

ЭФФЕКТ УВЛАЖНЕНИЯ ПРИ ВИБРАЦИОННОМ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ЧАСТИЦ В ПОЧВЕ

М. В. Нецветов, П. К. Хиженков¹

Донецкий национальный университет

¹ *Донецкий физико-технический институт*

ЭФФЕКТ ЗВОЛОЖЕННЯ ПРИ ВІБРАЦІЙНОМУ ПЕРЕМІЩЕННІ ЧАСТОК У ҐРУНТІ

Розглянуто роль зволоження ґрунтових зразків і модельних субстратів у переміщенні мікро- і наночастинок під дією вібрації. Показано, що порівняно із сухим субстратом обсяг переміщуваних частинок знижується при незначному зволоженні і зростає при повному заповненні пор водою. В останньому випадку вібраційний вплив є максимально ефективним для найбільш дрібних з-поміж неколоїдальних частинок, що не перебувають у завислому стані.

Ключові слова: вібрації, лесиваж, зволоження.

M. V. Netsvetov, P. K. Khizhenkov¹

Donetsk National University

¹ *Donetsk Physicotechnical Institute*

MOISTENING EFFECT IN CASE OF THE VIBRATIONAL MOVEMENT OF SOIL PARTICLES

The role of moistening of soil samples and model substrates in a micro- and nanoparticles vibrational transference process was investigated. It was shown that the amount of moving particles in comparison with dry substratum decreases in case of insignificant moistening and increases in case of spores fulfilling. In the last case vibrating influence as effective as possible for the smallest particles that aren't suspension.

Key wards: vibrations, forest restoration, moistening.

Возможность механического перемещения минеральных частиц или их агрегатов в почве без химического разрушения (лессиваж) долгое время оставалась предметом острых научных дискуссий. Признаки подзолистых почв, свидетельствующие о передвижении мелкодисперсных частиц из верхних горизонтов в нижние, были отмечены еще В. В. Докучаевым в 1880 г. Его ученик С. И. Тюремнов (1922), исследуя механизмы влияния кислот на почву, пришел к выводу о возможности как химического разрушения частиц, так и их механического перемещения. Основы современных представлений о лессиваже ясно прослеживаются во взглядах К. Д. Глинки, который прямо говорил о выносе «тонких суспензий» и объяснял его механизмы и следствия (1924). Тем не менее теория лессиважа была разработана в основном западными учеными (Дюшофур, 1970). В то же время в отечественном почвоведении этот элементарный процесс недооценивался или отрицался. Еще А. К. Георгиевский (1888) считал, что перемещение минералов является результатом химического разрушения илистых частиц. А. А. Роде (1937 и более поздние работы) отрицал возможность процессов переноса тонких частиц на глинистых и суглинистых породах, ссылаясь на экспериментальные данные. Большое значение имела однозначная трактовка роли лесной подстилки. Например, В. Р. Вильямс (1949) указывал, что при разложении лесного опада образуется креновая кислота, разрушающая минералы. Таким образом, среди ряда ученых складывалось мнение об универсальности условий почвообразования под лесной растительностью.

Действительно, подзолообразование чрезвычайно распространено в российской части лесной зоны, этому способствует ряд факторов, среди которых: преобладание креновой кислоты и фульвокислот, образующихся при разложении опада под хвойными породами; низкая скорость минерализации органических кислот; промывной режим. Кроме того, под лесами в Прибалтике, Украине, Беларуси, Молдове, на равнинах и низкогорье Дальнего Востока и Приморья почвы также, как и характерные подзолы, обладают дифференцированными горизонтами. Сложность в оценке почвенных процессов под лесной растительностью дополнялась наличием кремнеземистой присыпки, которая может быть как результатом выщелачивания продуктов химического разложения почвенных минералов (Роде, 1955), так и продуктом вторичного биогенного происхождения (Белова, 1999).

О том, что процесс почвообразования даже в пределах одной географической зоны неоднозначен, свидетельствует ряд систематических исследований морфологии и физической химии почв, в ходе которых были выработаны и неоднократно подтверждены характерные диа-

ностические признаки почв лессиве (Дюшофур, 1970; Фридланд, 1958; Герасимов, 1959, 1960): химический состав ила и коллоидов в профиле почвы с глубиной не меняется, тогда как в генетических горизонтах профиля подзолов он различен вследствие разрушения минеральной части в верхних слоях и выноса продуктов в нижние с дальнейшим образованием вторичных минералов; другим важным критерием служит оптическая ориентация минеральных частиц, которая отсутствует в случае новообразования в подзолистых почвах.

Значительную роль в понимании особенностей почвообразования с дифференцированными горизонтами сыграли работы С. В. Зонна. Ученый дает четкое объяснение внешнего сходства лессивированных почв с подзолами. Так, если в результате подзолообразования происходит осветление верхних слоев профиля в результате накопления кварца и кремнезема при обеднении органическим веществом, первичными и глинистыми минералами, то лессивирование приводит лишь к текстурной дифференциации профиля по механическому составу (Зонн, 1969). Анализируя материалы исследования почв под широколиственными и хвойно-широколиственными лесами, С. В. Зонн (1969) обосновывает предпосылки для дифференцирования почвенных процессов. Отмечается, что «все они генетически взаимосвязаны, образуя несколько самостоятельных эволюционных рядов с различиями, обусловленными: составом почвообразующих пород, типом дифференциации почвенного профиля по механическому составу и воздействием различных типов лесной растительности» (с. 8).

Большой интерес представляет монография Н. А. Беловой и А. П. Травлеева (1999), в которой на основе экологического подхода, с применением прогрессивных методов микроморфологии и физикохимии дается обоснование процессов почвообразования под естественными лесами в степи. В работе отмечается, что перемещению тонких частиц способствуют вибрационные процессы. Позже, по предложению А. П. Травлеева, нами были проведены модельные эксперименты по влиянию вибраций на вертикальное перемещение микрочастиц в почве. В результате исследований характера вибраций в лесу установлено, что наибольшее значение имеют низкочастотные колебания ствола, крупных ветвей и корней дерева, которые передаются почве (Нецветов, 2003б). В лабораторных условиях такие колебания могут индуцировать или ускорять перемещение частиц по поровым пространствам (Нецветов 2003б; 2006).

В работе А. П. Травлеева и др. (2007) излагаются ценные микроморфологические исследования результата перемещения минеральных частиц в профиле почвы, в разделе «Теоретические основы» (с. 10-14) приведено описание возможных процессов в почве под действием вибрации. Будучи в целом согласными с излагаемыми особенностями вибрационного воздействия и необходимостью всестороннего изучения вибрационных процессов в почве, мы все же отметим некоторые, с нашей точки зрения, спорные высказывания или неточности. На с. 12 в «Теоретических основах» указывается на известное условие лессивирования – достаточное увлажнение почв, далее: «...при наличии влаги в порах, если даже она не заполняет полностью объем поры, она исполняет роль смазки, уменьшающей силы трения, а также уменьшающей силы взаимодействия между блоками в связи с уменьшением вязкости среды, окружающей блоки в виде оболочек. Транспортировка же частиц в дисперсной среде, характерная для явления лессиважа, может быть объяснена не только транспортировкой в потоке жидкости, но и явлениями, связанными с вибрацией». Однако в небольших количествах в виде пленки вода прочно связывается с почвенными коллоидами, зафиксированными в скелете, и также сама удерживает «свободные» частицы. То есть для малых частиц, участвующих в лессиваже, заключение об «уменьшении силы трения» (с. 13) может оказаться не совсем верным. Если вода в порах содержится в количестве, достаточном для перемещения (гравитационная вода), то коллоидальные частицы будут перемещаться с гидропотоком. Влияние вибрации, очевидно, будет более существенным на частицы, быстро осаждающиеся на дно, по сравнению с витающими.

В настоящей работе представлены результаты экспериментов, которые иллюстрируют влияние вибрации на частицы разного размера в сухих и увлажненных образцах почвы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Влияние вибрации на вертикальное перемещение частиц качественно изучали в образцах чернозема лесоулучшенного, отобранного в ясеновой дубраве возрастом 35 лет в 20 км южнее Донецка. Пробная площадь расположена в балке, в средней трети склона 5° северной экспозиции. Тип лесорастительных условий – суглинок суховатый. Образцы почвы без повреждения структуры помещали в чашки Петри вдавливанием их в стенку профиля на глубине 20 см. Образцы увлажняли из пульверизатора, после чего в них медленно вдавливали пробирки на 2 см. Под образцом помещали целлулоидную пробку для обеспечения неподвижности почвенного образца. Почву высушивали при температуре 30 °С в течение суток. Эксперимент проводился с сухими, смоченными 2 мл воды и полностью погруженными в воду образцами. Изучали перемещение смеси частиц никеля, плакированных алюминием, с размерами от 5 нм до 200 мкм, а также порошок карбонильного железа со средним диаметром час-

тиц 5 нм. При исследовании образцов, полностью погруженных в воду, навески частиц предварительно смачивали. Для определения количественных показателей процесса вертикального перемещения частиц использовали пенополиуретановые пробки (диаметром 1 и высотой 2 см) с размерами пор от единиц мкм до 1 мм. Применение пробок в модельном эксперименте позволяет получать результаты в нескольких повторностях с небольшой дисперсией и не искажает физическую суть изучаемого процесса. При этом использовали частицы никеля, разделенные на фракции: от 5 нм до 20 мкм, 20–100 мкм и 100–200 мкм. Во всех опытах использовали равные по объему навески частиц $V=0,2$ мл. Схема экспериментальной установки и методика воздействия вибраций соответствуют описанным ранее (Нецветов, 2003а, 2006). Амплитуда механических колебаний составляла 0,5–1 мм, частота – 23 Гц, форма сигнала – меандр. Регистрировали объем частиц V_l , прошедший через весь почвенный образец или модельный субстрат за одну минуту. Частицы, «витающие» в воде под субстратом, осаждались на дно пробирки постоянным магнитом, после чего производили расчет относительной скорости перемещения частиц $v=100 \cdot V_l/V$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В первой серии экспериментов визуально изучали качественные закономерности прохождения нано- и микрочастиц в глубь почвенных образцов при действии вибрации. После помещения навески частиц никеля на поверхность почвы часть их моментально погружалась в поровые пространства, но основной объем оставался на поверхности. Включение вибрации (23 Гц, 1 мм) приводило к практически моментальному (< 1 с) погружению всех частиц. При дальнейшем вибрировании в течение одной минуты частицы полностью проходили слой почвы (2 см). Для имитации промывного режима образец поливали 5 мл воды. При этом большая часть частиц (~60 %) проходила сквозь почвенный слой, а меньшая часть оставалась в поровых пространствах. Влияние вибрации на данный процесс не изучали.

В опыте с образцом, полностью погруженным в воду, предварительно смоченные частицы оставались на поверхности образца, перемещения по поровым пространствам не наблюдалось. При включении вибрации частицы быстро погружались в глубь образца. Однако некоторая часть оставалась во взвешенном состоянии, что обуславливало мутность воды над поверхностью почвы. При использовании частиц (~5 нм) карбонильного железа визуально их скопления в толще почвы не определялись на протяжении всего времени наблюдения (5 мин.). Действие вибрации не приводило к погружению взвешенных частиц, вода оставалась мутной в течение длительного времени, как и в эксперименте с частицами из никеля. Кроме частиц никеля или железа во взвешенное состояние переходили и частицы почвы.

Для получения более точных количественных данных о влиянии вибраций на прохождение частиц по поровым пространствам во второй серии экспериментов в качестве субстрата использовали пенополиуретановые пробки. Амплитуда колебаний (0,5 мм) была выбрана ниже, чем в предыдущей серии, для увеличения времени погружения частиц в объем модельного образца и облегчения наблюдения за нами. Как показано на рис. 1, скорость перемещения навески частиц в объем сухой пробки возрастает со снижением их размера. Для частиц каждой фракции характерно неполное исчезновение с поверхности. При действии вибрации на погружение частиц (5 нм) карбонильного железа более 2/3 навески длительно остается на поверхности в виде однородного слоя, обволакивающего пробку.

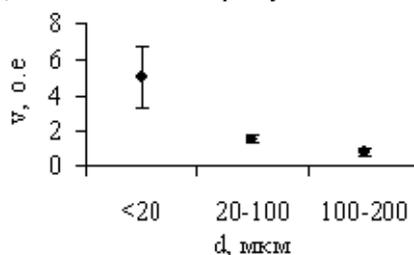


Рис. 1. Скорость перемещения никелевых частиц различного размера через сухой субстрат при действии вибрации (амплитуда 0,5 мм, частота 23 Гц)

После полива пробки вода медленно стекала, постепенно заполняя ее объем. Воздействие вибрации ускорило процесс протекания, который сопровождался выходом пузырьков воздуха. Если на смоченный субстрат, но без свободной воды в порах, с насыпанной на поверхность навески частиц воздействовать вибрацией, то погружение малой доли частиц происходит очень быстро. Но большая часть рассыпается по поверхности и обволакивает ее, глубина проникновения частиц – не более 1–2 мм. Частицы распространяются в вертикальном и горизонтальном направлении только по поверхности слоя из уже «слипшихся» с порой частиц.

Попадая на свободную поверхность, они быстро сцепляются с ней и прекращают дальнейшие движения. Скорость этого процесса, как и в предыдущем случае, тем выше, чем меньше частицы.

Для выявления особенностей воздействия вибрации на частицы в составе гравитационной воды, но не на сам поток, пробку обильно смачивали и помещали в пробирку, наполненную водой. Навески смоченных и диспергированных частиц вливали вместе с водой в пространство над пробкой. Вне действия вибрации некоторая доля частиц сразу погружалась в объем образца, но не проходила его полностью. Действие вибрации в опыте с частицами от 100 до 200 мкм привело к быстрому их перемещению сквозь пробку, которое определялось визуально. За одну минуту через пробку прошло около 1/4 общего объема частиц. При размере от 20 до 100 мкм доля прошедших через образец частиц увеличилась почти до 1/2. Из фракции менее 20 мкм через образец прошло наименьшее количество частиц (рис. 2, а). При этом через одну минуту вибрирования вода над пробкой оставалась мутной, что означает наличие большого количества взвешенных в ней частиц. То есть через пробку прошли лишь наиболее крупные частицы этой фракции, а частицы коллоидальных размеров, будучи во взвешенном состоянии, действию вибрации оказываются не подвержены.

Если на поверхность воды высыпали несмоченные частицы, то максимальный объем, прошедший сквозь субстрат, наблюдается для наиболее крупных (тяжелых) частиц (рис. 2, б). Мелкие частицы долгое время остаются на поверхности воды не смоченными, тогда как крупные быстро смачиваются.

Таким образом, вибрирование сухих образцов почвы или модельного субстрата с насыпанными на поверхность частицами приводит к разобщению последних между собой, уменьшению сцепления с субстратом и прохождению в поровые пространства. Скорость перемещения при неизменных параметрах вибрации увеличивается с уменьшением размера частиц. Некоторое их количество, однако, остается сцепленным с субстратом. Оно увеличивается с уменьшением размера частиц: чем меньше частицы, тем легче они обволакивают субстрат. Обволакивающий слой увеличивается при небольшом смачивании субстрата, без наличия свободной воды в порах. В этом случае вибрация обладает минимальным эффектом. То есть наличие влаги, но недостаточное ее количество, приводит не к облегчению перемещения частиц, а к большему сцеплению с поверхностью почвы. При наличии большого количества воды, заполняющей все пространство пор в почве, или модельном субстрате вибрация оказывает влияние лишь на наиболее крупные частицы, соприкасающиеся с колеблющейся поверхностью. Мелкие частицы во взвешенном состоянии действию вибрации практически не подвержены. Более того, постепенно оседающие на дно частицы снова под действием вибрации переходят в объем жидкости. Из этого следует, что действие вибрации на миграцию наиболее мелких нерастворимых частиц (коллоидов) при значительном увлажнении почвы осуществляется в основном через изменение скорости гидропотока. О возможности влияния на скорость прохождения воды через слой почвы под действием колебаний деревьев свидетельствуют экспериментальные данные (Данилик, 1989). Степень влияния вибрации на более крупные частицы или флоккулы в таких условиях также остаются под вопросом, поскольку даже относительно крупные частицы в составе гидропотока могут находиться в состоянии, подобном взвешенному.

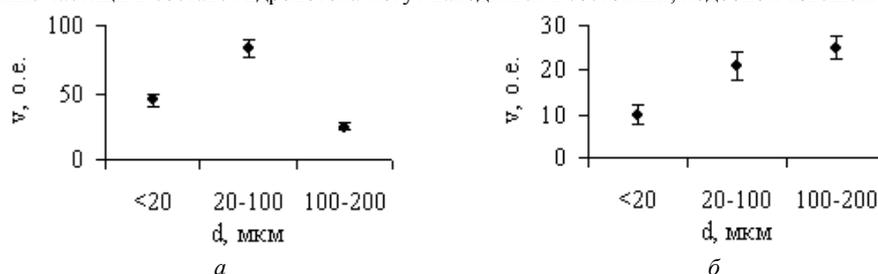


Рис. 2. Скорость перемещения частиц через субстрат с порами, полностью заполненными водой, при действии вибрации: а – для смоченных частиц; б – для изначально сухих частиц

Исходя из всего вышесказанного, можно предположить схему влияния вибраций на процессы механического перемещения частиц мелких фракций вниз по профилю почвы. Согласно Ф. Дюшофуру (1970) перемещению минеральных частиц предшествует физическая дезагрегация, ее главные механизмы – формирование и расширение трещин под действием температурных колебаний; денудация факторами эрозии. Вместе с этим, формирование трещин и измельчение агрегатов в определенной степени проявляются и при воздействии колеблющихся стволов и корней деревьев (Hintikka, 1973). Вибрационную дезагрегацию и просеивание частиц

через поровые пространства и трещины в сухом состоянии отнесем к первому этапу влияния вибраций на вынос коллоидов. На втором этапе, когда в почве достаточно гравитационной воды, наличие вибраций отразится в первую очередь на увеличении скорости гидротока с находящимися в нем частицами. Для частиц с размерами, большими коллоидальных, вибрационное просеивание возможно и на втором этапе при заполнении пор водой.

Еще один, требующий дополнительных исследований, канал влияния вибрации на почвенные коллоиды – появление *ОН* или других радикалов (Тарадина, 2007) и генерирование электрических токов при вибрациях или перемешивании растворов (Нецветов, 2001). Вследствие электрических свойств коллоидов эти явления в почвенных растворах должны приводить к изменению состояния почвенных растворов и коллоидов, например переход в пептизированное или флокулированное состояние и др.

В заключение перечислим вероятные механизмы вибрационного влияния древесной лесной растительности на почву: 1. Уплотнение или разрыхление почвы под колеблющимися частями дерева, стволом и корнями (*Hartge et al.*, 1983; *Hintikka*, 1973). 2. Механическое измельчение агрегатов (Травлеев, 2007). 3. Уменьшение сил взаимодействия между частицами и стенками пор, что приводит к облегчению перемещения под действием гравитации при небольшой влажности для наноразмерных частиц и в любых условиях для неколлоидальных частиц и крупных агрегатов (Нецветов, 2003б, 2006; Травлеев, 2007). 4. Увеличение скорости гидротока (Данилик, 1989). 5. Акустоэлектрические преобразования и электрохимическое воздействие на почвенные растворы (Нецветов, 2001).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Белова Н. А.** Естественные леса и степные почвы / Н. А. Белова, А. П. Травлеев. – Д.: ДНУ, 1999. – 348 с.
- Вильямс В. Р.** Почвоведение / Избранные произведения. – М.: Сельхозгиз, 1949. – 455 с.
- Георгиевский В. В.** К вопросу о подзоле. – СПб., 1888.
- Герасимов И. П.** Глеевые псевдоподзолы Центральной Европы и образование двучленных покровных наносов // Изв. АН СССР. Сер. геогр. – 1959. – №3.
- Герасимов И. П.** Почвы Центральной Европы и связанные с ними вопросы физической географии. – М.: Изд-во АН СССР, 1960.
- Глинка К. Д.** Деградация и подзолистый процесс // Почвоведение. – 1924. – №3-4.
- Данилик В. Н.** Влияние колебаний корней деревьев на водопроницаемость почвы / В. Н. Данилик, Г. П. Макаренко, О. В. Толкач // Лесоведение. – 1989. – № 1. – С. 40-45.
- Докучаев В. В.** Сочинения. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1949. – Т. 1-3.
- Дюшофур Ф.** Основы почвоведения. – М.: Прогресс, 1970. – 591 с.
- Зони С. В.** О процессах подзоло- и псевдоподзолообразования и проявления последнего в почвах СССР // Почвоведение. – 1969. – № 3. – С. 3-11.
- Нецветов М. В.** Вертикальное перемещение микрочастиц в почве под действием вибрации сверхнизких частот // Грунтознавство. – 2003а. – Т. 4, № 1-2. – С. 62-65.
- Нецветов М. В.** Вибрации в лесу под действием ветра (теоретический аспект оценки частот) // Экология та ноосферологія. – 2003б. – Т. 13, № 1-2. – С. 87-92.
- Нецветов М. В.** Влияние вибраций 1-100 Гц на перемещение микрочастиц в почве // Грунтознавство. – 2006. – Т. 7, № 3-4. – С. 92-96.
- Нецветов М. В.** К вопросу о механизме влияния низко- и сверхнизкочастотных механических колебаний на проницаемость растительных мембран / М. В. Нецветов, А. В. Кузик, П. К. Хиженков // Біорізноманіття природних і техногенних біотопів України: Матеріали Всеукр. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених (19-22 листопада 2001 р.) – Донецьк: ДонНУ, 2001. – С.14-16.
- Роде А. А.** Несколько данных о минералогическом составе «кремнеземистой присыпки» в лесостепных почвах / А. А. Роде, И. И. Феофарова // Почвоведение. – 1955. – № 9.
- Роде А. А.** Подзолообразовательный процесс. – М.; Л., 1937.
- Тарадина Г. В.** Изучение влияния физических характеристик вибрации на инактивацию каталазы в растворе / Г. В. Тарадина, О. И. Доценко // Тез. докл. VII Междунар. крым. конф. «Космос и биосфера», 1-6 октября, 2007, Судак, Украина. – К., 2007. – С. 144-145.
- Травлеев А. П.** Микроморфология лессиважных процессов в байрачных лесных черноземах степной зоны Украины / А. П. Травлеев, Resio Epejo J. M., Н. А. Белова, Е. В. Кузнецов, А. К. Балалаев, В. Е. Кузнецов // Грунтознавство. – 2007. – Т. 8, № 1-2. – С. 6-24.
- Тюремнов С. И.** Об изменении механического состава глинистых пород под влиянием кислых растворов // Русский почвовед. – 1922.
- Фридланд В. М.** Об оподзоливании и иллиммеризации (обезыливания) // Почвоведение. – 1958. – № 1.
- Hartge K. H., Bläsing D., Herklotz K.** Veränderungen des Bodengefügen unter dem Einfluss mehrjähriger Baumwurzeln // Fortwiss. Cbl. – 1983. – В. 102, № 2. – P. 99-110.
- Hintikka V.** Wind-induced root movements in forest trees // Metsäntuki muslaitok julk. – 1973. – V. 76, № 2. – P. 1-56.

Надійшла до редколегії 14.11.07