



УДК 551.3.053

DOI 10.52575/2712-7443-2024-48-4-515-525

Динамика кривых распределения крупности продуктов склонового смыва в результате водной эрозии

¹Шмакова М.В., ²Турутина Т.В., ³Лобанов Г.В.

¹Институт озерадения Российской академии наук – обособленное структурное подразделение ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук»,

Россия, 196105, Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, 9

²Государственный гидрологический институт

Россия, 199004, Санкт-Петербург, 2-я линия В. О., 23

³Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского

Россия, 241036, г. Брянск, ул. Бежицкая, 14

E-mail: m-shmakova@yandex.ru, turutina.tatyana@yandex.ru, lobanov_grigorii@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена проблеме интерпретации результатов анализа гранулометрического состава намывного материала. Проблема рассматривается в рамках построения теоретической модели перемещения наносов поверхностным стоком. Исследование построено на сравнении гранулометрического состава наносов, сформированных методом натурального эксперимента на пробной площадке, и материала на склоне в естественном состоянии, на котором проявляется только поверхностный сток. Показано, что в условиях натурального эксперимента на площадке, сложенной песчаным материалом, доля более крупных фракций возрастает к подножию. На склоне сложного строения в естественном состоянии выраженных закономерностей в изменении гранулометрического состава отложений не наблюдается. Предполагается, что закономерности распределения фракций делювия, характерные для склонов однородного состава, сглаживаются поступлением элювиального материала неодинакового по составу и устойчивости к размыву.

Ключевые слова: почвенная эрозия, гранулометрия, эксперимент, склон, дождевание, почвогрунты

Для цитирования: Шмакова М.В., Турутина Т.В., Лобанов Г.В. 2024. Динамика кривых распределения крупности продуктов склонового смыва в результате водной эрозии. Региональные геосистемы, 48(4): 515–525. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-4-515-525

Dynamics of Various Size Particle Distribution in Slope Washout Products

¹Marina V. Shmakova, ²Tatyana V. Turutina, ³Grigory V. Lobanov

¹ Institute of Limnology RAS Separate Structural Subdivision of the Federal State Budgetary Institution of Science "St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences"

9 Sevastyanov St, St. Petersburg 196105, Russia

²State Hydrological Institute of Russia

23 2nd line V.O., St. Petersburg 199004, Russia

³Bryansk State University named after Academician I.G. Petrovsky of Russia

14 Bezhitskaya St, Bryansk 241036, Russia

E-mail: m-shmakova@yandex.ru, turutina.tatyana@yandex.ru, lobanov_grigorii@mail.ru

Abstract. The article interprets the results of the analysis of soil washout product granulometric composition. The problem is considered within the framework of constructing a theoretical model of sediment movement by surface runoff. During the study, the granulometric composition of sediments formed by the method of full-scale experiment at the test site was compared to that of the material on the



slope in its natural state, which shows surface runoff only. It is shown that in the conditions of a full-scale experiment, on a site composed of sandy material, the proportion of larger fractions increases towards the bottom. On the slope of a complex structure in its natural state, there are no pronounced patterns in the change in the granulometric composition of sediments. It is assumed that deluvium fraction distribution patterns that are characteristic of slopes with a homogeneous composition are smoothed by the arrival of eluvial material which is heterogeneous in terms of composition and erosion resistance.

Keywords: soil erosion, granulometry, experiment, slope, sprinkling, soils, ground

For citation: Shmakova M.V., Turutina T.V., Lobanov G.V. 2024. Dynamics of Various Size Particle Distribution in Slope Washout Products. *Regional Geosystems*, 48(4): 515–525. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-4-515-525

Введение

Изучение механизмов почвенной эрозии остается актуальной научной проблемой и в настоящее время, несмотря на значительные исследовательские усилия. Количество актуальных публикаций, посвященных разным аспектам почвенной эрозии, достигает нескольких тысяч [Batista et al., 2019; Borelli et al., 2021]. Интерес к теме поддерживается неоднозначными, иногда противоречивыми результатами экспериментального изучения почвенной эрозии в разных географических условиях [Zhang et al., 2020]. В частности, для объяснения существенных различий в соотношении фракций смытого материала, обнаруженных натурными экспериментами, предлагаются корректировки теоретических моделей перемещения частиц водным потоком на склоне [Asadi, 1999; 2011]. Суть корректировок сводится к сочетанию в моделях разных механизмов перемещения частиц, удовлетворительно объясняющих гранулометрический состав наносов [Hairsine et al., 1999; Issa et al., 2006; Rienzi et al., 2013]. Соотношение фракций смытого материала, который формируется в большинстве натурных экспериментов, принимается зависимым от многих факторов, среди которых выделяются четыре – интенсивность осадков, уклон, гранулометрический состав не эродированного грунта (последний полагается постоянным по линии стока) и время воздействия [Lin et al., 2017; Kinnell, 2020]. Изменение гранулометрического состава размываемого грунта по длине склона редко встречается на сельхозугодьях, но весьма часто на склонах долин рек, что немаловажно учитывать при использовании состава наносов для оценки интенсивности эрозии.

Ввиду большой изменчивости характеристик подстилающей поверхности и ландшафтных неоднородностей при моделировании почвенной эрозии целесообразно остановиться на общих закономерностях этого процесса. К основным показателям почвенной эрозии относятся интенсивность и объемы смыва почвогрунтов, изменения уровня эродируемых земель, развития новых ландшафтных форм, формирование конусов выноса и пр. При этом механизмы водной почвенной эрозии, помимо прочего, предполагают и изменение состава вымываемых частиц грунта от верхних элементов ландшафта к подножиям склонов, а именно изменение крупности продуктов смыва. Как правило, отмечается постепенное увеличение процента содержания мелких частиц по направлению уменьшения уклона [Маккавеев, 1955]. При этом при равномерном уклоне вклад крупных частиц будет увеличиваться к подножию склона, а доля мелких фракций, наоборот, уменьшаться. Последнее объясняется увеличением мощности склонового потока по направлению уклона, и, как следствие, увеличением транспортирующего потенциала потока. В результате этого в смыв вовлекаются более крупные фракции, вклад которых уменьшает процентное содержание мелких частиц.

Целью настоящей работы является оценка динамики крупности продуктов смыва на малонарушенных склонах. В процессе выполнения работы были решены следующие задачи: 1) постановка эксперимента по инициации процессов водной эрозии на лесном

склоне в результате дождевания последнего (Ленинградская область) и анализ полученных результатов; 2) анализ гранулометрического состава отложений по направлению поверхностного стока на склоне безымянной балки, пересекающей правый склон долины р. Десны в центральной части г. Брянска.

Практика стоковых экспериментальных площадок

Эксперименты, проводимые на специально оборудованных стоковых площадках, позволяют оценить характеристики водного и твердого стока в заданных условиях формирования такового. Стоковые площадки представляют собой изолированные участки склона, оборудованные измерительными устройствами для количественной оценки воды и твердого вещества с этих площадок [Караушев, 1977]. Одни из первых стоковых площадок для наблюдения за стоком и эрозией почвы были оборудованы С.И. Небольсиным в 1922 году на базе Московской агрометеорологической станции [Небольсин, 1937] и А.С. Козменко в 1923 году на Новосильской опытно-овражной станции [Козменко, 1937]. Первыми основными качественными выводами по результатам наблюдения за водной эрозией на экспериментальных склонах явились следующие положения:

- 1) развитие современной эрозии обусловлено преимущественно сельскохозяйственной деятельностью человека;
- 2) растительность на водосборе в значительной степени уменьшает интенсивность эрозионного процесса.

На основании многочисленных опытов Т.Н. Neal в 1938 году получена эмпирическая зависимость смыва почвы W , т/га от средней интенсивности осадков m , мм/мин и средней крутизны склона i_0 , б/р [Neal, 1938]:

$$W = A \cdot M \cdot i_0^{0.8} \cdot m^{1.2},$$

где A – коэффициент, учитывающий водно-эрозионные факторы; M – слой осадков, мм.

Позже были получены зависимости коэффициента стока от объемов выноса твердого материала в зависимости от характеристик склона, слагающих его почвогрунтов и интенсивности дождевания и снеготаяния [Лопатин, 1952].

В 1975 году Государственным гидрологическим институтом и Всесоюзным научно-исследовательским институтом земледелия и защиты почв от эрозии были разработаны «Методические рекомендации по учету поверхностного стока и смыва при изучении водной эрозии»¹ для натуральных измерений смыва в условиях стационарных наблюдений на специализированных станциях [Заславский, 1977]. Эти рекомендации предусматривают требования к размерам стоковых площадок и их ландшафтной и почвенно-растительной однородности. Наиболее репрезентативной при этом полагается длина стоковой площадки свыше 100 м, поскольку незначительная протяженность экспериментального склона не отражает все закономерности протекания процессов водной эрозии в реальных условиях². Вопросы критериев подобия физических моделей эрозии почв и обзор основных моделей ее оценки приведены, например, в работах [Ларионов, 1993; Бастраков, 2010; Лисецкий и др., 2012].

Одной из основных характеристик процесса водной эрозии, изучаемых на экспериментальных стоковых площадках, является оценка противозэрозионной устойчивости разных типов почв, определяемая через объем твердого склонового стока. Противозэрозионная устойчивость ставится в зависимость от крутизны и экспозиции склона, состава и состояния почвогрунтов. При этом изучение динамики крупности смываемых частиц от вершины к подножию склона не нашло своего распространения в практике изучения процессов почвенного смыва на стоковых площадках.

¹ Методические рекомендации по учету поверхностного стока и смыва почвы при изучении водной эрозии. 1975. Всесоюзный научно-исследовательский институт защиты почв от эрозии, Государственный гидрологический институт. Л., Гидрометеиздат, 88 с.

² Заславский М.Н. 1983. Эрозиоведение. М., Высшая школа, 320 с.

Объекты и методы исследования

Исследование гранулометрического состава продуктов смыва с лесного склона и отложений на склоне по направлению поверхностного смыва осуществлялось на двух полигонах, расположенных в Ленинградской области и в г. Брянске, соответственно.

Распределение гранулометрического состава продуктов смыва на лесном склоне. В мае 2023 года сотрудниками Института озероведения РАН и Государственного гидрологического института был проведен полевой эксперимент по воспроизведению процессов почвенной эрозии на лесном склоне в поселке Ильичёво Ленинградской области. Целью данного эксперимента явился анализ динамики распределения крупности продуктов смыва в зависимости от удаленности от вершины склона.

Почвы исследуемого региона расположены на песчанике и имеют незначительную мощность 10–20 см. Экспериментальная площадка находится в южной части Карельского перешейка, на северном склоне котловины Большого Симагинского озера. Озеро остаточного происхождения, проточное; площадь зеркала – 2,71 км². Входит в озерно-речную систему, дренирующую южную часть Карельского перешейка. Котловина сформирована водной эрозией осадков первого Балтийского ледникового озера (пески, алевролиты, илы). Северный склон котловины сложен разнородными, преимущественно крупнозернистыми озерно-ледниковыми песками. Склон, на котором заложена экспериментальная площадка, – вогнутый, невысокий (7,5 м), средней крутизны, юго-западной экспозиции. Почвы экспериментальной площади – подзолистые иллювиально-железистые. Преобладающий тип растительности – сосняки-зеленомошники. Растительный покров представлен характерными для Северо-Запада РФ разными видами мхов, брусничником, сосняком. Для проведения эксперимента был выбран десятиметровый участок склона с уклоном 25° и шириной 1 м. На расстоянии десяти метров от подножия склона была установлена дождевальная станция с расходом воды $3 \cdot 10^{-4}$ м³/с. Дождевальная станция равномерно орошала весь экспериментальный участок в течение двух часов (рис. 1а). Вдоль склона по линиям стекания через 1 м были диагонально поставлены приемники продуктов смыва так, чтобы верхние приемники не перекрывали дождевой поток для нижерасположенных. В общей сложности было установлено 9 приемников продуктов смыва (рис. 1б). До начала эксперимента на верхнем участке склона были взяты пробы почвогрунтов. Предварительно участок дождевания был без повреждения почвенного покрова расчищен от листового опада, шишек и хвой. В процессе дождевания в силу особенностей микрорельефа были сформированы два микроручейковых потока – от вершины склона до четвертого пункта отбора проб включительно и с шестого пункта отбора проб до девятого. Продукты смыва, поступившие в приемники, были проанализированы на гранулометрический состав в Лаборатории наносов ГГИ комбинированным методом сита–пипетка–фракциометр на наборе лабораторных сит с размером ячеек от 1,0 до 10,0 мм, пипеточной установке ПИ-22 и фракциометре ГР-82, соответственно.

Распределение гранулометрического состава отложений по направлению поверхностного стока исследовано на склоне безымянной балки, пересекающей правый склон долины р. Десны в центральной части г. Брянска (урочище «Соловьи»).

Особенности геологического строения и рельефа в местах отбора проб типичны для протяженной полосы правобережья р. Десны выше и ниже г. Брянска (около 20 км). Правый склон на этом отрезке долины – прямой, средней крутизны (15–20°), высотой 45–50 м; плавно (без выраженной бровки) переходящий в наклонную водораздельную поверхность и неширокую правобережную пойму. Склон пересечен многочисленными широкими и короткими балками с вогнутым днищем. В геологическом строении правого склона долины р. Десны участвуют 3 толщи.

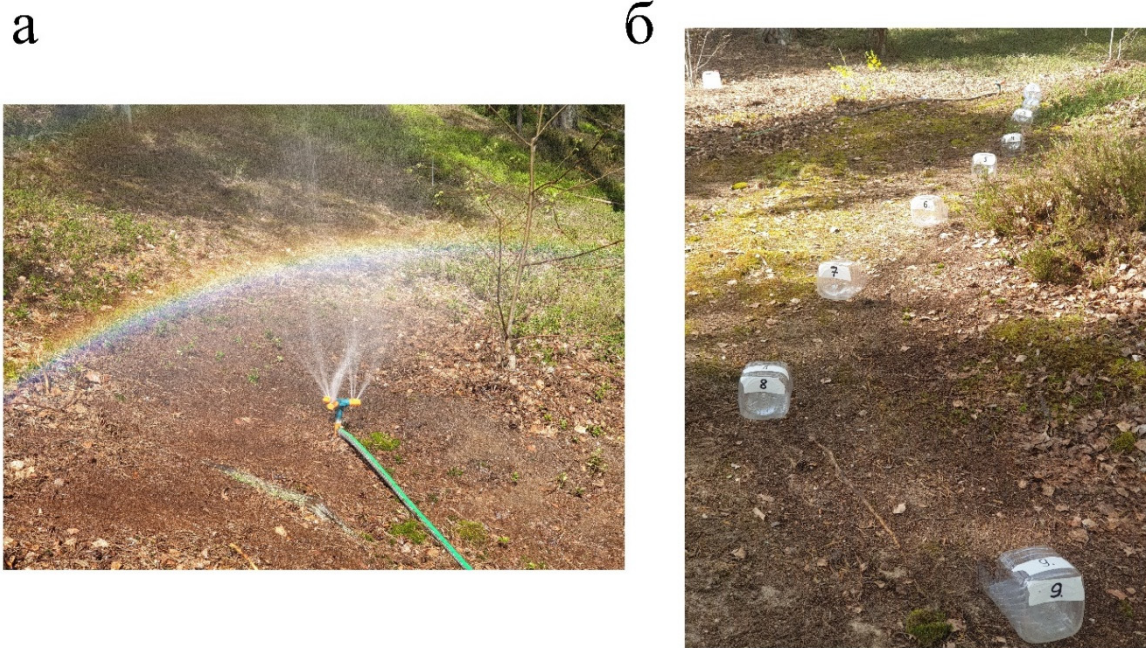


Рис. 1. Фотографии экспериментального склона
Fig. 1. Photos of the experimental slope

Сверху склон сложен легкими пылеватыми и песчанистыми элювиальными суглинками; в средней части – полускальными карбонатными грунтами (мергели и мел) верхнего мела с примесью опоки и трепела; в нижней части – мелкими песками и супесями. Коренные породы покрыты слоем элювиально-делювиальных отложений, мощность которых увеличивается к основанию склона.

Отбор проб выполнен в средней части безымянной балки, на левом склоне. Форма склона в профиле – вогнутая, в плане – прямая; высота – 24 м, уклон – 30°. Верхняя часть склона сложена легкими суглинками с примесью песчаного материала; средняя и нижняя – мергелем и мелом. В меловой толще, кроме того, встречаются примеси опоки, трепела и песка («песчаный мел»). Элювиально-делювиальные отложения суглинистого состава с примесью дресвы и щебня полускальных пород. Склон покрыт маломощным слоем дерново-подзолистых смытых почв. Растительный покров места отбора проб и окружающей территории – лиственный лес с сомкнутостью крон 60 %, в составе древостоя преобладают осина и клен американский, реже встречается липа. Уход за лесом происходит редко, склоны и днище балки покрыты упавшими стволами и опадом. Урочище используется как зона отдыха (городской лесопарк); склоны пересечены пешеходными и велосипедными тропами. В частности, на высоте 12,5 м от подножья поперек склона проложена тропа шириной до 2 м. Движение потока наносов по склону частично прерывается тропой, которая выступает в данном случае локальным механическим барьером. Граница между толщей легких суглинков и карбонатных пород проходит в 4–5 м выше тропы. На большей глубине в нижней части склона начинается плотный элювий карбонатных пород, сложенный преимущественно выветрелым, а не принесенным материалом.

Пробы склоновых отложений отобраны с глубины до 0,2 м и проанализированы на гранулометрический состав в Испытательной лаборатории ФГБОУ ВО Брянского ГАУ комбинированным методом сита–пипетка–ареометр на наборе лабораторных сит с размером ячеек от 1,0 до 10,0 мм, пипеточной установке ПИ–22 и ареометре АГ, соответственно.

Результаты и их обсуждение

Распределение гранулометрического состава продуктов смыва на лесном склоне.
 Результаты гранулометрического анализа продуктов смыва на вершине склона (точка 0) и продуктов смыва приведены в табл. 1 и на рис. 2. Как следует из рис. 2, вклад фракций крупности до 0,001 мм уменьшается вниз по склону. Тогда как вклад частиц крупностью выше 0,1 мм, наоборот, увеличивается к подножию склона. На рис. 3 (а) приведена зависимость вклада частиц крупностью 0,0005 мм, 0,001 мм и 0,5 мм для двух микроручейковых потоков от расстояния от вершины склона.

Поле точек на рис. 3 (а) хорошо аппроксимируется степенными и линейными функциями. Зависимость обеспеченности крупности частиц больших диапазонов (рис. 3 (б)) также имеет выраженный тренд. Для девятого пункта пробоотбора точка на рис. 3 (б) не нанесена на график, поскольку основной вклад в кривую гранулометрического состава привнесли частицы крупностью более 0,5 мм.

Таблица 1
 Table 1

Обеспеченность крупности частиц смытого в результате дождевания грунта, %
 Share of particles of various sizes in the soil washed away as a result of sprinkling, %

d , мм	Номера пунктов пробоотбора									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0001	–	9,7	6,0	0,5	0,1	–	–	–	–	–
0,0005	1,1	16,0	14,2	5,7	1,2	5,9	22,8	7,9	8,0	0,5
0,001	3,4	86,5	25,2	5,9	2,3	10,4	53,1	35,5	23,8	2,2
0,005	15,2	88,5	89,0	49,8	98,1	14,7	72,4	81,7	97,9	10,1
0,1	16,0	89,8	89,6	79,3	98,5	16,0	76,1	82,7	98,6	10,6
0,2	18,2	94,7	93,4	96,1	99,1	21,6	79,3	84,6	98,7	12,6
0,5	19,8	95,8	96,2	99,7	99,5	29,0	84,5	87,2	99,0	20,7
1	70,0	100	100	100	100	79,3	100	100	100	54,0
2	89,5	–	–	–	–	79,3	–	–	–	84,9
5	95,0	–	–	–	–	100	–	–	–	100
10	96,9	–	–	–	–	–	–	–	–	–
20	100	–	–	–	–	–	–	–	–	–

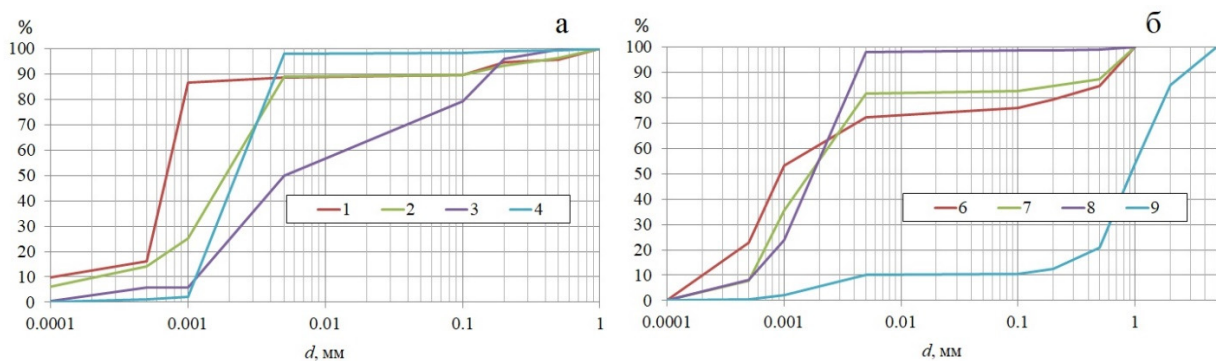


Рис. 2. Кривые распределения гранулометрического состава на пунктах отбора проб 1–4 (а) и на пунктах отбора проб 6–9 (б)
 Fig. 2. Distribution curves of the granulometric composition at sampling points 1–4 (a) and at sampling points 6–9 (b)

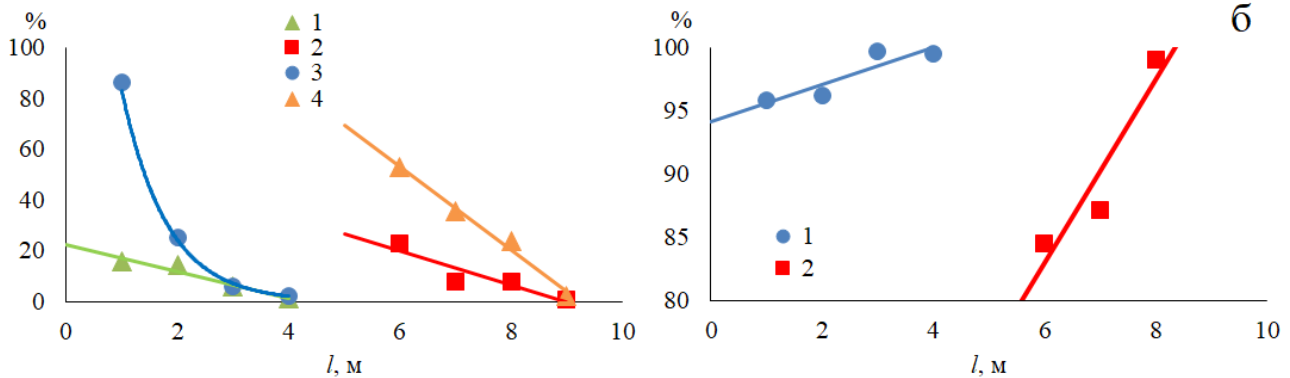


Рис. 3. Зависимость обеспеченности продуктов смыва крупностью 0,0005 мм (1 и 3) и 0,001 мм (2 и 4) (а) и крупностью 0,5 мм (б) от расстояния от вершины склона l , м
Fig. 3. Dependence of the presence of washout products with a size of 0.0005 mm (1 and 3) and 0.001 mm (2 and 4) (a), and a size of 0.5 mm (b), on the distance from the top of the slope l , m

Результаты эксперимента подтверждают теоретически обоснованные закономерности распределения крупности частиц – доля частиц крупностью до 0,001 мм в продуктах выноса уменьшается от вершины к подножию склона, тогда как доля частиц крупностью от 0,1 мм увеличивается. При этом в средней части гранулометрической кривой выраженных закономерностей динамики вклада крупности отдельных частиц по длине склона не наблюдается.

Распределение гранулометрического состава отложений (урочище «Соловьи»). Всего получено 6 проб (по 3 выше и ниже тропы); соответственно 2 с части склона, сложенной суглинками, 4 – с части, сложенной карбонатами. Процентное соотношение фракций приведено в табл. 2, нумерация точек пробоотбора начинается от вершины склона.

Таблица 2
Table 2

Обеспеченность крупности частиц на склоне безымянной балки, %
Share of particles of various sizes on the slope of an unnamed gulch, %

d , мм	Номера пунктов пробоотбора					
	1	2	3	4	5	6
< 0,002	40,5	42,5	40,8	45,5	45,1	42,1
0,002–0,01	41,6	48,4	47,2	47,7	48	50
0,01–0,05	48,1	63,5	59,1	54	50,9	57,9
0,05–0,1	95,1	93,3	85,5	86	62,9	84,2
0,1–0,25	99,3	97,9	94,4	94,5	66,7	92
0,25–0,5	99,7	98,6	98,2	97,5	90,2	93,6
0,5–1	99,8	98,8	98,6	100	99,7	94,4
1–2	99,9	99,6	99,5	–	99,8	94,5
2–5	100	99,8	99,7	–	99,9	94,7
5–10	–	100	100	–	100	95,5
> 10	–	–	–	–	–	100



Различия гранулометрического состава склоновых отложений проявляются как между отдельными пробами, так и между разными частями склона – верхней и нижней, сложенной суглинками и сложенной карбонатами. Причиной различий выступают в разных случаях как особенности состава пород, подстилающих склоновые отложения, так и закономерности перемещения наносов и выветрелого материала.

Доля грубых обломков в пробах составляет обычно менее 0,5 %, только в одной пробе – у основания склона существенно возрастает – до 5,5 %. По-видимому, источник грубых обломков – поступление трудноразмокаемых продуктов выветривания из части карбонатной толщи, отличающейся большей долей кремнеземистого материала.

Доля песчаного элемента в пробах грунта колеблется от 36,6 до 51,8 %, преобладают мелкие и тонкие фракции. В распределении элемента есть два слабо выраженных максимума, обусловленных составом пород в естественном сложении. Первый максимум в верхней части склона (доля элемента – 51,8 %) обусловлен значительной долей тонкопесчаной фракции в легких суглинках, подстилающих склоновые отложения. Второй максимум (доля песчаного элемента – 49 %) в нижней части склона обусловлен поступлением в толщу склоновых отложений продуктов выветривания песчаного мела. На источник материала указывает также разнообразный состав фракций песчаного элемента – от крупной до тонкой, свойственный песчаному мелу.

Доля пылеватых частиц в делювии – наименее постоянная (от 5,8 % до 21 %). Выражено два максимума – в средней (18–20 %) и нижней (15,8 %) частях склона. Формирование максимумов объясняется, вероятно, перераспределением легко размываемых пылеватых частиц в результате размыва пород, слагающих склон и продуктов их выветривания. Увеличение доли пылеватых частиц объясняется их приносом сверху, а заметное сокращение в средней части склона – перехватом тропой потока наносов. Примечательно, в склоновых отложениях над карбонатными породами в верхней части склона (выше тропы) доля пылевой фракции больше, чем над аналогичными отложениями в нижней части склона. Этот факт указывает на поступление части пылеватых частиц с перемещением материала вниз по склону.

Доля глинистых частиц мало изменяется вниз по склону от 40,5 до 45,1 %. Несколько увеличивается их доля в нижней части склона, сложенной карбонатными породами.

Для объяснения различий гранулометрического состава склоновых отложений могут быть предложены следующие гипотезы:

1. Состав толщи элювиально-делювиальных отложений сильно зависит от подстилающих пород. Поступление разных продуктов выветривания формирует локальные максимумы в распределении отдельных фракций.

2. Закономерность увеличения доли крупных фракций книзу склона выражена слабее. Напротив, заметно выражено увеличение доли пылеватых частиц в пробах вниз по склону, вследствие их большей подвижности. Меньшая устойчивость пылеватых частиц к смыву определяется (при прочих равных условиях) большей массой песчаных частиц и высоким сцеплением глинистых.

Заключение

Результаты анализа гранулометрического состава продуктов смыва при дождевании лесного склона (Ленинградская область) и отложений на склоне безымянной балки (г. Брянск) показали, что при сравнительно однородном литологическом составе грунтов размываемой склоновой поверхности, распределение крупности склоновых отложений отражает теоретические обоснованные закономерности – увеличение доли крупных фракций к подножию. При этом при значительных различиях литологического состава грунтов (нередко характерных для склонов в естественном сложении), изменения гранулометрического состава склоновых отложений от вершины к подножию

не объясняются исключительно увеличением силы потока. Наиболее вероятными причинами, объясняющими распределение гранулометрического состава отложений на склонах сложного литологического строения, являются разный состав и неодинаковая подвижность продуктов выветривания.

Список литературы

- Бастраков Г.В. 2010. Теоретическое обоснование физических моделей эрозии почв и горных пород. В кн.: Эрозионные и русловые процессы. Под ред. Р.С. Чалова. М., Географический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова: 80–101.
- Заславский М.Н. 1977. Эрозионно опасные земли на территории СССР. Почвоведение, 8: 100–105.
- Караушев А.В. 1977. Теория и методы расчета речных наносов. Л., Гидрометеиздат, 272 с.
- Козменко А.С. 1937. Борьба с эрозией почв. М., Л., Издательство Всесоюзной академии сельскохозяйственных наук им. В.И. Ленина, 92 с.
- Ларионов Г.А. 1993. Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. Москва, Изд-во МГУ, 198 с.
- Лисецкий Ф. Н., Черный С.Г., Светличный А.А. 2012. Современные проблемы эрозиоведения. Белгород, Константа, 456 с. <https://doi.org/10.13140/2.1.1029.9682>.
- Лопатин Г.В. 1952. Наносы рек СССР. М., Географгиз, 363 с.
- Маккавеев Н.И. 1955. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М., АН СССР, 346 с.
- Небольсин С.И. 1937. Элементарный поверхностный сток. Л., М., Гидрометеорологическое издательство, 41 с.
- Asadi H., Ghadiri H., Rose C.W., Yu B., Hussein J. 1999. An Investigation of Flow-Driven Soil Erosion Processes at Low Streampowers. *Journal of Hydrology*, 342(1–2): 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.05.019>
- Asadi H., Moussavi A., Ghadiri H., Rose C.W. 2011. Flow-Driven Soil Erosion Processes and the Size Selectivity of Sediment. *Journal of Hydrology*, 406(1–2): 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.06.010>
- Batista P.V.G., Davies J., Silva M.L.N., Quinton J.N. 2019. On the Evaluation of Soil Erosion Models: Are We Doing Enough? *Earth-Science Reviews*, 197: 102898. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102898>
- Borrelli P., Alewell Ch., Alvarez P., Anache J.A.A., Baartman J., Ballabio C., Bezak N., Biddoccu M., Cerdà A., Chalise D., Chen S., Chen W., De Girolamo A.M., Gessesse G.D., Deumlich D., Diodato N., Efthimiou N., Erpul G., Fiener P., Freppaz M., Gentile F., Gericke A., Haregeweyn N., Hu B., Jeanneau A., Kaffas K., Kiani-Harchegani M., Villuendas I.L., Li Ch., Lombardo L., López-Vicente M., Lucas-Borja M.E., Märker M., Matthews F., Miao Ch., Mikoš M., Modugno S., Möller M., Naipal V., Nearing M., Owusu S., Panday D., Patault E., Patriche C.V., Poggio L., Portes R., Quijano L., Rahdari M.R., Renima M., Ricci G.F., Rodrigo-Comino J., Saia S., Samani A.N., Schillaci C., Syrris V., Kim H.S., Spinola D.N., Oliveira P.T., Teng H., Thapa R., Vantas K., Vieira D., Yang J.E., Yin Sh., Zema D.A., Zhao G., Panagos P. 2021. Soil Erosion Modelling: A Global Review and Statistical Analysis. *Science of the Total Environment*, 780: 146494. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494>
- Hairsine P.B., Sander G.C., Rose C.W., Parlange J.-Y., Hogarth W.L., Lisle I., Rouhipour H. 1999. Unsteady Soil Erosion Due to Rainfall Impact: a Model of Sediment Sorting on the Hillslope. *Journal of Hydrology*, 220(3–4): 115–128. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00068-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00068-2)
- Issa O.M., Bissonnais Y.L., Planchon O., Favis-Mortlock D., Silvera N., Wainwright J. 2006. Soil Detachment and Transport on Field- and Laboratory-Scale Interrill Areas: Erosion Processes and the Size-Selectivity of Eroded Sediment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31 (8): 929–939.
- Kinnell P.I.A. 2020. The Influence of Time and Other Factors on Soil Loss Produced by Rain-Impacted Flow Under Artificial Rainfall. *Journal of Hydrology*, 587: 125004. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125004>
- Lin J., Huang Y., Zhao G., Jiang F., Wang M.-K., Ge H. 2017. Flow-Driven Soil Erosion Processes and the Size Selectivity of Eroded Sediment on Steep Slopes Using Colluvial Deposits in a Permanent Gully. *Catena*, 157: 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.05.015>



- Neal T.H. 1938. Effect of Degree of Slope and Rainfall Characteristics on Runoff and Soil Erosion. *Agricultural Engineering Research Bulletin*, 280: 45 p.
- Rienzi E.A., Fox J.F., Grove J.H., Matocha C.J. 2013. Interrill Erosion in Soils with Different Land Uses: The Kinetic Energy Wetting Effect on Temporal Particle Size Distribution. *Catena*, 107: 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.02.007>
- Zhang P., Yao W., Liu G., Xiao P., Sun W. 2020. Experimental Study of Sediment Transport Processes and Size Selectivity of Eroded Sediment on Steep Pisha Sandstone Slopes. *Geomorphology*, 363: 107211. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107211>

References

- Bastrakov G.V. 2010. Teoreticheskoe obosnovanie fizicheskikh modelei erozii pochv i gornikh porod [Theoretical Substantiation of Physical Models of Soil and Rock Erosion]. In: *Eroziionnie i ruslovie protsessi [Erosion and Riverbed Processes]*. Ed. by R.S. Chalov. Moscow, Publ. Geograficheskii fakultet Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta im. M.V. Lomonosova: 80–101.
- Zaslavsky M.N. 1977. Eroziionno opasnie zemli na territorii SSSR [Erosive Lands on the Territory of the USSR]. *Pochvovedenie*, 8: 100–105.
- Karashev A.V. 1977. Teoriya i metodi rascheta rechnikh nanosov [Theory and Methods of Calculating River Sediments]. Leningrad, Publ. Hydrometeoizdat, 272 p.
- Kozmenko A.S. 1937. Borba s eroziiei pochv [The Fight Against Soil Erosion]. Moscow, Leningrad, Publ. Vsesoyuznoi akademii selskokhozyaistvennikh nauk im. V.I. Lenina, 92 p.
- Larionov G.A. 1993. Eroziya i deflyatsiya pochv: osnovnyye zakonomernosti i kolichestvennyye otsenki [Soil Erosion and Deflation: Basic Patterns and Quantitative Estimates]. Moscow, Publ. Moscow State University, 198 p.
- Lisetsky F.N., Chernyi S.G., Svetlichnyi A.A. 2012. Recent Developments in Erosion Science. Belgorod, Publ. Constanta, 456 p. (in Russian). <https://doi.org/10.13140/2.1.1029.9682>.
- Lopatin G.V. 1952. Nanosi rek SSSR [Sediments of the Rivers of the USSR]. Moscow, Publ. Geografiz, 363 p.
- Makkaveev N.I. 1955. Ruslo reki i eroziya v yee basseine [Riverbed and Erosion in Its Basin]. Moscow, Publ. Academy of Sciences of the USSR, 346 p.
- Nebolsin S.I. 1928. Elementarnii poverkhnostnii stok [Elementary Surface Runoff]. Leningrad, Moscow, Publ. Gidrometeorologicheskoe, 41 p.
- Asadi H., Ghadiri H., Rose C.W., Yu B., Hussein J. 1999. An Investigation of Flow-Driven Soil Erosion Processes at Low Streampowers. *Journal of Hydrology*, 342(1–2): 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.05.019>
- Asadi H., Moussavi A., Ghadiri H., Rose C.W. 2011. Flow-Driven Soil Erosion Processes and the Size Selectivity of Sediment. *Journal of Hydrology*, 406(1–2): 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.06.010>
- Batista P.V.G., Davies J., Silva M.L.N., Quinton J.N. 2019. On the Evaluation of Soil Erosion Models: Are We Doing Enough? *Earth-Science Reviews*, 197: 102898. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102898>
- Borrelli P., Alewell Ch., Alvarez P., Anache J.A.A., Baartman J., Ballabio C., Bezak N., Biddoccu M., Cerdà A., Chalise D., Chen S., Chen W., De Girolamo A.M., Gessesse G.D., Deumlich D., Diodato N., Efthimiou N., Erpul G., Fiener P., Freppaz M., Gentile F., Gericke A., Haregeweyn N., Hu B., Jeanneau A., Kaffas K., Kiani-Harchegani M., Villuendas I.L., Li Ch., Lombardo L., López-Vicente M., Lucas-Borja M.E., Märker M., Matthews F., Miao Ch., Mikoš M., Modugno S., Möller M., Naipal V., Nearing M., Owusu S., Panday D., Patault E., Patriche C.V., Poggio L., Portes R., Quijano L., Rahdari M.R., Renima M., Ricci G.F., Rodrigo-Comino J., Saia S., Samani A.N., Schillaci C., Syrris V., Kim H.S., Spinola D.N., Oliveira P.T., Teng H., Thapa R., Vantas K., Vieira D., Yang J.E., Yin Sh., Zema D.A., Zhao G., Panagos P. 2021. Soil Erosion Modelling: A Global Review and Statistical Analysis. *Science of the Total Environment*, 780: 146494. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494>
- Hairsine P.B., Sander G.C., Rose C.W., Parlange J.-Y., Hogarth W.L., Lisle I., Rouhipour H. 1999. Unsteady Soil Erosion Due to Rainfall Impact: a Model of Sediment Sorting on the Hillslope. *Journal of Hydrology*, 220(3–4): 115–128. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00068-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00068-2)

- Issa O.M., Bissonnais Y.L., Planchon O., Favis-Mortlock D., Silvera N., Wainwright J. 2006. Soil Detachment and Transport on Field- and Laboratory-Scale Interrill Areas: Erosion Processes and the Size-Selectivity of Eroded Sediment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(8): 929–939.
- Kinnell P.I.A. 2020. The Influence of Time and Other Factors on Soil Loss Produced by Rain-Impacted Flow Under Artificial Rainfall. *Journal of Hydrology*, 587: 125004. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125004>
- Lin J., Huang Y., Zhao G., Jiang F., Wang M.-K., Ge H. 2017. Flow-Driven Soil Erosion Processes and the Size Selectivity of Eroded Sediment on Steep Slopes Using Colluvial Deposits in a Permanent Gully. *Catena*, 157: 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.05.015>
- Neal T.H. 1938. Effect of Degree of Slope and Rainfall Characteristics on Runoff and Soil Erosion. *Agricultural Engineering. Research Bulletin*, 280: 45 p.
- Rienzi E.A., Fox J.F., Grove J.H., Matocha C.J. 2013. Interrill Erosion in Soils with Different Land Uses: The Kinetic Energy Wetting Effect on Temporal Particle Size Distribution. *Catena*, 107: 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.02.007>
- Zhang P., Yao W., Liu G., Xiao P., Sun W. 2020. Experimental Study of Sediment Transport Processes and Size Selectivity of Eroded Sediment on Steep Pisha Sandstone Slopes. *Geomorphology*, 363: 107211. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107211>

*Поступила в редакцию 27.06.2024;
поступила после рецензирования 28.08.2024;
принята к публикации 18.09.2024*

*Received June 27, 2024;
Revised August 28, 2024;
Accepted September 18, 2024*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шмакова Марина Валентиновна, доктор географических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории математических методов моделирования, Институт озераведения Российской академии наук – обособленное структурное подразделение ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», г. Санкт-Петербург, Россия

Турутина Татьяна Валерьевна, научный сотрудник лаборатории гидрометрических приборов, Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия

Лобанов Григорий Владимирович, кандидат географических наук, доцент кафедры географии, экологии и землеустройства, Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского, г. Брянск, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Marina V. Shmakova, Doctor of Sciences in Geography, Leading Researcher at the Laboratory of Mathematical Modeling Methods, Institute of Limnology RAS Separate Structural Subdivision of the Federal State Budgetary Institution of Science "St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences", St. Petersburg, Russia

Tatyana V. Turutina, Researcher at the Laboratory of Hydrometric Devices, State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

Grigory V. Lobanov, PhD in Geography, Associate Professor of the Department of Geography, Ecology and Land Management, State Educational Institution Bryansk State University named after Academician I.G. Petrovsky, Bryansk, Russia