. Поток характеризовался малой средней глубиной (6-9 мм) и был распластан практически на всю ширину каждой эрозионной площадки (табл. 1). Довольно значительный уклон склона ($\sin \alpha=0.24$) и большая относительная шероховатость (отношение высоты выступов шероховатости к глубине потока $\Delta/d=0.2-0.3$) приводили к средним скоростям потока 0.13-0.63 м/с. Малые глубины и достаточные

Таблица 1. Гидравлические характеристики потока и сток наносов в нижней части экспериментальной площадки. Обозначения: расход воды Q , л/с; ширина потока W , м; глубина d , м; средняя скорость $U_{mean}=Q/(Wd)$, м/с; число Фруда $Fr=U_{mean}/\sqrt{gd}$; число Рейнольдса $Re=U_{mean}d/\nu$; гидравлическое сопротивление $\lambda=2gdS/(U_{mean})^2$; расход

наносов Q_s , г/с; расход наносов, рассчитанный по диаметру агрегатов без учета их сплюснутости Q_a , г/с; E – интенсивность эрозии г/(м²с); ν – кинематическая вязкость, S – уклон свободной поверхности воды, g – ускорение силы тяжести.

№	Q	W	d	U_{mean}	Fr	Re	λ	Q_s	Q_a	E
1	0.5	0.45	0.0059	0.19	0.8	1100	0.79	0.05	0.15	0.0074
2	1.0	0.46	0.0073	0.3	1.1	2150	0.39	0.1	0.67	0.0145
3	1.5	0.51	0.0071	0.40	1.6	2900	0.19	0.12	0.49	0.0157
4	2.0	0.50	0.0084	0.47	1.65	3900	0.18	0.59	1.8	0.0787
5	2.5	0.49	0.0090	0.52	1.85	4900	0.14	0.16	0.35	0.0218
6	3.0	0.51	0.0093	0.63	2.1	5800	0.11	0.1	0.04	0.0131
7	1.0	0.59	0.0076	0.22	0.80	1670	0.74	0.016	0.078	0.0104

скорости течения определили бурный тип потока (число Фруда Fr около и больше единицы). В то же время обратно-пропорциональная зависимость между числом Рейнольдса Re и гидравлическим сопротивлением λ указывает на его ламинарный режим. Сочетание бурного типа и ламинарного режима достаточно часто для плоскостных и ручейковых потоков на склонах [12, 14, 20] и создает значительные трудности при попытках исследовать и моделировать гидравлику таких потоков. Интенсивность эрозии почв ламинарными потоками обычно меньше, чем турбулентными [19], тем не менее, эрозия происходит. Эмметт [14] отмечает, что его экспериментальные данные не подтверждают так называемое 27 правило Кинга [16], согласно которому ламинарные потоки не производят эрозии. В ламинарных бурных потоках малой глубины, где для сдвига частиц почвы реализуется не только кинетическая, но и потенциальная энергия потока [7, 17], эрозия может быть существенной. Главным в сочетании бурности и ламинарности для эрозионного процесса является значительная изменчивость актуальных давлений и скоростей во времени и пространстве.

Средняя интенсивность эрозии. Средняя интенсивность эрозии E в последние полчаса каждого эксперимента определена по весу наносов V , аккумулярованных в приемной емкости за время T (табл.1):

$$E = \frac{V}{LWT} = \frac{Q_s}{LW} \quad (5)$$

Здесь L – рабочая (размываемая) длина площадки (15 м у длинной и 2.6 м у короткой), W – ширина потока, Q_s – расход наносов. Интенсивность эрозии определяется взаимодействием размывающего потока и сопротивлением почвы размыву. Если первая величина, связанная с гидравлическими характеристиками потока, увеличивалась от эксперимента к эксперименту, то вторая варьировала в зависимости от степени промытости почвы. Эта промытость оказалась аномально низкой во время эксперимента 4, так как при расходе воды 2 л/с выносились агрегаты с тех частей эрозионной площадки, где они при меньших расходах воды аккумулировались. Во время эксперимента 6 промытость была аномально высокой, так как эксперимент 6 был организован непосредственно после эксперимента 5, в результате подготовительный период составил не 1.5, а 3.5 часа. Если при построении связи интенсивности эрозии E ($\text{г}/(\text{м}^2 \text{с})$) со скоростью потока U ($\text{м}/\text{с}$) исключить из рассмотрения результаты этих двух экспериментов, то искомая связь с достоверностью аппроксимации $R^2=0.95$ описывается функцией

$$E = 0.042U . \quad (6)$$

Линейная связь интенсивности эрозии и скорости потока, видимо, определяется ламинарным режимом течения. При эрозии турбулентными потоками интенсивность смыва почв нарастает с увеличением скорости потока существенно быстрее и обычно описывается степенными зависимостями с показателями степени более 2 (см. [20]).

Размеры агрегатов. По данным визуальных наблюдений была принята гипотеза, что агрегаты имеют форму сплющенного сфероида (чечевицеобразную). Тогда эквивалентный диаметр агрегата по большому кругу сфероида (в дальнейшем, просто диаметр) рассчитывается из площади проекции агрегата F как

$$D = \sqrt{\frac{4F}{\pi}} \quad (7)$$

Величина сплюсненности сфероида (отношение k малого и большого диаметров образующего эллипса) определен сравнением расхода наносов Q_s , осевших за время T в приемной емкости и суммарным рассчитанным расходом наносов Q_a в виде агрегатов с объемной плотностью p_d , прошедших замыкающий створ за время t в ходе данного эксперимента (табл. 1):

$$k = \frac{Vt}{Tp_d \sum \frac{4}{3} \pi D^3} = \frac{Q_s}{Q_a} \quad (8)$$

Сплюсненность сфероида в среднем составила $1/3$, разброс точек в зависимости (8) определяется как отличиями формы агрегатов от чечевицеобразной, так и различиями во времени выдержки T и t .

Временные последовательности размеров агрегатов были подвергнуты статистической обработке. Для всех фильмов (а также для размеров агрегатов в почве) были вычислены средние диаметры и их среднеквадратические отклонения (табл. 2). Эта обработка показала

Таблица 2. Статистические характеристики диаметров почвенных агрегатов в последовательностях и интервалов времени между их прохождением замыкающий створ. Обозначения см. в тексте.

№ эксп. /фильма	Q л/с	число агр.	D_{cp} мм	SD_D мм	C_v	D_n	τ_{cp} с	SD_τ с	C_v	R^2
1/05_1	0.5	7334	1.81	0.87	0.48	0.217	0.035	0.047	0.75	0.927
2/10_1	1.0	9512	2.45	1.46	0.60	0.139	0.029	0.036	0.80	0.956
2/10_2	1.0	6744	2.55	1.61	0.63	0.124	0.055	0.070	0.78	0.975
3/15_1	1.5	7268	2.87	1.60	0.56	0.094	0.245	0.283	0.86	0.729
4/20_3	2.0	1427	2.88	1.51	0.52	0.08	0.273	0.337	0.81	0.982
5/25_1	2.5	3922	2.91	1.56	0.54	0.085	0.092	0.107	0.86	0.988
5/25_2	2.5	3828	2.96	1.69	0.57	0.095	0.095	0.123	0.77	0.978
5/25_3	2.5	1269	2.88	1.62	0.56	0.101	0.153	0.188	0.82	0.986
6/30_1	3.0	371	2.85	1.40	0.49	0.096	0.977	1.035	0.94	0.994
6/30_2	3.0	966	2.22	1.17	0.52	0.132	1.133	1.300	0.87	0.957
6/30_3	3.0	303	2.82	1.60	0.57	0.091	0.962	1.169	0.82	0.984
6/30_4	3.0	408	2.71	1.64	0.61	0.086	1.366	1.546	0.88	0.985
7/10_1	1.0	660	2.92	1.76	0.60	0.114	0.147	0.196	0.75	0.962
7/10_2	1.0	753	2.57	1.43	0.56	0.144	0.446	0.519	0.86	0.990
7/10_3	1.0	418	2.79	1.55	0.56	0.131	0.581	0.664	0.87	0.979
7/10_4	1.0	503	2.92	1.86	0.64	0.119	0.546	0.656	0.83	0.993
7/10_5	1.0	223	2.79	1.56	0.56	0.123	0.428	0.508	0.84	0.988

отсутствие трендов в последовательности размеров почвенных агрегатов в выходном створе эрозионной площадки при общей продолжительности размыва до 30 мин при одном расходе воды.

Средний диаметр агрегатов в почве равен 1.74 мм при среднеквадратическом отклонении 0.80 и коэффициенте вариации (отношение среднеквадратического отклонения к среднему) 0.46. Средний диаметр D_{cp} смытых с длинной площадки агрегатов в целом увеличивается с увеличением расхода воды, однако не очень существенно: при расходе 0.5 л/с средний диаметр смытых агрегатов составил 1.81 мм и с дальнейшим увеличением расхода воды увеличивался согласно приблизительной связи (достоверность аппроксимации $R^2=0.47$)

$$D_{cp} \approx 2.4Q^{0.17} \quad (9)$$

Таким образом, вероятность отрыва более крупных агрегатов более мощным потоком увеличивается, однако этот эффект не очень сильно проявляется.

С короткой площадки при расходе воды 1.0 л/с выносились несколько более крупные агрегаты ($D_{cp}=2.8$ мм), чем с длинной площадки при том же расходе ($D_{cp}=2.5$ мм), что может быть связано как с некоторым (незначительным) разрушением агрегатов при движении, так и с местными особенностями агрегирования почвы на площадках.

Среднеквадратическое отклонение диаметров агрегатов также слабо увеличивалось с ростом расхода воды так, что коэффициент вариации оставался близким к константе:

$$C_v = \frac{SD_D}{D_{cp}} \approx 0.56 \quad (10)$$

Наличие линейной зависимости между средним и среднеквадратическим отклонением довольно часто наблюдается при анализе геофизических явлений (например, в гидрологии, см. [6]) и существенно облегчает этот анализ.

Во всех дальнейших построениях мы исходим из гипотезы о стационарности и эргодичности рассматриваемой случайной последовательности выноса почвенных агрегатов с эрозионной площадки. Данные таблицы 2 и дальнейшая обработка рядов этой гипотезе не противоречат. Это позволяет определять статистические характеристики случайной последовательности (распределения вероятности, корреляционные функции) на основании имеющихся реализаций (фильмов) изменения данных во времени [3].

Для крупности выносимых агрегатов (и для крупности агрегатов исходной почвы) все эмпирические графики распределения вероятностей P_N хорошо аппроксимируются логарифмически-нормальной функцией (рис. 2):

$$\frac{dP_N}{dD} = \frac{1}{D\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln D - m)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (11)$$

Здесь m и σ - среднее и среднеквадратическое отклонение логарифмов диаметров.

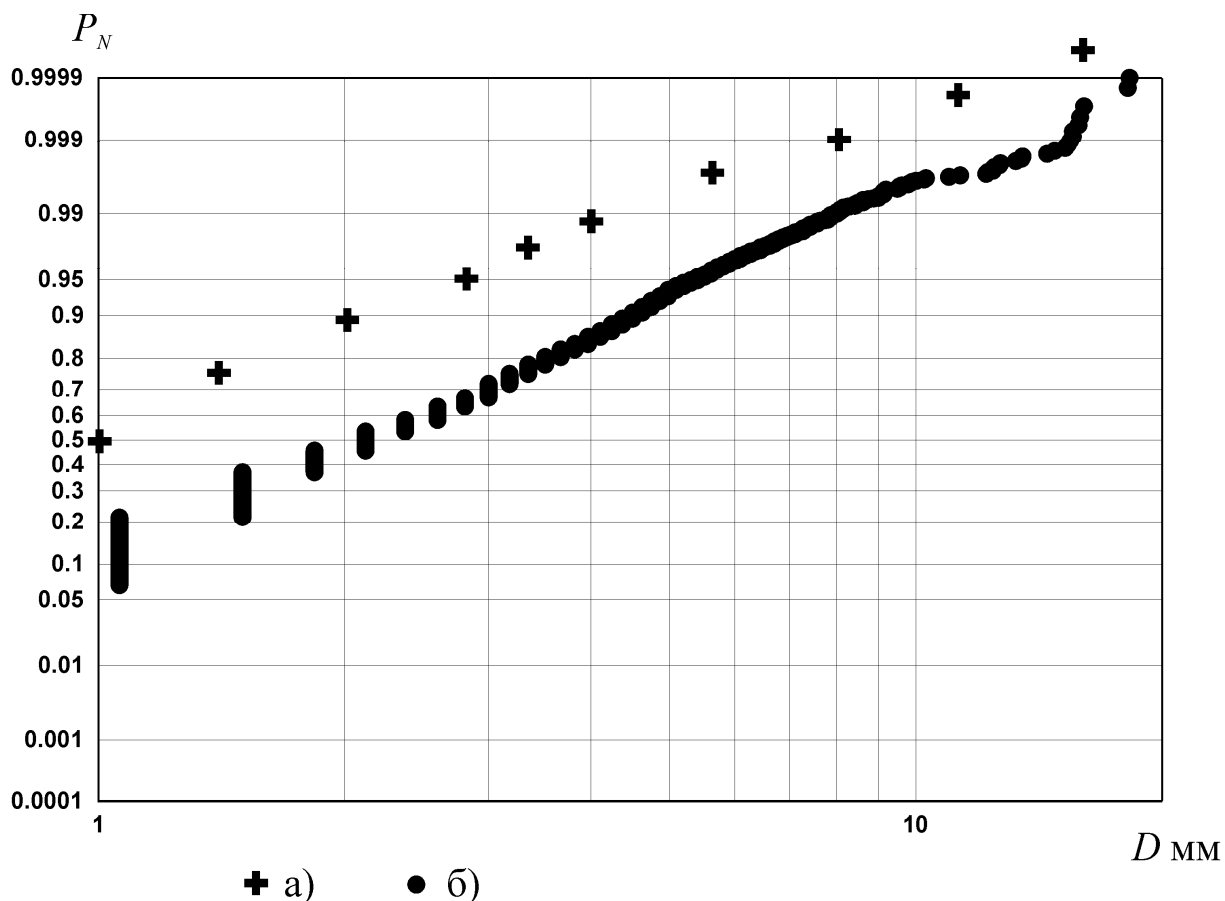


Рис. 2. Кумулятивное логарифмически-нормальное распределение для (а) диаметров агрегатов почвы и (б) агрегатов, смытых с эрозионной площадки 16 м длиной при расходе воды 1.0 л/с (фильм 10_2). Распределение построено на вероятностно-логарифмической клетчатке, где логнормальное распределение изображается прямой линией.

Арифметические меры, средний диаметр агрегатов и среднеквадратическое отклонение рассчитываются как

$$D_{cp} = \exp\left(\frac{\sigma^2}{2} + m\right); \quad (12)$$

$$SD_D = D_{cp} \sqrt{\exp(\sigma^2) - 1}$$

Критерий соответствия эмпирического и теоретического распределений Колмогорова-Смирнова D_n изменяется в пределах 0.09 – 0.22 (табл. 2), что меньше критического

значения (см. табл. 6.2 в [1]). Интересно, что логнормальное распределение лучше соответствует эмпирическим данным при расходах воды более 1.0 л/с. Хорошее соответствие наблюдаемых данных теоретическому логнормальному распределению получил Гарднер [13] при обработке более чем 200 гранулометрических анализов почвенных агрегатов самых разных почв. Перфект с соавторами [21] также установили хорошее совпадение данных сухого рассеивания почвенных агрегатов 7 типов почв в Канаде с теоретическим логнормальным распределением (достоверность аппроксимации $R^2=0.982$), хотя ими отдано предпочтение фрактальному (степенному) распределению (достоверность аппроксимации $R^2>0.999$).

Так как в наших экспериментах коэффициент вариации диаметров мало меняется в разных реализациях, логарифмически-нормальная функция распределения числа смытых почвенных агрегатов по диаметру характеризуется одним параметром – средним диаметром D_{cp} , и константой – коэффициентом вариации C_v .

Здесь нужно отметить, что плотность вероятности $p_N=dP_N/dD$ рассчитана по числу агрегатов данного диапазона диаметров, что отличается от более распространенного в почвоведении способа рассчитывать плотность вероятности $p_V=dP_V/dD$ по весу частиц некоторого диапазона диаметров. Эти две вероятности связаны между собой примерными отношениями

$$\frac{p_V}{p_N} = \frac{D^3}{\int_0^{\infty} D^3 p_N dD};$$

$$\frac{p_N}{p_V} = \frac{1}{D^3 \int_0^{\infty} \frac{p_V}{D^3} dD}$$
(13)

Для дальнейшего анализа большое значение имеет информация о наличии или отсутствии зависимости между рядами размеров почвенных агрегатов, выносимых в разное время. Расчеты корреляции рядов размеров агрегатов, взятых на разных участках общей последовательности (автокорреляционная функция) показывают, что коррелированность таких рядов очень слабая. Уже при сдвиге ряда на 2-5 точек коэффициент корреляции становится менее 0.1, а при сдвиге на 10-30 точек – переходит через ноль и в дальнейшем изменяется в пределах $-0.05 \div 0.05$ (рис. 3).

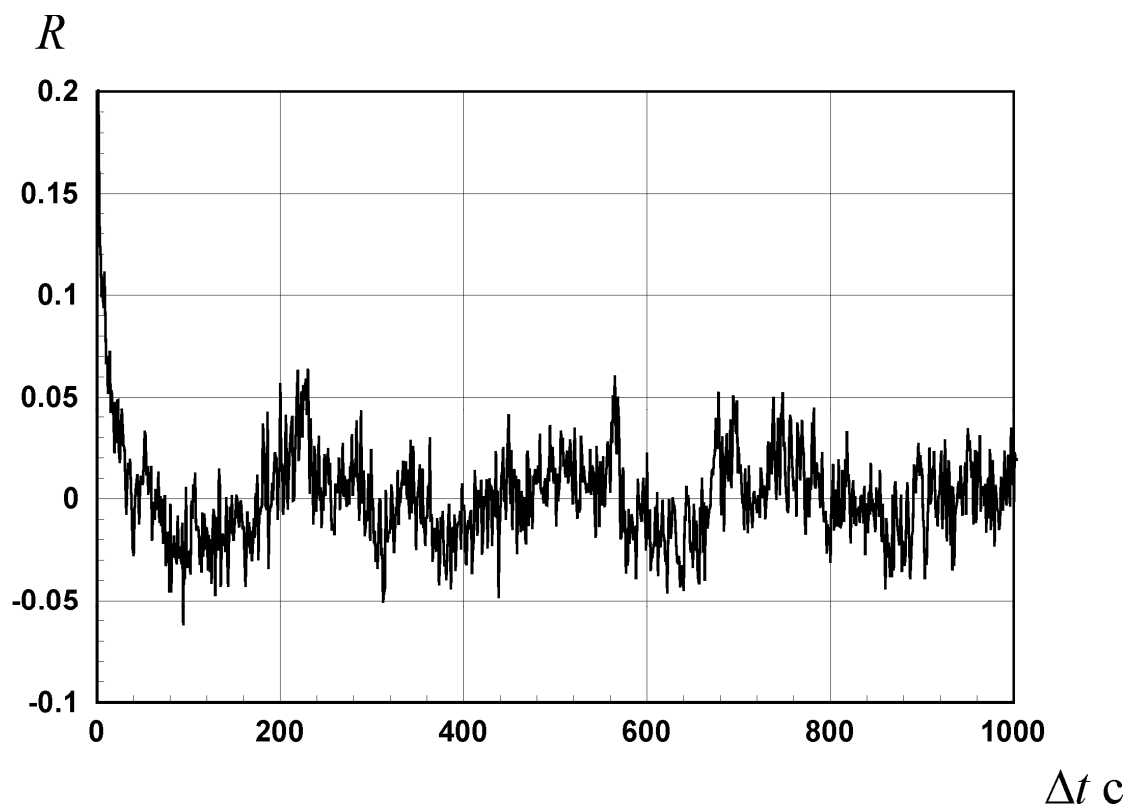


Рис. 3. Автокорреляционная функция для диаметров агрегатов, смытых с эрозионной площадки 16 м длиной при расходе воды 1.0 л/с (фильм 10_2). Рассчитана по половине длины основной последовательности.

Время прохождения агрегатов через замыкающий створ. Будем рассматривать интервал времени τ_i между прохождением замыкающий створ двумя последовательными агрегатами i и $i+1$. Из-за конечной точности оценки величины этого интервала ε_{τ} его длина формально никогда не равна нулю. Средние длины интервалов и среднеквадратические отклонения для всех фильмов сведены в таблицу 2. Эти данные показывают применимость гипотезы о стационарности и эргодичности к последовательностям интервалов.

Все полученные последовательности интервалов времени между агрегатами хорошо аппроксимируется (с достоверностью аппроксимации R^2 более 0.9, за исключением одного случая, табл. 2) экспоненциальным (показательным) распределением (рис. 4):

$$p_{\tau} = \frac{1}{\tau_{cp}} \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_{cp}}\right) \quad (14)$$

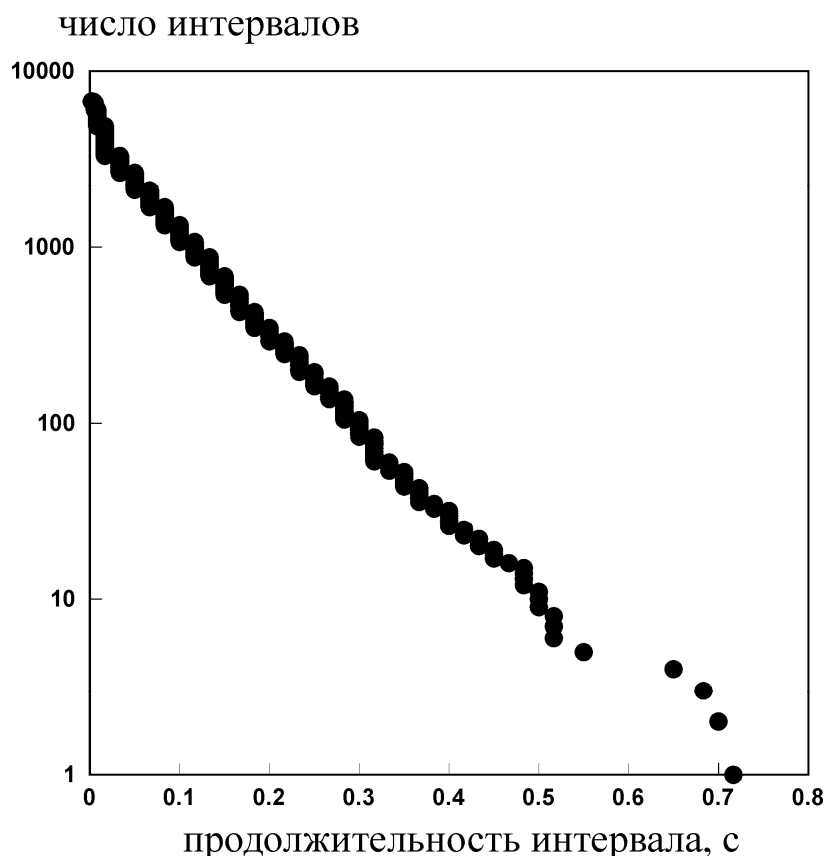


Рис. 4. Кумулятивное распределение интервалов времени между двумя последовательными агрегатами на выходе с эрозионной площадки 16 м длиной при расходе воды 1.0 л/с (фильм 10_2). Для удобства построения суммирование числа интервалов проведено в обратной последовательности (от более длинных интервалов к более коротким).

Для этого распределения средняя величина и среднеквадратическое отклонение равны между собой, а коэффициент вариации равен 1. Для большинства эмпирических распределений наблюдаются отклонения от экспоненциальной кривой в области наиболее продолжительных интервалов. Хотя такие интервалы времени имеют малую повторяемость, их наличие уменьшает величину эмпирической оценки среднеквадратического отклонения и увеличивает величину эмпирического среднего по сравнению с его оценкой по той части реализации, что хорошо описывается экспоненциальным распределением. Это приводит к тому, что эмпирический коэффициент вариации несколько меньше единицы (табл. 2).

Коррелированность рядов интервалов времени в большинстве последовательностей очень слабая – уже при сдвиге рядов на 2-3 точки коэффициент

корреляции становится менее 0.1, а при сдвиге на 10-25 точек – переходит через ноль и варьирует вокруг нуля (рис. 5).

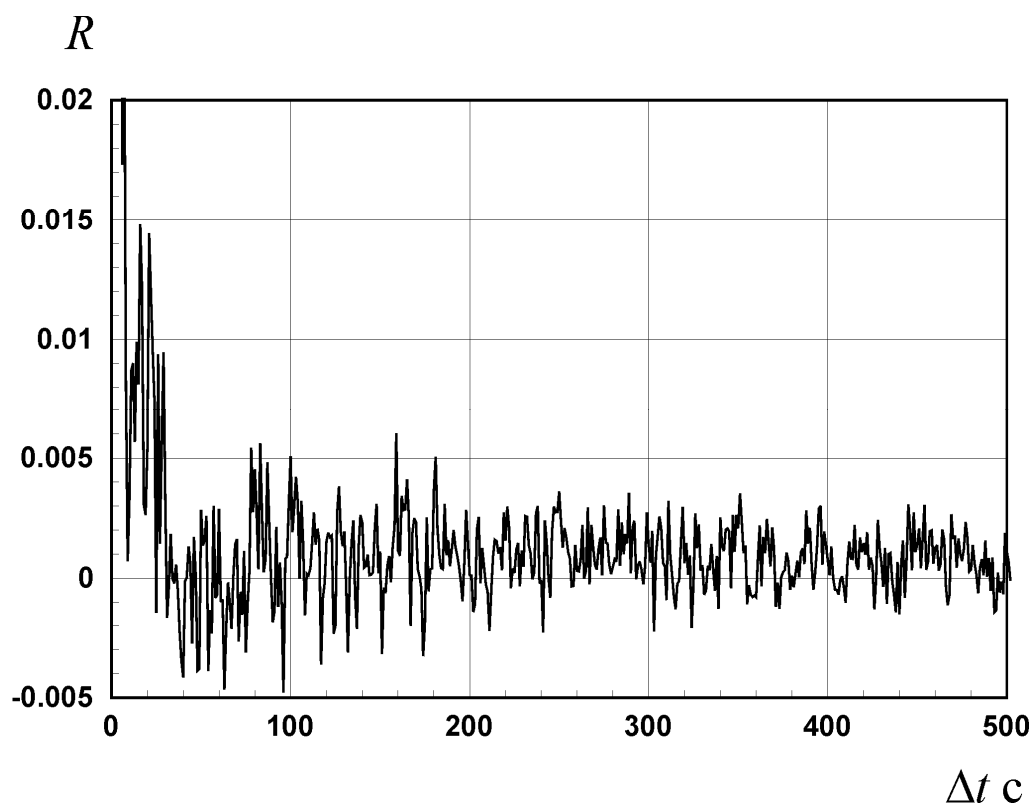


Рис. 5. Автокорреляционная функция для интервалов времени между двумя последовательными агрегатами на выходе с эрозионной площадки 16 м длиной при расходе воды 1.0 л/с (фильм 10_1). Рассчитана по половине длины основной последовательности.

Обсуждение результатов и заключение

Наблюдения с помощью скоростной цифровой видеокамеры с частотой 60 кадров в секунду за изменчивостью выноса почвенных агрегатов при эрозии структурированной почвы выявили здесь хорошо изученный [3] сложный пуассоновский случайный процесс. Он имеет следующие свойства:

- 1) Независимость отдельных событий в последовательности. Ни размеры агрегатов, ни интервалы времени между ними не связаны друг с другом, что подтверждается видом автокорреляционных функций (см. рис 3, 5).
- 2) Однонаправленность процесса. Изменение во времени поступления наносов в замыкающий створ характеризуется возрастающей ступенчатой функцией (рис 6), ступени которой соответствуют интервалам времени между приходом почвенных

агрегатов, а скачки функции – приходу агрегатов некоторого размера, который определяет величину скачка (вес агрегатов на рис. 6).

суммарный вес агрегатов, г

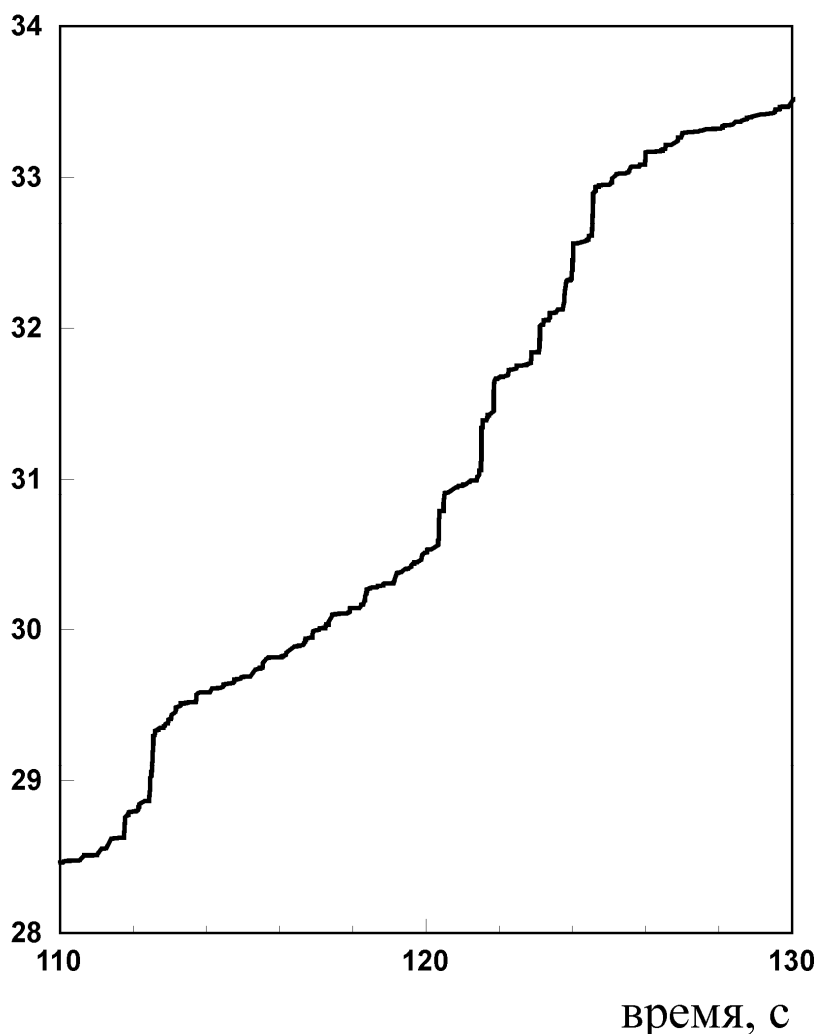


Рис. 6. Ступенчатая функция поступления агрегатов в замыкающий створ, экспериментальная площадка 16 м при расходе воды 1.0 л/с (фильм 10_2).

3) Характерное для пуассоновского процесса экспоненциальное (показательное) распределение длин интервалов времени между приходом двух последовательных агрегатов (см. рис. 4). Это распределение полностью описывается одним параметром – средней длиной интервала времени между приходом двух последовательных агрегатов τ_{cp} .

4) Сложность процесса. В обычном пуассоновском процессе все скачки функции равны 1 – все события одинаковы. В случае транспорта почвенных агрегатов события разные и определяются размером агрегатов. Распределение числа агрегатов по размеру (диаметру) хорошо описывается логарифмически нормальной функцией.

Логнормальная функция двухпараметрическая, однако, в рассматриваемом случае коэффициент вариации размеров агрегатов оказался практически постоянным в разных реализациях и распределение полностью описывается одним параметром – средним размером агрегатов D_{cp} и этой константой $C_v=0.56$.

Небольшое количество функций, параметров и констант, описывающих процесс выноса почвенных агрегатов в ходе эрозии почвы, делает возможным стохастическое моделирование этого процесса на основе данных только об осредненных характеристиках выноса наносов. Если известен объем смыва с некоторого эрозионного участка, время, за которое произошел смыв и гранулометрический состав смытых наносов, то становится возможным восстановить (в вероятностном смысле) процесс поступления наносов в замыкающий створ эрозионного участка. По гранулометрическому составу (гистограмме) размеров агрегатов определяется средний диаметр смытых агрегатов. По объему смыва и гранулометрическому составу агрегатов определяется число смытых агрегатов, а по общей продолжительности смыва и числу агрегатов – средняя длина интервала времени между двумя последующими агрегатами. Это дает возможность построить кривые распределения длин интервалов и размеров агрегатов. Независимые вероятности (от нуля до единицы) появления интервала времени данной длины и агрегата данного размера моделируются с помощью датчика случайных чисел, а соответствующие этим вероятностям длины интервалов и размеры частиц вычисляются с помощью кумулятивных кривых распределения (экспоненциальной и логнормальной соответственно). Каждая пара чисел дает длину ступеньки и величину скачка сложного пуассоновского процесса.

При определенных условиях пуассоновский процесс появляется в результате суммирования большого количества независимых медленных случайных процессов самого разного вида. На каждом небольшом участке эрозионной площадки происходит взаимодействие потока и подстилающего грунта, их свойства неким случайным образом изменяются во времени и пространстве. Когда в ходе этих изменений локальная и актуальная размывающая способность потока превосходит локальную и актуальную устойчивость почвы к размыву, происходит отрыв почвенного агрегата. Этот случайный процесс будет характеризоваться последовательностью интервалов времени между отрывом агрегатов, не обязательно пуассоновского вида. Однако суммирование таких независимых последовательностей с разных участков эрозионной площадки дает наблюдаемый пуассоновский процесс, который уже не несет информации о каждой локальной последовательности отрыва агрегатов. Более точное

определение минимального размера площади осреднения для появления пуассоновского процесса требует дополнительных исследований. В описанном случае как площадь осреднения 7.3 м^2 (длинная площадка), так и 1.5 м^2 (короткая площадка) привели к сложному пуассоновскому процессу транспорта почвенных агрегатов, так что для появления этого процесса не требуется большой площади осреднения. По данным [3], в инженерных приложениях пуассоновский процесс появляется уже при суммировании 5-7 случайных последовательностей.

Из вышесказанного можно сделать следующие выводы:

1) Транспорт почвенных агрегатов в конце эрозионной площадки представляет собой сложный пуассоновский случайный процесс.

2) При определенных условиях пуассоновский процесс транспорта агрегатов появляется в результате суммирования независимых медленных локальных случайных процессов эрозии самого разного вида.

3) Это свидетельствует о независимости (или о слабой взаимосвязи) вероятностных характеристик транспорта наносов и вероятностных характеристик эрозии. Исследование стохастических свойств собственно эрозионного процесса требует существенной локализации наблюдений.

4) Небольшой размер площади осреднения для формирования пуассоновского процесса делает этот тип процесса преобладающим для транспорта почвенных агрегатов при относительно малых средних темпах эрозии ($0.01-0.02 \text{ г/с с метра квадратного}$).

5) Это создает основу для стохастического моделирования транспорта почвенных агрегатов. Процесс характеризуется малым числом параметров, что делает легко воспроизводимыми (в статистическом смысле) детали транспорта смытых в результате эрозии почвенных агрегатов.

Благодарности

Это исследование финансировалось грантом LCR-203 фонда им. Марседена (королевское научное общество Новой Зеландии). Организация эксперимента обсуждалась с В. Никорой. В эксперименте принимали участие Й. Шмидт, Г. Купер, Х. Войт, С. Шимчак. Лабораторные анализы выполнены Д. Дандо.

Список литературы

1. *Большев Л.Н., Смирнов Н.В.* Таблицы математической статистики. М.: Наука. 1983. 416 с.
2. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв и грунтов. М.: Высшая школа. 1973. 399 с.
3. *Вентцель Е.С., Овчаров А.А.* Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. М.: Наука. 1991. 383 с.
4. *Гуссак В.Б.* Изучение процессов смыва и эрозии в лотке. // Почвоведение. 1945. №7. С. 12-18.
5. *Гуссак В.Б.* Некоторые наблюдения над эрозией почв в пограничном слое с помощью микрокиносъемки. // Почвоведение. 1948. №1. С. 32-43.
6. *Евстигнеев В.М.* Речной сток и гидрологические расчеты. М.: Изд-во МГУ. 1990. 304 с.
7. *Маккавеев Н.И.* Гидравлическая типизация эрозионного процесса. В кн.: Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 3. М.: Изд-во МГУ. 1973. С. 65-77.
8. *Михайлова Н.А.* Перенос твердых частиц турбулентными потоками воды. Л.: Гидрометеиздат. 1966. 228 с.
9. *Сидорчук А.Ю.* Скорость разрушения транспортируемых потоком почвенных агрегатов. В кн.: XXI Пленарное межвузовское совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. Чебоксары: Изд-во ЧГУ. 2006. С. 190-192.
10. *Сидорчук А.Ю.* Расчет интенсивности эрозии почв и связных грунтов. // Почвоведение. 2001. № 8. С.1001-1008.
11. *Фидман Б.А.* Турбулентность водных потоков. Л.: Гидрометеиздат. 1991. 239 с.
12. *Швебс Г.И.* Формирование водной эрозии стока наносов и их оценка. Л.: Гидрометеиздат. 1974. 184 с.
13. *Gardner W.R.* Representation of soil aggregate-size distribution by a logarithmic-normal distribution. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 1956. V. 20. P. 151-153
14. *Emmett W.W.* The Hydraulics of Overland Flow on Hillslopes. US Geological Survey Professional Paper 662-A. Washington: USGS. 1970. 46 p.
15. *Hewitt A.E.* New Zealand Soil Classification. Landcare Research Science Series 1. Lincoln: Manaaki Whenua Press. 1998. 124 p.
16. *King L. C.* Canons of landscape evolution: Geol. Soc. America Bull. 1953. V. 64. P. 721-752.

17. *Lawrence D.S.L.* Hydraulic resistance in overland flow during partial and marginal surface inundation: Experimental observations and modelling. *Water Resources Research*. 2000. V. 36. P. 2381-2393.
18. *Nearing M.A.* A probabilistic model of soil detachment by shallow flow. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*. 1991. V. 34. P. 81–85.
19. *Nearing, M.A., Parker S.C.* Detachment of soil by flowing water under turbulent and laminar conditions. *Soil Science Society of America Journal*. 1994. V. 58. P. 1612-1614.
20. *Nearing M.A., Norton L.D., Bulgakov D.A., Larionov G.A., West, L.T., Dontsova K.* Hydraulics and erosion in eroding rills. *Water Resources Research*. 1997. V. 33, P. 865–876.
21. *Perfect E., Kay B.D., Ferguson J.A., da Silva A.P., Denholm K.A.* Comparison of functions for characterizing the dry aggregate size distribution of tilled soil. *Soil and Tillage Research*. 1993. V. 28. P. 123-139.
22. *Sidorchuk A.* Stochastic modelling of erosion and deposition in cohesive soils. *Hydrological Processes*. 2005. V. 19. P. 1399–1417
23. *Yoder, R.E.* A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *Journal of American Society of Agronomy*. 1936. V. 28. P. 337-351.
24. *Wilson B.N.* Development of fundamentally based detachment model. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*. 1993. V. 36. P. 1105–1114.