

КАПЕЛЬНАЯ ЭРОЗИЯ ПОЧВ**М. Ю. Барсукова, Ю. И. Дудкин, Е. Н. Коржов, Д. И. Щеглов***Воронежский государственный университет*

Поступила в редакцию 13.05.2008 г.

Аннотация. При ударах капель дождя различие в дальности полёта мелкозёма в составе брызг и его количественное соотношение в переброски вниз и вверх по склону будут строго зависеть от угла между склоном и его проекцией. С ростом угла склона на каждый градус количество частиц почвы и разность перелёта вниз и вверх будет возрастать.

Ключевые слова: капля, дождь, почва, склон, разбрызгивание, расстояние, вверх и вниз по склону, дальность полёта мелкозёма, количество частиц почвы, траектория полёта, эрозионная устойчивость почв.

Abstract. At impacts of drops of a rain distinction in range of flight мелкозёма in structure of брызг and its quantitative parity in переброски downwards and top on a slope will strictly depend on a corner between a slope and its projection. With growth of a corner of a slope on each degree the quantity of particles of ground and a difference of flight downwards also will increase upwards.

Keywords: drop, a rain, ground, a slope, scattering, distance, upwarde and downhill, range of flight, quantity of particles of ground, a trajectory of flight, stability soil.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Как и многие другие явления природы, жидкие атмосферные осадки в одних случаях могут быть полезными, в других — вредными. В число последних входит и капельная эрозия почв. Именно на разбрызгивание распаханной почвы во время дождей, приводящее к эрозии почв, должны обратить особое внимание специалисты разных областей хозяйства. Вполне очевидно, что капельная эрозия в первую очередь зависит от особенностей местных дождей и многих характеристик конкретных почв. Управлять интенсивностью и длительностью дождей пока не удастся, но приводить в нужное состояние пахотный горизонт и поверхность возделываемой почвы, укрывать ее мульчей или сидеритами, сегодня вполне под силу каждому землевладельцу. Однако, чтобы экологически обосновано и экономически эффективно осуществлять защиту почвы от эрозии, необходимо понять физический процесс взаимодействия капли воды с поверхностью обнаженной почвы. На основе полученных данных можно вскрыть механизм капельной эрозии, оценить масштабы ущерба и разработать мероприятия по защите почвы от нее. Одним из главных требований, предъявляемых к технологическим приемам по охране почвы является, с

одной стороны, минимальные финансовые затраты по их внедрению и, с другой — их максимальная отдача и оперативность.

Механика столкновения капли дождя с почвой охватывает довольно широкий круг вопросов. В общем плане удар капли о почву представляет собой задачу уяснения последовательности процессов механизма деформации капли и почвы. Количеств и видов повреждений почвы каплями дождя сравнительно много и некоторые из них наверняка еще неизвестны. Эти повреждения, имея одну и ту же причину появления, могут приводить к различным последствиям. В первую очередь происходит разрушение структурных агрегатов, выравнивание поверхности и уменьшение ее шероховатости, заплывание почвы, закупорка поровой сети и, отсюда, падение впитывания влаги и водопропускной способности почвы, ухудшение аэрации и воздухообмена, создание плотной корки и многое другое. Иначе говоря, интенсивный дождь сильно и напрямую влияет на физические, водно-физические и агрономические свойства почвы. Опосредованно капельная эрозия затрагивает все экологические, эдафические и производственные функции почвы. Важно отметить, что масштабы, виды и глубина разрушения у разных почв в разное время и от разных дождей могут значительно различаться. Поэтому для почв различного типа ответная реакция на одни и те же дожди будет дале-

ко не одинакова. С другой стороны, разные дожди могут вызывать в зависимости от типовых особенностей почв сопоставимые негативные результаты. В предлагаемом сообщении изучение капельной эрозии ограничивалось проблемой разбрасывания почвенного мелкозема в составе брызг в результате деформации почвы каплями дождя и образования многочисленных выбоин (кратеров) под действием многократных ударов.

О ТЕРМИНОЛОГИИ

В настоящее время процесс эрозии почв дождевыми каплями не имеет общепризнанного названия. В различных научных школах и в разных смежных науках о Земле в одно и то же определение зачастую вкладывается далеко не одинаковое понятие. И, наоборот, один и то же термин зачастую имеет различный смысл. Основные понятийные трудности в осмыслении терминов в области эрозии дождя связаны с многообразием его действия на почву. В тех странах, где выпадение снега — редкое исключение, понятие «поверхностной» эрозии очень близко термину «капельная эрозия». Н. Гудзон [1] пользовался термином «Эрозия, вызываемая дождевыми каплями». Г. И. Швебс [2] употреблял понятия «Эродирующее действие капель» и «Эрозия разбрызгивания» как синонимы. Авторы учебника «Охрана почв». Г. В. Добровольский и Л. А. Гришина писали: «Причиной плоскостной эрозии являются капли дождя, которые разрушают почвенные агрегаты и отрывают почвенные частицы, некоторые из которых подсакаивают до 50—60 см. Отдельные почвенные частицы переносятся текущими водами пластового покрова. Это внутренняя, или капельная, эрозия» [3, стр. 29]. Чаще всего в литературе по охране почв пользуются термином «капельная эрозия». Однако нет единодушия относительно того, что понимается под этим понятием.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Самостоятельной научной литературы по проблеме капельной эрозии не существует, за исключением отдельных упоминаний о ней в некоторых публикациях, посвященных самым разным темам. На деструктивное воздействие дождя на оголенную почву указывал основоположник почвоведения В. В. Докучаев [4] и многие его последователи. Однако самостоятельные и целенаправленные исследования по этой проблеме начались значительно позже. Первым обратил внимание на действие дождя на илистые и песчаные отложения и обстоятельно описал морфологию капельных выбоин

известный специалист в литологии У. Х. Твенхофел [5]. В своей книге «Учение об образовании осадков» он писал «Дождь, падая на сырой, не слишком жидкий ил, производит округлые или эллиптические ямки с неровными краями, слегка приподнятыми над окружающей поверхностью ила. Поверхности углубления заметно не ровные. Края слегка выше и углубления слегка глубже на сторонах, обращенных к направлению падения капель; глубины углублений меняются с размерами капель, которые образуют их с силой, с которой падают капли, и с мягкостью ила. Ямки образуются, но не сохраняются в очень жидком илу. Максимальная глубина является приблизительно 3 мм, ширина колеблется от 2 до 12 мм. Дождь производит отпечатки и на песке, но у них края не так резки, как края, ограничивающие углубления в илах. После того, как на песчаной поверхности получилось много отпечатков, он покрывается соединяющимися ямками, и на этой поверхности могут быть также знаки струй, образованные сбегавшей дождевой водой. Отпечатки капель, падающих с высоты какого-либо предмета, подобны тем, которые получились от дождя, но максимальная и средняя ширина их оказывается большей. Так как вода, капая с каких-либо предметов, обыкновенно падает без горизонтальной слагающей, у ямок имеется тенденция быть круглыми» [589 с.]. Профессор Н. И. Сус [6] в книге «Эрозия почвы и борьба с нею» писал «Удары капель дождя размельчают почвенные агрегаты и образуют на почвенной поверхности весьма тонкую разжиженную грязь, которая в процессе инфильтрации закупоривает поры и резко ослабляет впитывание влаги» [21 с.].

Инициатор и основатель Службы охраны почв Министерства земледелия США Х. Х. Беннет значение капельной эрозии сводил к разрушению агрегатов, взмучиванию поверхностных потоков и созданию слабопроницаемой корки на поверхности почвы. В своей книге «Основы охраны почв» он писал: «Когда капли дождя со значительной силой ударяются о землю, более крупные из них нарушают ее верхний слой, особенно на рыхлых почвах. После того, как дождь размягчит почву, дождевые капли, ударяясь о землю, разбрасывают или разбрызгивают воду и почву и образуют мутную воду, т. е. воду, смешанную с почвой. Продолжительные дожди разбивают комки и комочки почвы (почвенные агрегаты или скопления частиц) и образуют корку на поверхности, которая мешает проникновению атмосферных осадков в почву и уменьшает впитывание воды почвой. Соответственно увеличивается поверхностный сток» [7, стр. 89—90].

По Н. Гудзону «...дождь по сравнению с поверхностным стоком имеет в 256 раз большую кинетическую энергию» [1, стр. 53]. Если исключить энергию дождевых капель, то смыв, при прочих равных условиях, снижается на 1—2 порядка. В одном эксперименте [по 1] суммарный смыв за 10 лет на открытой стоковой площадке длиной 27,5 м и шириной 1,5 м был в 100 с лишним раз больше, чем на такой же площадке, над которой натянута в два слоя москитная сетка и которая тем самым защищена от ударов капель. Эллисон [по 1] утверждал, что основное действие дождя заключается в отделении частиц почвы, тогда как основное значение поверхностного стока в перемещение этих частиц. За рубежом впервые в 1944 году количество разбрызганного каплями дождя почвенного мелкозема было измерено при помощи чашек Эллисона [1].

В 1968 году в журнале Почвоведение за №2 вышла статья Г. И. Швевса [8] «Материалы к изучению эрозирующего действия капель дождя». Все влияние капель дождя он сводит к разрушению структуры, заплыванию почвы, образованию корки и затруднению впитывания за счет кольматажа. Что касается разбрызгивания, то, по мнению автора, они, совместно с ударами капель, всего лишь увеличивает мутность потока. «Расход частиц от разбрызгивания характеризует лишь направленное их передвижение вниз по склону. Общее же количество частиц, поднимаемое в воздух каплями дождя, в десятки раз больше, и если при этом лишь небольшая доля продвигается вниз по склону «собственным ходом», то остальная часть, попадая в склоновые потоки, увеличивает их мутность, значительно способствуя общему переносу почвы вниз по склону» [8, стр. 137].

Но и позже в своей книге «Теоретические основы эрозиоведения» Г. И. Швевс [2] не вскрывал законы и механизм капельной эрозии. На странице 10 он дает ей следующее определение: «Эрозия разбрызгивания образуется при преобладании одностороннего перемещения частиц вдоль склона брызгами капель дождя, падающих на увлажненную поверхность почвы». Из этих слов непонятно, каковы причины преобладания «одностороннего перемещения частиц вдоль склона». В главе 3 он снова возвращается к этому вопросу, в которой отводит капельной эрозии всего лишь роль источника турбулентного возмущения в поверхностных потоках и практически не уделяет внимание разбрызгиванию. «Капли осадков, попадая в стекающий поток, создают очаги интенсивного воздей-

ствия. Энергия капли расходуется на создание дополнительной турбулентности (дополнительных вихрей), а также на разбрызгивание» [2, стр.78]. И хотя Г. И. Швевсу не удалось применить законы баллистики в объяснении капельной эрозии, он, один из первых, поставил вопрос о капельной эрозии в почвоведении генетической школы.

По мнению авторов книги «Эрозионные процессы» «Повышенная мутность потоков дождевого происхождения связана с псевдо турбулентностью ударов дождевых капель. Во время ливня на поверхность склона площадью 1 м² падает в секунду сотни капель, имеющих скорость до 10 м/сек и поперечник до 5—6 мм» [9, стр. 19]. Терминальная скорость падения дождевых капель зависит от их размеров и изменяется от 1—2 до 9 м/сек. С увеличением интенсивности дождя возрастает средний диаметр капель, поэтому при одинаковом слое осадков суммарная кинетическая энергия капель выше у ливневых дождей. Влияние дождевых капель на эрозию проявляется в отрыве частиц почвы от общей массы, повышении транспортирующей способности склоновых потоков. Количество почвы, оторванной каплями и поднятой в воздух вместе с брызгами воды при ливнях, достигает десятков и сотне тонн на гектар и нередко превышает массу почвы, смытую с то же площади. Кроме размеров капель и свойств почвы интенсивность разбрызгивания зависит от глубины слоя воды на поверхности почвы. Капли, выпавшие на сухую поверхность, практически не разбрызгивают частицы почвы, так как объем самой капли недостаточен, чтобы образовались брызги, способные захватить частицы почвы. Поэтому заметное разбрызгивание почвы начинается с появлением пленки воды на ее поверхности. При слое воды, превышающем 5—6 диаметров капли, разбрызгивание и отрыв частиц почвы прекращается, так как капли «не пробивают» слой воды. Увеличение транспортирующей способности потоков при выпадении дождя происходит вследствие возбуждения в потоке добавочной турбулентности и капиллярных волн. В склоновых потоках с малой скоростью течения капли производят основную работу по отрыву и взвешиванию частиц почвы. Экспериментальные работы показали, что если устранить влияние капель дождя на склоновый поток малой глубины (до 1—2 см), то его транспортирующая способность уменьшается в 10 раз и более. Капли, разрушая комочки почвы, заглаживают поверхность и, следовательно, уменьшают объем микропонижений. Но основная причина увеличения коэффициента стока заключается

в том, что капли уплотняют поверхность почвы, резко снижают инфильтрационную ее способность. По некоторым данным, водопроницаемость корочки может быть в 200 раз меньше, чем нижележащих слоев [9].

В пластовых потоках отрыв и транспортировка частиц происходит в основном за счет кинетической энергии капель или, точнее, за счет волнения, которые они производят. Лишь наиболее тонкие фракции переносятся во взвешенном состоянии. Более крупные частицы почвы перемещаются толчками, начиная движение при прохождении очередной волны, возникшей при падении капли или в результате прорыва микроплотин. В эти стадии очень характерна избирательная эрозия, в результате которой происходит огрубление гранулометрического состава поверхностного слоя почвы. Растения рассеивают кинетическую энергию капель, предотвращают разрушение структуры поверхностного слоя почвы, на порядок снижает транспортирующую способность пластовых потоков и образования слабопроницаемой корки [9].

В приведенном материале действие капель дождя на почву сводится к ее механической деформации — уплотнению, разрушению структуры, отрыву и разбрасыванию частиц и микроагрегатов почвы в составе брызг, кольматажу, выравниванию поверхности, созданию корки, турбулентному возмущению поверхностных потоков, насыщению их почвенным материалом и повышению их транспортирующих возможностей. Однако никто из отмеченных авторов не указывал на причины количественного различия в дальности полета брызг вниз и вверх по склону, что и следует относить к эрозии разбрызгивания.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ЭРОЗИИ РАЗБРЫЗГИВАНИЯ

При выпадении ливня его капли с силой ударяются о почву. Каждая капля, падая на оголенную землю, производит действие, подобное взрыву микрометеорита. Она выбивает в почве углубление, дробит размокшие агрегаты на мелкие частицы и разбрасывает их в стороны. Дальность полета брызг может достигать 1,5—2,0 м со средним значением 40—60 см. А общая масса поднятого в воздух почвенного материала во время сильного ливня порою доходит до 150—200 т/га, что составляет слой почвы в 1,2—1,5 мм [10].

Известно, что кривая полета материальных объектов в воздухе значительно отличается от их траектории в безвоздушном пространстве. Эта раз-

ница тем больше, чем больше скорость предмета и чем меньше его масса и больше размеры. Но при малых скоростях можно пренебрегать силой сопротивления воздуха. Поэтому при начальных скоростях, меньше 50 м/сек, не будет ошибкой применять формулы параболической кривой для вычисления траектории полета почвенных частиц в воздухе. Уравнение траектории полета в пустоте описывается кривой второго порядка, то есть параболой: $y = ax - bx^2$.

Деформация почвы под воздействием импульсной нагрузки при ударе одиночной капли развивается как сложный динамический процесс, состоящий из ряда последовательных и взаимосвязанных событий. Известно, что в первый момент, длящийся доли секунды, вода проявляет себя как твердое вещество. Не исключено, что именно за это время большая часть (около 2/3) кинетической энергии капли расходуется на уплотнение почвы. Очевидно, что к основным элементам механики удара капли о почву относятся ее проседание, проникновение влаги под давлением капли в почву, радиальное растекание влаги капли от центра ее соприкосновения с почвой, захват мелкозема и разлет в виде брызг во все стороны. На рис. 1 показаны примерные стадии деформации капли воды при ударе о выровненную, сухую и пористую поверхность почвы.

Условно все морфологические стадии разрушения почвы каплей можно поделить на два периода. Первый из них — это период нарастания давления внутри капли и, соответственно, на поверхность почвы. Он начинается с момента контакта капли и почвы и заканчивается с началом разбрызгивания. Второй период — это время спада давления, к концу которого капля полностью «растекания» и ее начинают пронизывать последние брызги, которые возникли за счет избыточного давления воды в тупиковых порах почвы. В первые моменты после касания капли с почвой образуется округлая область контакта. По мере ее увеличения до размеров диаметра капли происходит общее нарастание давления по всей области контакта. В дальнейшем, когда капля деформировалась до ее центра (см.

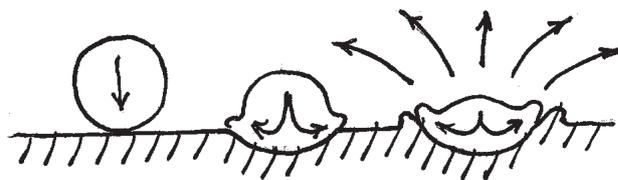


Рис. 1. Упрощенная схема разбрызгивания при ударе капли о почву

рис. 1), когда давление по периферии контакта уже начинает падать, давление в центре контакта все еще продолжает расти. В результате перепада давления от центра капли к ее окраинам радиально устремляются потоки воды. Их траектории движения повторяют кривизну стенок кратера. Будучи вытолкнутые из зоны большого давления, они продолжают двигаться по инерции. Вырвавшись из почвы, и увлекая и выталкивая перед собой мелкозем, струи воды рассыпаются в брызги. Они под разными углами взлетают в воздух и уносят захваченный с собой почвенный материал. Картина удара капли о почву во многом аналогична микровзрыву.

Таков механизм возникновения повышенного давления капли на почву, которое преобразуется в механическое движение воды и разбрасывание во все стороны мелкозема почвы. Не исключена вероятность, что по мере падения давления может срабатывать сила упругости почвы, которая так же будет стимулировать разбрызгивание. Вода капли, почти мгновенно и потому, не глубоко проникая в поры почвы, локально приподнимает (вспучивает) почву вокруг кратера и создает дополнительный импульс (толчок), вектор которого направлен в сторону движения брызг. Радиальные струи, устремляясь к периферии смоченной зоны, расталкивают и приводят в движение все лежащие на их пути препятствия в виде агрегатов и частиц почвы. Часть из них, которые они способны поднять, они уносят с собой. Остальную большую часть они откладывают в местах разгрузки давления, то есть вокруг кратера. В результате углубления от ударов капель окаймлены бордюром выбросов, состоящие из несортированного почвенного материала.

Согласно теории вероятности, при падении капель дождя на поверхность обнаженной почвы, все возникшие брызги (осколки капель) и захваченный ими мелкозем равномерно разлетаются во все стороны. Поэтому они возвращаются на почву на некотором расстоянии от места падения породившей их капли. Если мелкозем почвы будет улетать в составе брызг дождя и не компенсироваться прилетевшим ему взамен таким же количеством почвенной массы, то почва будет нести потери и эродироваться. Наглядным доказательством тому является односторонний перенос мелкозема с обнаженных участков почвы (вблизи границ поля) на заросшие травой полевые дороги. Жители села, а теперь и горожане, имеющие дачные участки, могли заметить, что заросшие травой

(чаще всего спорышом) постоянные дорожки в их огороде медленно, но неуклонно, из года в год повышаются. И это несмотря на то, что по ним регулярно ходят и уплотняют. Начиная с 30—50 лет, это превышение может достигать 5—10 см. Наращивание тропинок с одинаковым успехом происходит как на склонах, так и на горизонтальных и хорошо спланированных наделах. И только в саду под покровом деревьев отмеченной закономерности не наблюдается. Разгадка этого очень проста. Все дело в разбрызгивании. Несомненно, что капли дождя с одинаковой силой «бомбардируют» как возделываемую и потому большую часть года обнаженную почву огорода, так и всегда укрытую живой или увядшей травой поверхность дорожек. Понятно, что вблизи дорожек на оголенной почве интенсивно идет процесс разбрызгивания. Часть поднятого брызгами мелкозема улетает на дорожку, попадает на листья трав, смывается с них и навсегда остается на этой дорожке. А вот обратно в огород они вернуться не могут. Все дело в том, что разбрызгивание почвы на дорожке, защищенной сплошным сплетением трав, не возможно. Травы, принимая на себя энергию дождя, тем самым экранируют почву от ударов капель и исключают возможность произвести ими работу по «разбрызгиванию». Следовательно, односторонняя поставка мелкозема с оголенной почвы на дорожку как раз и приводит к ее постепенному поднятию. Под кронами деревьев, в которых гаснет сила дождя, как на задернованной, так и оголенной почве эффект разбрызгивания невелик. В свою очередь, лишённые травянистого покрова тропинки на лугах, проселочные дороги, скотопрогоны в районах пастбищ, даже вытоптанные места вблизи футбольных ворот, так же постепенно понижают свой уровень. И это касается не только случаев наклонной поверхности, когда это явление можно связать со сплошным смывом фронтальными временными потоками. Но и на плоских участках (пример тому футбольное поле) отмечаются такие локальные понижения. С вытоптанного, открытого и незащищенного участка возле футбольных ворот мелкозем переносится в составе брызг и надолго задерживается на соседней заросшей травой почве.

Разбрасывание почвенного материала происходит во все стороны, однако на склоне большая доля частиц все же направляется в сторону его подошвы. Все дело в том, что при попадании капель дождя на склоны, разбрызгивание вниз по уклону происходит на заметно большее расстоя-

ние, чем вверх по склону. Различие в дальности полёта мелкозёма в составе брызг и его количественное соотношение в переброски вниз и вверх по склону будут строго зависеть от угла между склоном и его проекцией. С ростом угла склона на каждый градус количество частиц почвы и разность перелёта вниз и вверх будет возрастать. По этой же причине длина шага при ходьбе вверх по склону всегда короче, а вот вниз — длиннее. На горизонтально-ровном распаханном поле из каждой конкретной точки его поверхности в составе брызг улетает примерно столько же мелкозёма, сколько и прилетает с другими брызгами, возникшими от других капель в других соседних точках. Поэтому, несмотря на то, что за время одного дождя в воздух может быть поднято весомое количество почвенного материала, смещения его в латеральной плоскости не произойдет. По иному, с учетом конечных результатов, разыгрываются события на склоне. Дальность каждого отдельного перелета частицы вверх будет явно меньше, чем вниз (см. рис. 2).

При уклоне местности в 45° и взлете брызг под углом 60° их полет вниз по склону в 2,5 раза дальше, чем вверх. По закону вероятности за время дождя частица взлетит равное число раз как вниз, так и вверх по склону. В свою очередь, независимо от направления полета, средняя дальность полета и средний угол взлета мелкозёма будет соответствовать распределению Гаусса, т. е. одинаковы во все возможные направления. Если проследить за судьбой одной частицы при равном количестве ее взлетов вверх и вниз склона, то в конце дождя она

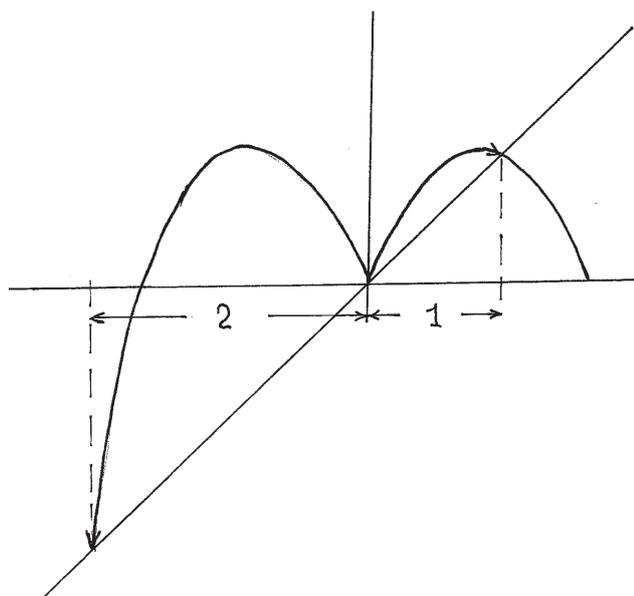


Рис. 2. Разбрызгивание почвы каплями дождя на склоне в 45°

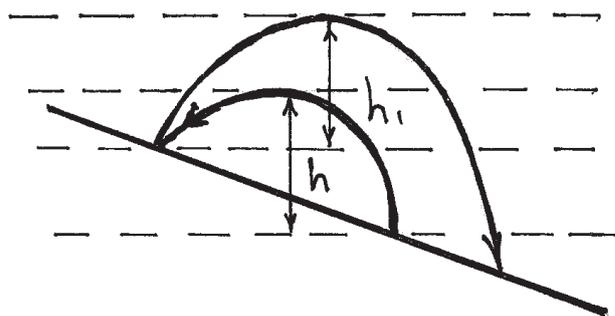


Рис. 3. Траектория движения частицы почвы и ее смещение вниз по склону после 2 равных по высоте и углу взлетов

окажется заметно ниже по склону от того места, где залегала до начала дождя. Это случится даже в том случае, если она сделает только два равновеликих по углу взлета и высоте скачка, один вверх, другой вниз (см. рис. 3).

Ее судьбу разделят многие другие частицы. Следовательно, при выпадении дождя на вспаханных склонах, перенос частиц вниз по уклону происходит на большее расстояние, чем вверх. В результате поднятая в воздух во время дождя почвенная масса смещается вниз. Ее перенос происходит не по поверхности почвы (как в случае эрозии), а в приземных слоях атмосферы на удалении от поверхности. Этим разбрызгивание напоминает дефляцию, но отличается от нее тем, что причиной движения частиц почвы является дождь, а не ветер. Различие в дальности полета мелкозёма и его количественное соотношение в переброски вниз и вверх по уклону строго зависит: 1 — от крутизны склона, 2 — количества капель дождя и 3 — их размеров. Интенсивность и частота дождей пока не подвластна человеку. Поэтому задача сохранения почв от разбрызгивания сводится к отысканию ответа на вопрос — как сильно влияет уклон местности на различие в дальности полета брызг вверх и вниз по склону? Зависимость изменения дальности полета брызг вдоль склона с ростом его крутизны имеет криволинейный характер. Однако в нашем случае на склонах с крутизной от 0° до 45° не будет большой ошибкой выразить эту зависимость прямо пропорциональной функцией. В соответствии с законами симметрии следовало ожидать, что при угле наклона в 45° дальность полета частиц почвы вниз по склону в два раза длиннее, чем вверх. Но этот не так.

Математическими расчетами или геометрическими методами нетрудно доказать, что при этом угле дальность полета вверх укорачивается на 35 %, а расстояние полета вниз по склону возрастает на

25 %, по сравнению с разбрызгиванием на горизонтальной плоскости. Следовательно, если угол в 45° укорачивает длину полета частиц вверх по склону на 35 %, то угол в 1° всего на 0,78 %. В свою очередь, дальность разбрасывания частиц строго вниз по склону возрастает на каждый градус склона на 0,56 %. Таким образом, при уклоне в 5° дальность полета вниз увеличится на 2,8 %, а вверх уменьшится на 3,9 %. Если принять среднюю дальность полета частиц за 50 см, то вся почвенная масса при угле склона в 5° , при условии, что все ее частицы взлетят всего лишь один раз, сместится в среднем на 1,7 см вниз по склону. Понятно, что такие условия при любом дожде не выполнимы. Для более точных расчетов необходима дополнительная информация о количестве капель дождя, о среднем количестве брызг от одной капли и о средней массе почвенного мелкозема, захваченной одной из брызг. При сегодняшнем методическом уровне и инструментальном обеспечении получение этих данных связано с большими статистическими выкладками и допущениями. Но эта задача вполне разрешима.

Еще Галилеем было доказано, что наибольшее расстояние пролетит тот предмет, который взлетит под углом в 45° . Следовательно, все остальные частицы почвы, стартовавшие под большим или меньшим углом, финишируют на более коротком расстоянии от места своего взлета. В баллистике все траектории полета брошенного предмета под углом взлета свыше 45° называются навесными, а под углом менее 45° — настильными. Как следует из закона статистики, количество брызг с навесным вариантом полета примерно равно количеству брызг с настильным полетом. Если мы имеем дело со склоном в 45° , то вверх по склону могут взлетать только те частицы, которые летят по навесной траектории. Следовательно, вверх по склону с углом в 45° количество брызг по сравнению с горизонтальной поверхностью уменьшится на 1/4. А вот в противоположную сторону вниз по склону число брызг, напротив, возрастет до 3/4.

Как это видно из данных рис. 4, перенос частиц вверх по склону произойдет только за счет навесных траекторий, а разбрызгивание частиц вниз — как за счет навесных, так и настильных полетов. При этом область настильных траекторий расширилась в два раза. Следовательно, если вверх по склону возможность полета осталась только у навесных полетов, то вниз по склону, помимо симметричных навесных, вероятность появления настильных парабол возрастет в 2 раза за счет 3 и 4

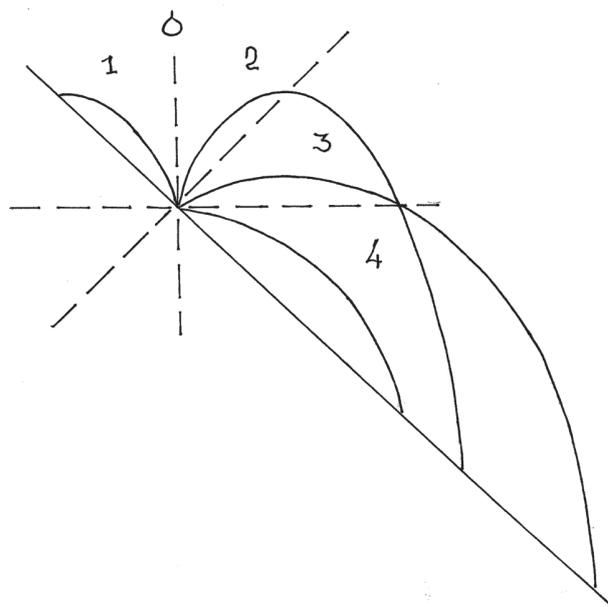


Рис. 4. Степень свободы полета брызг вверх и вниз на склоне в 45°

зоны. В результате отношение массы почвы, брошенной брызгами вверх по склону, к массе, брошенной вниз склона, составляет 1 к 3.

Есть и другой способ рассуждения, который приводит к тем же результатам. Поделив пространство свободы полета над склоном в 45° на 4 одинаковые секции (см. рис. 4), станет очевидно, что вверх по склону имеется только одна секция свободы полета, а вниз по склону — три. Таким образом, на склоне в 45° вверх по уклону переместится всего лишь 25 %, а вниз — 75 % от всей поднятой брызгами массы почвы. Отсюда получается, что вниз вместе с брызгами улетит в три раза больше частиц почвы, чем вверх. Исходя из этого, путем расчета получаем, что с изменением угла на каждый градус вверх будет брошено на 1,1 % массы почвы меньше от общего количества поднятого дождем почвенного материала. Следовательно, при крутизне склона в 1° от общей поднятой брызгами массы почвы вниз склона будет перемещено на 1,1 % больше, чем вверх. При уклоне в 2° эта разница в переброски вниз и вверх возрастет до 2,2 %. То есть, вверх по склону улетит всего 47,8 %, а вниз — 52,2 % от всей захваченной брызгами почвенной массы за все время дождя. И хотя еще нет прямых опытов в качестве доказательства различия в количестве частиц, перемещенных вниз и вверх склона, в реальное существование этого предположения вряд ли кто будет сомневаться.

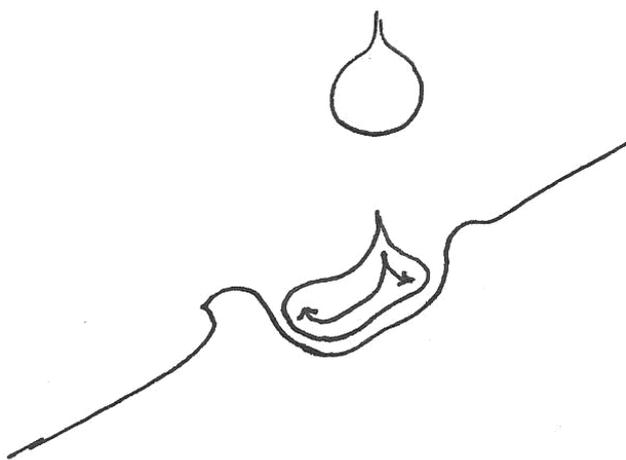


Рис. 5. Направленный микро наплыв как результат деформации капли при ее ударе о поверхность склона

Эллисон (1945) опытным путем установил [по 11], что при ударе капля мельчайшие частицы почвы разбрызгиваются на высоту до 1,5 м. При этом на склоне крутизной в 10° в сторону подошвы холма переносилось в три раза больше почвенных частиц, чем вверх по склону. Исходя из чисто теоретических предпосылок, такая ситуация, когда вверх по склону будет перемещаться по ходу дождя в три раза меньше мелкозема, чем вниз, наступит при крутизне склона в $22,5^\circ$. Причина этого более чем двукратного расхождения в крутизне, полученной эмпирическим и теоретическим методами, связана, скорее всего, со сдвигом почвы по уклону, который не учтен в последнем методе. Дело в том, что если капля падает вертикально, то она приближается к поверхности склона под углом. Поэтому, в согласии с законом отражения, выбросы вверх и вниз не будут симметричны, как это предполагает теоретический расчет. Преобладающая часть материала, выброшенного из воронки, направляется вниз по склону. К отмеченному выше обстоятельству в разнице брызг, обусловленные различием степеней свободы их полета, добавляется дополнительная причина, которая усиливает эффект капельной эрозии. Помимо этого, при отвесном падении капли на склон она асимметрично деформируется (см. рис. 5).

Дело в том, что соприкосновение капли с наклонной плоскостью почвы происходит не в самой ее нижней части, а немного сбоку, в той ее стороне, которая обращена на верх склона. По этой причине точка соприкосновения капли с почвой отклоняется от вертикальной линии, проходящая через центр тяжести капли. И в то время как часть

массы капли в области контакта начинают тормозиться, остальная большая ее доля влаги, не встречая преград, продолжает полет. Естественно, возникшее давление в области касания снимается за счет переливания влаги в область малого давления, расположено в остальной части капли, ориентированной вниз по склону. В результате округлое очертание капли сменяется на вытянутое вдоль склона и ее большая масса устремляется по уклону. Соответственно с этим ведет себя и ее кинетическая энергия. Пропорционально массе перераспределения и скорости воды внутри капли, вектор ее импульса отклоняется от строго вертикального направления в сторону уклона поверхности почвы. Это перераспределение воды в пределах капли за счет градиента давления будет происходить до тех пор, пока капли будут иметь округлые формы. С их потерей и превращения капли в плоскую «лепешку», давление в ней выровняется, хотя оно (до появления брызг) может в десятки раз превосходить атмосферное. Но и в этом случае, турбулентные движения воды в деривате капли, подчиняясь силам инерции, направлено по наклону местности. В результате капля приобретает возможность не только больше выбросить мелкозема вниз по склону, но и столкнуть его по уклону, образуя из него волну наплыва (бруствер сползания). В итоге, еще до разбрызгивания, энергия капли в момент контакта с почвой, приводит к смещению почвенной массы, то есть к эрозии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В самом общем виде, эрозия почв — это работа по переносу почвенной массы с повышенных участков в пониженные. Всякая работа сопровождается расходом энергии. Сегодня общепризнано, что энергия дождя тратится на разрушение почвенных агрегатов, отделение и подачу почвенных частиц во временные дождевые потоки воды, разбрасывание твердых частиц почвы в составе брызг, выравнивание микрорельефа почвы, ее уплотнение, создание и дифференциацию по гранулометрическому составу почвенной корки и турбулентные возмущения в поверхностных потоках. А вот капельная эрозия, в силу ее кажущейся ничтожности и трудностей в методическом подходе, и по настоящее время не привлекает к себе внимание и потому мало изучена. И только использование законов баллистики позволили понять некоторые стороны ее механизма. На основе аналитической и начертательной геометрии легко

понять, что почвенный мелкозем в составе брызг капель дождя, летящих вниз по уклону местности, пролетает явно большее расстояние, чем почвенные частицы тех брызг, которые выброшены вверх по склону. И чем больше наклон распаханной почвы, тем больше различие в дальности полета противоположно направленных брызг. В свою очередь, путем логичных рассуждений несложно доказать, что за счет разбрызгивания вверх по склону будет всегда брошено меньшее количество массы почвы, чем вниз. И эта разница будет усиливаться по мере увеличения угла наклона местности. Исходя из этого, нетрудно рассчитать, что с изменением угла на каждый градус вверх будет брошено на 1,1 % массы почвы меньше, а вниз на ту же величину больше, от общего количества поднятого дождем почвенного материала. Следовательно, при крутизне склона в 1° от общей поднятой брызгами массы почвы вниз склона будет перемещено на 1,1 % больше, чем вверх. При уклоне в 2° эта разница в переброски вниз и вверх возрастет до 2,2 %. То есть, вверх по склону улетит всего 47,8 %, а вниз — 52,2 % от всей захваченной брызгами почвенной массы за все время дождя. И хотя еще нет прямых опытов в качестве доказательства разницы в количестве брызг брошенных вниз и вверх склона, реальное существования этого предположения вряд ли кто будет оспаривать.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гудзону Н. Охрана почвы и борьба с эрозией / Н. Гудзон. — М.: Колос, 1974. стр. 304.
2. Швевса Г. И. Теоретические основы эрозиоведения / Г. И. Швевс. — Киев-Одесса: Вища школа, 1981. — 222 с.
3. Добровольский Г.В., Гришина Л.А. Охрана почв / Г.В. Добровольский, Л.А.Гришина. — М.: Изд-во МГУ, 1985. — 225 с.
4. Докучаев В.В. Избранные сочинения / В.В. Докучаев. — М.: Государственное издательство сельскохозяйственной литературы, 1949, Т. 2, — 425 с.
5. Твенхофел У. Х. Учение об образовании осадков / У. Х. Твенхофел. — М.-Л.: Объединенное научно-техническое издательство НКТП СССР, 1936. — 916 с.
6. Сус Н. И. Эрозия почвы и борьба с нею / Н. И. Сус. — М.: Сельхозиздат, 1949. — 350 с.
7. Беннетт Х. Х. Основы охраны почв / Х. Х. Беннетт. — М.: Иностранная литература, 1958. — 411 стр.
8. Швевса Г. И. Материалы к изучению эродирующего действия капель дождя / Г. И. Швевса // Почвоведение. — 1968. — №2. — С. 133—140.
9. Эрозионные процессы / М. Ю. Белоцерковский, Б. В. Белый, К. М. Беркович [и др.]. — М.: Мысль, 1984. — 255 с.
10. Кузнецов М. С., Глазунов Г. П. Эрозия и охрана почв / М. С. Кузнецов, Г. П.Глазунов. — М.: Изд-во МГУ, 1996, — 335 с.
11. Скородумов А.С. Эродированные почвы и продуктивность сельскохозяйственных культур / А.С. Скородумов. — Киев: Урожай, 1973. — 269 с.

Барсукова Майя Юрьевна — соискатель кафедры почвоведения и управления земельными ресурсами Воронежского госуниверситета; тел.: (4732) 20-85-77, e-mail: bssoil@bio.vsu.ru

Дудкин Юрий Иванович — кандидат биологических наук, доцент кафедра почвоведения и управления земельными ресурсами Воронежского госуниверситета; тел.: (4732) 20-85-77, e-mail: bssoil@bio.vsu.ru

Коржов Евгений Николаевич — кандидат физ.-мат наук, доцент кафедра теоретической и прикладной механики Воронежского госуниверситета; тел.: (4732) 20-87-63, e-mail: bssoil@bio.vsu.ru

Щеглов Дмитрий Иванович — доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой почвоведения и управления земельными ресурсами Воронежского госуниверситета; тел.: (4732) 20-85-77, e-mail: bssoil@bio.vsu.ru

Barsukova Maiy U. — the competitor of faculty of soil science and management of ground resources of the Voronezh State University; tel.: (4732) 20-85-77, e-mail: bssoil@bio.vsu.ru

Dudkin Jury I. — cand.Biol.Sci., the senior lecturer faculty of soil science and management of ground resources of the Voronezh State University; tel.: (4732) 20-85-77, e-mail: bssoil@bio.vsu.ru

Korzhov Eugeny N. — the candidate of physical and mathematical sciences, the senior lecturer faculty of theoretical and applied mechanics of the Voronezh State University; tel.: (4732) 20-85-77, e-mail: bssoil@bio.vsu.ru

Shcheglov Dmitry I. — dr.Sci.Biol., the professor managing faculty soil science and management of ground resources of the Voronezh State University; tel.: (4732) 20-85-77, e-mail: bssoil@bio.vsu.ru