

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ  
И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ,  
ВЛИЯЮЩИХ НА ЭРОДИРУЕМОСТЬ ПОЧВ

© 2018 г. Г. А. Ларионов\*, О. Г. Бушуева, А. В. Горобец, Н. Г. Добровольская,  
З. П. Кирюхина, С. Ф. Краснов, Л. Ф. Литвин, И. А. Максимова, И. И. Судницын

МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы

\*e-mail: larionov425@mail.ru

Поступила в редакцию 27.07.2016 г.

Исследовано влияние различных факторов и условий подготовки монофракционных образцов пахотного горизонта выщелоченного чернозема на эродируемость и ее связь с сопротивлением почвы разрыву (СПР). Выдерживание образцов при температуре 38°C сокращает эродируемость на 2 порядка. Высушивание образцов, напротив, увеличивает их эродируемость. Показано, что в продолжение опыта эродируемость уменьшается. Установлено, что инокулирование почвы культурами дрожжей (*Naganishia albida*, *Lipomyces tetrasporus*) привело к достоверному увеличению СПР в 1.5–1.9 раза. Стерильная почва размывалась на порядок интенсивнее нестерильной – 4.9 и 0.3 г/(м<sup>2</sup> с) соответственно. Высушивание почвы с последующим увлажнением до исходной влажности (30%) практически во всех вариантах опыта не оказывало значимого влияния на величину СПР.

**Ключевые слова:** эрозия почв, интенсивность смыва, межагрегатные связи, плотность почвы, сопротивление почвы разрыву, влажность почвы, культуры дрожжей (*Naganishia albida*, *Lipomyces tetrasporus*), выщелоченный чернозем (Luvic Chernozem (Pachic)).

DOI: 10.7868/S0032180X18030097

ВВЕДЕНИЕ

Эродируемость почвы первоначально рассматривалась [2, 27, 28, 29, 39, 43] как некоторая константа, являющаяся функцией стабильных почвенных характеристик, однако среди первых исследователей эрозии не было единого общепринятого мнения о составе таких показателей. Так Беннетт [28], исходя из наблюдений за смывом двух почв, различающихся по скорости размыва, пришел к заключению, что хорошо оструктуренные, рыхлые и богатые R<sub>2</sub>O<sub>3</sub> почвы с высокой водопроницаемостью менее подвержены эрозии, чем почвы плотные, бесструктурные, неоднородные по гранулометрическому составу и с низкой водопроницаемостью. Согласно исследованиям Миддлтона [39], эродируемость зависит от целого ряда почвенных характеристик: гранулометрического состава, содержания коллоидов, плотности, влагоемкости, набухания, усадки и пластичности. Причем ведущую роль он отводил дисперсионному фактору, под которым понимается отношение содержания пыли и глины, извлекаемых из почвы путем диспергирования водой, к их содержанию по результатам гранулометрического анализа. Бойокус [29] пришел к заключению, что скорость эрозии определяется содержанием пылеватых и глинистых фракций. Вслед за Беннетом

и Миддлтоном, Бэвер и Пелле также полагали, что на эродируемость оказывают влияние такие почвенные характеристики, как водопроницаемость и дисперсность [27, 43]. Виленский [2], соглашаясь с выводами вышеперечисленных исследователей, придавал особое значение для оценки эродируемости почв таких физических свойств почвы, как водоустойчивость структурных агрегатов, сопротивление образцов почвы сдвигу, сжатию и растяжению.

Вознесенский и Арцруни [3], исследуя эрозию на красноземных почвах, пришли к заключению, что наиболее информативными показателями для оценки эродируемости почв являются те из них, которые характеризуют дисперсное поведение почвы в воде, а именно дисперсность, агрегатность, количество коллоидов, эквивалентная влажность и отношение содержания кремнезема к R<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В работе Воронина и Кузнецова [5] по результатам исследования размыва образцов светло-каштановых почв ненарушенного строения предложено оценивать по отношению потенциальной структурности (отношению суммы фракций ≤0.001 мм к фракции ≥0.001 мм) к фактору дисперсности.

Перечисленные выше подходы давали относительные оценки эродируемости, но с появлением

эмпирических моделей эрозии появилась острая необходимость в количественном определении этого параметра. Первоначально в рамках эмпирической модели эрозии USLE эродируемость определялась как частное от деления многолетних потерь почвы со стандартной площадки с уклоном в 9% и длиной 22.1 м, содержащейся по бесменному пару, на среднесезонную величину эрозионного потенциала дождевых осадков [49]. Вскоре по количественным данным об эродируемости почв на стоковых площадках была разработана эмпирическая зависимость между эродируемостью и 15-ю почвенными параметрами, а затем и по 24-м почвенным показателям [47, 48]. Ради удобства пользователей была составлена номограмма, по которой определялась эродируемость по трем количественным и двум качественным параметрам.

Однако вскоре выяснилось, что эродируемость почв претерпевает существенные сезонные изменения. Так, было установлено [34], что на юго-западе Канады эродируемость почв достигает максимальных значений в феврале, а в августе опускается до минимума. Шестилетние полевые исследования эрозии почв на нескольких водосборах подтвердили результаты вышеприведенного исследования [40]. Позже было установлено, что наряду с сезонной динамикой эродируемости изменяется и сопротивление почвы разрыву, и механическая прочность почвенных агрегатов [30]. Более поздние исследования показали, что сезонная динамика эродируемости характерна для различных географических условий [44–46].

Вероятно, изменчивость эродируемости почв обусловлена специфическими свойствами глинистых минералов, которые обеспечивают связность почв. Гриссингер и Ассмуссен [33] при изучении влияния предшествующего увлажнения и продолжительности выдержки образцов в увлажненном состоянии на их сопротивление размыву выявили существенную зависимость эродируемости от этих факторов и пришли к заключению, что эффекты связаны с водной пленкой на поверхности глинистых частиц. Позже Гриссингер [32], исследуя образцы нарушенного строения, показал, что скорость размыва уменьшается с увеличением выдержки увлажненного образца до начала испытания, с увеличением плотности, с содержанием глинистых частиц и уменьшением их размеров. Влияние предварительного увлажнения может, как увеличить скорость размыва, так и уменьшить его, что зависит от степени ориентированности глинистых частиц. С увеличением температуры воды скорость эрозии возрастает, что было подтверждено нашими экспериментальными данными [11].

Влияние предварительного увлажнения и длительности выдержки образцов в увлажненном

состоянии отмечали также Воронин и Кузнецов [5]. Результаты их экспериментов показали следующее. Во-первых, скорость размыва зависит от степени увлажнения: воздушно-сухая почва размывалась быстрее, чем увлажненная; почвы, увлажненные до 0.75 от полевой влагоемкости показали минимальную скорость размыва, а остальные варианты, включая увлажнение до полной водовместимости, заняли промежуточное положение. Во-вторых, очень большое значение имеет продолжительность выдержки образцов в увлажненном состоянии. При ее увеличении скорость размыва уменьшалась в 4–5 раз, стабилизируясь лишь после 6–12 ч выдержки.

Сезонные изменения эродируемости почв могут быть также связаны и с биохимическим фактором, играющим важную роль в образовании и упрочнении почвенных агрегатов [9]. Влияние микроорганизмов на образование и упрочнение почвенной структуры подтверждается в целом ряде экспериментальных исследований [26, 37, 42]. Инокулирование почвенных агрегатов культурами дрожжей *Cryptococcus albidus* и *Lipomyces tetrasporus* приводит к замедлению их разрушения в склоновых потоках [12], а подавление жизнедеятельности почвенных микроорганизмов антибиотиками ускоряет размыв [10].

В связи с повсеместной сезонной изменчивостью эродируемости почвы появилась необходимость в прогнозировании этой характеристики для использования в моделях эрозии. Метод прогноза эродируемости был предложен Неарингом с соавт. [41]. Он основан на представлении о том, что уплотнение (консолидация) почвы после обработки происходит под действием эффективного давления, под которым понимается разность между полным давлением скелета, включая связанную воду, и давлением воды в порах. При отсутствии внешней нагрузки и при неполном насыщении почвы водой в ее поверхностном слое эффективное давление ( $\alpha'_p$ ) принимается пропорциональным потенциалу почвенной влаги ( $\psi$ ):

$$\alpha'_p = [-\chi\psi] = \max, \quad (1)$$

где  $\chi$  – эмпирический коэффициент. Максимальное значение эффективного давления наблюдается при заполнении 50–58% пор водой. Предельная консолидация почвы происходит при максимальном значении эффективного давления. “Неважно как низко опустится влажность почвы при ее дальнейшем высыхании, величина эффективного давления не увеличится” и, следовательно, дальнейшая консолидация почвы невозможна (цитата из статьи Неаринга с соавт. [41]). Однако из этого не следует, что изменения в почве при дальнейшем высыхании не приведут к изменению ее

эродируемости. После достижения почвой максимального значения эффективного давления, обеспечивающего предельную консолидацию почвы, при дальнейшем ее высыхании начинается объемная усадка почвенных частиц, что неизбежно приводит к появлению трещин между агрегатами и, следовательно, к нарушению связей между ними. Исследования влияния попеременного увлажнения и высушивания почвенных образцов показали, что при этом их сопротивление сдвигу уменьшается [36]. Таким образом, можно предполагать, что эродируемость консолидированной почвы при ее дальнейшем высыхании увеличивается.

Основной целью данной работы являлась проверка предположения о том, что после достижения предельной консолидации почвы ее эродируемость не остается постоянной, а увеличивается по мере высыхания. Для проверки этого предположения определяли эродируемость модельных образцов чернозема в диапазоне влажности от 30%, которая соответствует влажности предельной консолидации исследуемой нами почвы, до 9–11% от массы почвы, высушенной при 105 °С. Кроме того, в работе исследовалось влияние и ряда других факторов на эродируемость – способов предварительной подготовки образцов и динамики скорости размыва в течение опыта, а также оценки вклада инокулирования культурами дрожжей (*Naganishia albida* (бывший *Cryptococcus albidus*) [35] и *Lipomyces tetrasporus*) и высушивания на величину сопротивления образцов почвы разрыву – характеристики, тесно связанной с эродируемостью.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследовали эродируемость образцов пахотного горизонта легкоглинистого выщелоченного чернозема (Luvic Chernozem (Pachic)), отобранного в Воловском р-не Тульской обл. Содержание в почве органического вещества равно 5.79%, физической глины – 50.9%. Суммарная доля ионов кальция и магния в почвенно-поглощающем комплексе составляет 97.2% от суммы обменных оснований.

В экспериментах использовали фракцию частиц 1–2 мм, выделенную с помощью сухого просеивания. Массу навески рассчитывали путем умножения рабочего объема кассеты на заданную плотность модельного образца (1.3 и 1.5 г/см<sup>3</sup>). Перед проведением опытов воздушно-сухие навески почвы помещали в алюминиевые бюксы и увлажняли до 24% от веса воздушно-сухой почвы, что соответствует 30.1% от массы почвы, высушенной при 105 °С. Эта влажность составляет 55% от капиллярной влагоемкости, экспериментально определенной для этой фракции методом капиллярного насыщения в трубках. В дальнейшем в работе

везде приведена влажность от массы почвы, высушенной при 105 °С.

Для равномерного увлажнения навески почвы выдерживали в закрытых алюминиевых бюксах в течение 18–20 ч, после этого тщательно перемешивали и переносили на лист пергамина. Кассету с вложенным в ее донную часть деревянным вкладышем, покрытым сверху кусочком пергамина для того, чтобы было легче фиксировать момент полного размыва почвенного образца, помещали в ручной винтовой пресс. Сверху укладывали надставку такого же сечения, что и кассета высотой в 2.5 см, а затем небольшими порциями переносили в кассету навеску почвы, всякий раз разравнивая и слегка уплотняя ее пестиком прямоугольного сечения, без зазора входящим в кассету. После укладки в кассету последней порции почвы ее также разравнивали по всему сечению надставки. В надставку вставляли плунжер, который был равной ей по высоте. Затем вращением винта пресса до упора поверхность почвенного образца приводилась вровень с верхним краем кассеты. Средняя плотность образца при этом достигала заданной величины (1.3 или 1.5 г/см<sup>3</sup>).

Часть модельных образцов была подвергнута размыву без дополнительной обработки, как это делали в наших предшествующих исследованиях [11, 13, 14].

Далее часть образцов, подготовленных таким образом, помещали в термостат с температурой 38 °С и выдерживали до достижения влажности 24, 20, 15 и 10%. Затем за 2 ч до проведения опыта, образцы почвы вновь увлажняли до исходной влажности (30%) путем постепенного добавления воды в кассету. Для контроля этой части эксперимента образцы, помещенные в герметичный контейнер для предупреждения испарения из них влаги, выдерживали в термостате в течение 2.5 ч при температуре 38 °С. Таким же способом готовили образцы стерильной почвы.

Образцы, предназначенные для изучения динамики скорости размыва в продолжение опыта, высушивали до влажности 14–15%, и за 2 ч до проведения опыта их влажность доводили до исходного уровня (30%), как и в предыдущей серии опытов. Продолжительность размыва изменяли от 5 до 40 мин с шагом в 5 мин. Количество смытой почвы рассчитывали за второй и последующие 5-минутные интервалы как разность между смывом данного опыта и предыдущего.

Размыв образцов проводили в гидравлическом лотке циркуляционного типа длиной 2.5 м при ширине по дну 7.1 см. Дно и стенки лотка были гладкими (оргстекло, алюминий) для получения большей скорости потока. Кассету с почвой помещали в проем в нижней трети гидравлического

лотка и закрепляли винтом. При этом поверхность почвенного образца устанавливали на одном уровне с дном лотка. Все эксперименты проводили при температуре воды 18–20 °С, средней скорости 0.98–1.03 м/с и глубине потока 1 см. Такая глубина потока является стандартной для определения эродируемости согласно гидрофизической модели эрозии [17].

Вращением подающего винта поверхность почвы в кассете поддерживали на уровне дна лотка в продолжение всего эксперимента. В тех случаях, когда опыт прекращали до полного размыва образца, его остатки извлекали из кассеты и высушивали до постоянного веса. Количество смытой почвы определяли как разность между исходным весом образца и остатком. Интенсивность смыва ( $q$ , г/(м<sup>2</sup>·с)) рассчитывали по зависимости  $q = \frac{P}{tS}$ , где  $P$  – вес смытой почвы, г;  $t$  – время размыва образца, с;  $S$  – площадь размываемой поверхности (поверхность образца), м<sup>2</sup>.

Эродируемость почвы ( $k$ , с<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>) рассчитывали по формуле в соответствии с гидрофизической моделью эрозии [17]:

$$k = \frac{q}{v^3 \rho_0},$$

где  $q$  – интенсивность смыва, г/(м<sup>2</sup>·с);  $v^3$  – куб скорости потока, м<sup>3</sup>/с<sup>3</sup>;  $\rho_0$  – плотность воды, г/м<sup>3</sup>.

Для устранения влияния взвешенных и донных наносов на скорость размыва почвы [15, 31] вода из лотка поступала на сито (диаметр отверстий – 0.25 мм), а из него в резервуар. После каждого эксперимента сито очищали от крупных наносов. Взвешенные наносы осаждались на фильтре, изготовленном из нетканого материала и установленном в резервуаре перед патрубком, ведущим к насосу.

Приготовление проб почвы для определения ее СПР проводили аналогично подготовке образцов на размыв. Увлажненную и тщательно перемешанную почву переносили в цилиндрические кассеты, состоящие из двух скрепленных одинаковых перфорированных трубок (длина – 25 мм, диаметр – 17.7 мм). Перфорация обеспечивала равномерное испарение влаги по всей длине кассеты. Контролем служила исходная почва с влажностью 30%. Образцы почвы в кассетах подсушивали при температуре 40–43 °С до влажности 25, 20, 15 и 10%. По достижении заданной влажности почву вновь увлажняли до исходного состояния (30%). Кассеты с повторно увлажненной почвой помещали в алюминиевые боксы и пластиковый контейнер и оставляли на 18–20 ч, после чего определяли СПР. Подробное описание методики определения

СПР и схема оригинальной установки для его определения приведены ранее [16].

Исследование влияния инокулирования почвы культурами дрожжей *Naganishia albida* (КВР У-4574) и *Lipomyces tetrasporus* (КВР У-2747) на СПР проводили аналогично изучению влияния подсушивания почвы. Данные виды дрожжей были выбраны нами неслучайно – вид *N. albida* является эврибионтным и часто встречается в различных природных местообитаниях, в том числе, в верхних почвенных горизонтах, а *L. tetrasporus* – автохтонный почвенный вид, встречающийся в степной зоне, в черноземах и каштановых почвах. Особенностью этих дрожжей является формирование крупных полисахаридных капсул, размер которых может превышать размеры клетки в 2–3 раза [24]. Ранее неоднократно было показано, что почвенные дрожжи рода *Lipomyces* могут участвовать в оструктурировании почв за счет увеличения водостойчивости почвенных агрегатов, и происходит это под действием внеклеточного полисахарида [1, 20]. Отличие в подготовке образцов заключалось в их увлажнении не водой, а суспензией дрожжей с титрами  $5.3(8) \times 10^8$  и  $1.8 \times 10^8$  клеток/мл соответственно. Образцы почвы в кассетах после внесения в них культур дрожжей и контрольные варианты в течение 5 сут выдерживали в пластиковом контейнере при температуре 13–15 °С.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментов по влиянию подсушивания почвы на интенсивность смыва и эродируемость приведены в табл. 1. Прежде всего, обращает на себя внимание очень сильное влияние нагревания почвы без высушивания (в герметичном контейнере) до 38 °С в течение 2.5 ч. Так, интенсивность смыва образцов, подвергнутых размыву без предварительного нагревания, равна 60.0, а предварительно нагретой почвы – 0.29 г/(м<sup>2</sup>·с).

Для объяснения этого феномена можно использовать два подхода. Один из них связан с так называемым “защемленным воздухом”. Вода при поступлении в сухую почву, передвигается по капиллярам внутрь агрегатов и может сжимать находящийся в них воздух до нескольких атмосфер, если последний не имеет свободного выхода [4, 23]. Защемленный воздух может способствовать разрыву почвенных агрегатов. В рамках такого подхода удалось бы объяснить многие результаты проведенных экспериментов, но, к сожалению, наблюдения за процессом эрозии не дают основания принять эту гипотезу как основную. При разрушении почвенных агрегатов вследствие эвакуации защемленного в них воздуха, в водном потоке можно было ожидать появления “облаков мутности” с пузырьками воздуха над поверхностью испытуемого

**Таблица 1.** Влияние условий подготовки почвы на интенсивность смыва и эродируемость (плотность почвы – 1.3 г/см<sup>3</sup>)

| Вариант опыта                     | Влажность почвы, % | n, шт. | v, м/с | Интенсивность смыва    | s    | Cv, % | Эродируемость, с <sup>2</sup> /м <sup>2</sup> |
|-----------------------------------|--------------------|--------|--------|------------------------|------|-------|---|
|                                   |                    |        |        | г/(м <sup>2</sup> · с) |      |       |   |
| Традиционная подготовка образцов* | 30.1               | 5      | 0.98   | 60.0                   | 13.8 | 23.1  | 63.7  |
| Нагревание**                      | 30.1               | 3      | 1.03   | 0.29                   | 0.03 | 8.8   | 0.27  |
| Стерильная почва**                | 30.1               | 5      | 1.02   | 4.91                   | 1.05 | 21.5  | 4.63  |
| Высушивание                       | 24.3               | 5      | 1.01   | 1.27                   | 0.36 | 28.7  | 1.25  |
|                                   | 20.2               | 5      | 1.00   | 1.80                   | 0.45 | 24.8  | 1.80  |
|                                   | 14.0               | 5      | 1.03   | 2.70                   | 0.45 | 16.8  | 2.62  |
|                                   | 8.7                | 5      | 1.06   | 2.80                   | 0.38 | 13.5  | 2.64  |

\*Образцы размывали сразу после их изготовления.

\*\*Нагревание 2.5 ч в герметичном контейнере.

*Примечание.* Здесь и в табл. 2: v – скорость потока, s – среднее квадратическое отклонение, Cv – коэффициент вариации, n – количество измерений.

образца. Однако, как показывают наблюдения, отрыв частиц почвы происходит обычно без разрушения агрегатов и возникновения “облаков мутности”. Нередко с поверхности образца почвы смываются и переносятся в потоке целые группы агрегатов, без заметного помутнения воды в лотке, что отображено на фотографии в одной из наших работ [14]. Тогда как при разрушении агрегатов в результате сжатия заземленного в них воздуха такого явления не должно было наблюдаться. Кроме того, смываемая почва, улавливаемая на мелкое сито (размер ячеек 0.25 мм), показывает, что по размеру агрегатов она близка к использованной для изготовления образца фракции почвы 1–2 мм. Это также свидетельствует об отсутствии разрушения агрегатов заземленным воздухом.

Другой механизм разрушения межагрегатных связей обусловлен расклинивающими свойствами водной пленки, заключенной между частицами почвы [14]. Согласно физико-химической теории эффективных напряжений в грунтах, устойчивость и неустойчивость дисперсных систем, к которым относятся и почвы, определяется соотношением сил притяжения и отталкивания между частицами [21]. Силы притяжения обусловлены межмолекулярным взаимодействием (силами Ван-дер-Ваальса), сорбцией, гидрофобными взаимодействиями. Так, гидрофобные компоненты гумусовых веществ, обращенные в межпластинное пространство частиц глинистых минералов, способствуют соединению частиц и уменьшению расклинивающего давления почвенной влаги, разрушающего почвенные агрегаты в отсутствие гидрофобной поверхности [19, 25].

Источником силы отталкивания является электростатическое взаимодействие диффузных частей двойных электрических слоев соседних частиц. Увеличение концентрации ионов в зазоре между частицами при перекрытии ионных атмосфер создает локальное осмотическое давление, под влиянием которого жидкая фаза стремится затечь в прослойку между ними и раздвинуть их. Так возникает электростатическая компонента расклинивающего давления [21].

Обычно дисперсные системы находятся в термодинамическом равновесии, но в данном случае верхний слой размываемого образца почвы не испытывает внешнего давления за исключением собственного веса. Именно пленка воды диффузного генезиса способствует раздвижению агрегатов наружного слоя образца почвы на расстояние, превышающее дальность действия межмолекулярных сил (силы Ван-дер-Ваальса). В результате агрегаты верхнего слоя теряют сцепление с нижним слоем и легко захватываются потоком воды как свободные.

В свете представлений об устойчивом термодинамическом состоянии глинистых грунтов, образцы почвы, используемые нами в экспериментах, представляли собой смесь сравнительно однородных по размеру (1–2 мм) агрегатов, лишенных между собой какой-либо связи. В процессе подготовки образцов смесь агрегатов увлажняли и выдерживали в течение 18–20 ч. За это время между агрегатами возникали связи, которые вновь разрушались в процессе изготовления модельных образцов почвы, но при этом образовывались новые и более прочные контакты между частицами. Однако термодинамическое равновесие в образцах,

соответствующее их максимальной стабильности, не могло установиться за короткий промежуток времени от их изготовления до начала испытания, так как передвижение влаги в почве, преимущественно в форме диффузии и/или осмоса, процесс достаточно медленный. Поэтому скорость разрушения не вполне установившихся связей между агрегатами под действием свободной воды и, соответственно, интенсивность размыва образцов оказалась высокой. Выдержка образцов в термостате в течение 2.5 ч при температуре 38 °С без высушивания обеспечила более чем 200-кратное уменьшение эродируемости (табл. 1), что свидетельствует о возникновении связей между частицами и приобретении ими термодинамического равновесия [7, 8, 22].

Что касается высушивания модельных образцов меньше влажности, при которой происходит предельная консолидация почвы, то, как отмечалось выше, почвенный образец претерпевает усадку в целом, и, очевидно, усадке подвергаются и отдельные агрегаты, что приводит к образованию трещин между ними. Вероятно, что при этом расстояния между смежными частицами почвы увеличивается настолько, что они превышают дальность действия межмолекулярных поверхностных сил притяжения (сил Ван-дер-Ваальса). Очевидно также, что чем глубже высыхание почвы, тем больше ее усадка, и, соответственно, увеличивается количество частиц, расстояние между которыми начинает превышать дальность действия сил Ван-дер-Ваальса. При влажности от 30 до 14% отмечена линейная зависимость эродируемости от влажности (рис. 1). Однако при дальнейшем высушивании образцов почвы вплоть до влажности равной 8.7%, эродируемость не изменяется, оставаясь на уровне 2.64  $\text{с}^2/\text{м}^2$ . Из этого факта можно заключить, что в консолидированной почве далеко не все межагрегатные связи нарушаются при высыхании до данной влажности. При допущении, что в образцах почвы с исходной влажностью (30%), выдержанных при температуре 38 °С,

количество стабильных межагрегатных связей составляет 100%, то судя по изменению эродируемости, при влажности 8.7–14.0% сохраняется около 10%. Частичное сохранение связей между агрегатами при высушивании почвенных образцов можно объяснить следующим образом. При высыхании почвы происходит усадка агрегатов, вследствие чего между ними появляются трещины. Поскольку размер трещин и соответственно расстояния между агрегатами будут различными, при этом подчиняясь нормальному распределению согласно центральной предельной теореме [6], то возможно, что какая-то часть трещин между агрегатами не будет превышать дальности межмолекулярного взаимодействия. Вероятно, что количество таких трещин между агрегатами в результате высыхания почвы будет зависеть от плотности почвы. Очевидно, что эту гипотезу следует проверить экспериментально.

Таким образом, вопреки мнению Неаринга с соавт. [41], показано, что после достижения предельной консолидации почвы, ее высыхание ниже влажности 30% все же приводит к существенному увеличению эродируемости. Вместе с тем, результаты свидетельствуют, что эродируемость почвы, высушенной до влажности 14–15%, обеспечивающей предельную скорость размыва консолидированной почвы, а затем доведенной до исходной (30%), изменяется и в процессе проведения эксперимента от 20.0 до 0.66  $\text{с}^2/\text{м}^2$  (рис. 2).

Эродируемость обрабатываемых почв претерпевает постоянные изменения во времени. Наиболее радикальное увеличение эродируемости происходит в результате основной обработки, когда почва крошится и рыхлится, что приводит к разрушению почвенных агрегатов [38]. С течением времени в результате механической усадки почвы и ее консолидации (при увлажнении до полной влагоемкости) эродируемость достигает минимальных значений, но затем вновь увеличивается по мере высыхания почвы. Эти изменения эродируемости

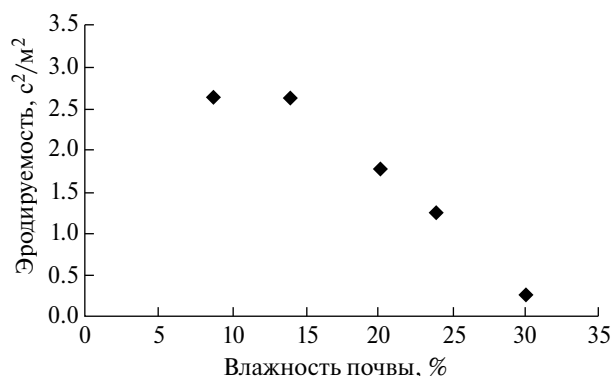


Рис. 1. Изменение эродируемости почвы при высушивании.

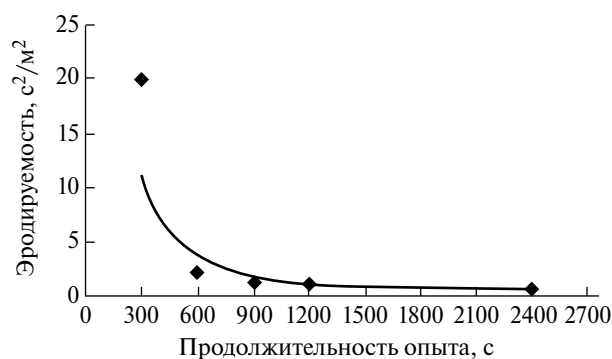


Рис. 2. Влияние продолжительности опыта на эродируемость почвы.

Таблица 2. Влияние инокулирования почвы культурами дрожжей (*N. albida*, *L. tetrasporus*) на ее сопротивление разрыву

| Плотность почвы,<br>г/см <sup>3</sup> | Вариант опыта         | n, шт. | СПР          | s    | Cv, % |
|---------------------------------------|-----------------------|--------|--------------|------|-------|
|                                       |                       |        | кПа          |      |       |
| 1.3                                   | Естественная почва    | 4      | 6.59 ± 0.80  | 0.83 | 12.6  |
|                                       | Стерильная почва      | 6      | 5.20 ± 0.65  | 0.53 | 10.2  |
|                                       | <i>N. albida</i>      | 4      | 7.73* ± 0.80 | 0.64 | 8.3   |
|                                       | <i>L. tetrasporus</i> | 5      | 9.89* ± 0.71 | 0.97 | 9.8   |
| 1.5                                   | Естественная почва    | 6      | 10.5* ± 1.10 | 1.20 | 11.5  |
|                                       | Стерильная почва      | 5      | 8.10 ± 1.20  | 1.51 | 18.7  |
|                                       | <i>N. albida</i>      | 5      | 13.4* ± 1.20 | 0.73 | 5.5   |
|                                       | <i>L. tetrasporus</i> | 5      | 15.1* ± 1.20 | 1.51 | 10.0  |

\*Достоверное различие ( $P = 0.95$ ) от варианта со стерильной почвой.

характерны для достаточно длительных интервалов времени.

Между тем, в процессе взаимодействия водных потоков с почвой (то есть в период проявления эрозии) эродируемость почвы изменяется очень резко. Так, во втором 5-минутном интервале опыта эродируемость, по отношению к первому интервалу, сократилась в 9 раз, а в третьем — в 15 раз.

Следовательно, эродируемость почвы изменяется не только за большие интервалы времени, но и в сравнительно короткое время выпадения ливневых осадков. Очевидно, что это должно приниматься во внимание при разработке физически обоснованных моделей эрозии почв.

Почва как биокосная система претерпевает постоянные изменения во времени под влиянием не только антропогенного фактора и метеорологических условий, но и биогенного воздействия. Рост и развитие полевых культур оказывает большое влияние на противоэрозионную стойкость почвы благодаря армирующему действию корневых систем. Этот аспект влияния посевов на эродируемость почвы традиционно учитывается в рамках моделей эрозии, тогда как оценка вклада микроорганизмов остается недостаточно обоснованной.

В связи с этим представляет интерес изучение влияния жизнедеятельности микроорганизмов на такую важную для эрозии характеристику как СПР. Среди комплекса физико-химических связей между почвенными агрегатами и частицами присутствуют биохимические составляющие — особую роль в образовании агрегатов играют микроорганизмы и продукты их метаболизма [9]. Влияние микроорганизмов на образование и упрочнение почвенной структуры подтверждается в целом ряде исследований и экспериментов [26, 37, 42]. О существенности влияния бактерий и дрожжей на механическое упрочнение почвенных агрегатов свидетельствуют результаты экспериментов

по истиранию агрегатов при их транспортировке водными склоновыми потоками [12]. Инокулирование почвенных агрегатов культурами дрожжей (*N. albida*, *L. tetrasporus*) способствовало уменьшению весовых потерь агрегатов в 1.5–2 раза относительно стерильных. Ранее не менее эффективное ослабление межагрегатных связей, обусловленное подавлением развития мицелиальных грибов и актиномицетов антибиотиком, было выявлено в опытах по размыву светло-каштановых почв в гидравлическом лотке [10].

Для оценки влияния микроорганизмов на СПР, то есть на прочность внутри- и межагрегатных связей, были использованы дрожжи *N. albida* и *L. tetrasporus*, выбранные как доминирующие в данном типе почв. В процессе жизнедеятельности дрожжи способны синтезировать внеклеточные полисахариды, создавая вязкую среду с высокой гигроскопичностью, а также образовывать кислые полисахариды, стимулируя агрегирование и увеличивая водопрочность агрегатов. В опытах использовались стерильные образцы, образцы почв в естественном состоянии, а также инокулированные и инкубированные в течение 5 сут при температуре 13–15 °С (табл. 2).

Результаты экспериментов свидетельствуют о существенном влиянии исследованных культур дрожжей на СПР — оно увеличивается в 1.8–1.9 раза для образцов, инокулированных *L. tetrasporus*, и в 1.5–1.7 раза при внесении культур *N. albida*, при плотности почвы в 1.3 и 1.5 г/см<sup>3</sup> соответственно. Различия между средними значениями СПР для всех серий опытов статистически достоверны при уровне доверительных вероятностей не менее 0.90.

Таким образом, опыты с образцами, выдерживавшимися в течение пяти суток после инокулирования, показали, что наименьшим СПР обладают стерильные почвы. Образцы, инокулированные

**Таблица 3.** Влияние высушивания почвы с плотностью 1.3 г/см<sup>3</sup> на ее сопротивление разрыву (кПа)

| Статистические показатели              | Влажность почвы, % |       |      |      |      |
|--|--------------------|-------|------|------|------|
|  | 30                 | 25    | 20   | 15   | 10   |
| Среднее ( <i>M</i> )                   | 5.35               | 8.75* | 5.96 | 6.11 | 5.56 |
| Медиана ( <i>Med</i> )                 | 5.42               | 8.73  | 5.33 | 6.27 | 5.89 |
| Стандартное отклонение ( <i>s</i> )    | 0.75               | 0.64  | 1.33 | 1.48 | 1.16 |
| Максимум ( <i>max</i> )                | 6.72               | 10.1  | 8.43 | 8.38 | 7.46 |
| Минимум ( <i>min</i> )                 | 3.96               | 7.37  | 4.49 | 4.21 | 3.75 |
| Коэффициент вариации ( <i>Cv</i> , %)  | 13.9               | 7.3   | 22.4 | 24.2 | 20.8 |
| Количество измерений ( <i>n</i> , шт.) | 13                 | 12    | 13   | 12   | 12   |

\*Достоверное различие ( $P = 0.95$ ) от варианта с исходной влажностью (30%).

дрожжами *N. albida* и *L. tetrasporus*, имели максимальное СПР, а естественные (нестерильные) почвы занимали промежуточное положение. Единую направленность влияния микроорганизмов как на СПР, так и на противоэрозионную стойкость подтверждают и опыты со стерильной почвой. Так образцы стерильной почвы, размывались на порядок быстрее – 4.91 г/(м<sup>2</sup> с), чем контрольные нестерильные образцы – 0.29 г/(м<sup>2</sup> с) (табл. 1).

Ранее нами [18] была установлена тесная связь между эродированностью и СПР. Данные по оценке влияния подсушивания почвы с последующим ее увлажнением до исходной влажности (30%) на СПР приведены в табл. 3. Величина СПР мало зависела от влажности почвы при подсушивании. Только в варианте опыта с влажностью 25% СПР было в 1.6 раза значимо ( $P = 0.95$ ) больше, чем в почве с исходной влажностью (30%), что указывает на необходимость дальнейшего экспериментального исследования.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере пахотного горизонта чернозема показано, что его эродированность находится в постоянной динамике, обусловленной преимущественно изменением степени устойчивости дисперсных систем, к которым относятся почвы, обогащенные глинистыми минералами.

Предельная консолидация почвы достигается при заполнении 50–58% пор водой [41], соответствует минимальной эродированности, которая для исследуемой почвы наблюдается при влажности 30%. При высыхании начинается процесс растрескивания почвенной массы, вследствие чего количество и прочность межагрегатных связей уменьшается, а эродированность почвы увеличивается. Такое явление прослеживается в диапазоне влажности почвы от 30 до 9%. При влажности от 30 до 14% отмечена линейная зависимость

эродированности от влажности. При этом кратковременное увлажнение почвы до исходной влажности (30%) на начало эксперимента не приводит к восстановлению начальных значений эродированности. Согласно исследованиям [5] заметное уменьшение эродированности наблюдается на 5–6-е сутки после увлажнения сухой почвы.

Установлено, что эродированность почвы сильно изменяется в зависимости от продолжительности размыва образцов, что естественно следует учитывать при разработке моделей дождевой эрозии.

Инокулирование почвы культурами дрожжей (*Naganishia albida* и *Lipomyces tetrasporus*) привело к достоверному увеличению СПР в 1.5–1.9 раза.

Показано, что высушивание почвы с последующим ее увлажнением до исходной влажности (30%) практически во всех вариантах опыта не оказывало значимого влияния на величину СПР. Возможно, это связано с тем, что в этих опытах разрывы происходили на контактах между агрегатами, не затрагивая сами агрегаты.

**Благодарность.** Работа выполнена по плану НИР Научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева и при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-05-00474а), микробиологическая часть работы выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-50-00029.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабьева И.П., Моавад Х. Почвенные дрожжи рода *Lipomyces* как агенты оструктурирования почв // Почвоведение. 1973. № 8. С. 144–146.
2. Виленский Д.Г. Свойства почв, определяющие податливость их эрозии и методы исследования этих свойств // Борьба с эрозией почв в СССР. 1938. С. 111–130.



3. *Вознесенский А.С., Арцуруни А.Б.* Влияние физико-химических свойств почвы на поверхностный смыв как фактор поверхностного смыва // Борьба с эрозией почв в СССР. 1938. С. 131–154.
4. *Воронин А.Д., Витязев В.Г.* Характеристика энергетики воды в некоторых основных типах почв европейской части СССР // Жизнь Земли. Сб. науч. тр. Музея земледования МГУ. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1974. Вып. 10. С. 146–152.
5. *Воронин А.Д., Кузнецов М.С.* Опыт оценки противоэрозионной стойкости почв // Эрозия почв и русловые процессы. 1970. Вып. 1. С. 99–115.
6. *Гмурман В.Е.* Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 1998. 479 с.
7. *Дерягин Б.В.* Теория устойчивости коллоидов и тонких пленок. М.: Наука, 1986. 205 с.
8. *Дерягин Б.В., Чураев Н.В.* Смачивающие пленки. М.: Наука, 1984. 137 с.
9. *Звягинцев Д.Г.* Взаимодействие микроорганизмов с твердыми поверхностями. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1973. 215 с.
10. *Кузнецов М.С.* О влиянии предварительного увлажнения на противоэрозионную стойкость светло-каштановых почв Ергеней (исследование образцов нарушенного строения) // Вестник Моск. ун-та. Сер. VI. Биология, почвоведение. 1967. № 3. С. 91–99.
11. *Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф.* Влияние температуры воды и влажности почвы на эродируемость образцов чернозема (модельный опыт) // Почвоведение. 2014. № 7. С. 890–896.
12. *Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Литвин Л.Ф., Максимова И.А.* Разрушение почвенных агрегатов в склоновых потоках // Почвоведение. 2007. № 10. С. 1263–1269.
13. *Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Литвин Л.Ф.* Эродируемость модельной почвы различной плотности // Почвоведение. 2011. № 8. С. 995–999.
14. *Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Литвин Л.Ф., Краснов С.Ф.* Оценка вклада сил негидравлической природы в нарушение связей между почвенными частицами в процессе водной эрозии // Почвоведение. 2016. № 5. С. 593–598. DOI: 10.7868/S0032180X16050117.
15. *Ларионов Г.А., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Литвин Л.Ф.* Влияние взвешенных наносов на эродируемость почв // Почвоведение. 2008. № 7. С. 871–876.
16. *Ларионов Г.А., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф., Горобец А.В., Судницын И.И.* Влияние плотности почвы, сопротивления разрыву и инфильтрации воды на скорость разрушения межагрегатных связей // Почвоведение. 2017. № 3. С. 354–359. DOI: 10.7868/S0032180X17010099.
17. *Ларионов Г.А., Краснов С.Ф.* Вероятностная модель размыва почв и связанных грунтов // Почвоведение. 2000. № 2. С. 235–242.
18. *Ларионов Г.А., Литвин Л.Ф., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Горобец А.В., Бушуева О.Г.* Теоретические и экспериментальные исследования поверхностной эрозии // Эрозия почв и русловые процессы. 2015. Вып. 19. С. 35–57.
19. *Милановский Е.Ю.* Гумусовые вещества почв как природные гидрофобно-гидрофильные соединения М.: ГЕОС, 2009. 186 с.
20. *Моавад Х., Бабьева И.П., Горин С.Е.* Агрегация почв под действием внеклеточного полисахарида *Lipomyces lipofer* // Почвоведение. 1976. № 9. С. 65–68.
21. *Осинов В.И.* Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах // Грунтоведение. 2013. № 2. С. 3–34.
22. *Перевертаев В.Д., Мецик М.С.* Исследование адсорбции паров воды на поверхности кристаллов слюды // Коллоидный журнал. 1966. Т. 28. № 2. С. 254–259.
23. *Судницын И.И.* Движение почвенной влаги и водопотребление растений. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 255 с.
24. *Чернов И.Ю.* Дрожжи в природе. Москва: Товарищество научных изданий КМК, 2013. 336 с.
25. *Шейн Е.В., Милановский Е.Ю.* Роль и значение органического вещества в образовании и устойчивости почвенных агрегатов // Почвоведение. 2003. № 1. С. 53–61.
26. *Bab'eva I.P., Chernov I. Yu.* Geographical Aspects of Yeast Ecology // Phisiol. Gen. Biol. Rev. 1995. V. 9. P. 1–54.
27. *Baver L.D.* Some factors effecting erosion // Agricultural Engineering. 1933. V. 14. P. 51–52.
28. *Bennett H.H.* Some comparisons of the properties of humid-tropical and humid-temperate American soils, with special reference to indicated relations between chemical composition and physical properties // Soil Science. 1926. V. 21. P. 349–375.
29. *Vouyucos G.J.* The clay ratio as a criterion of susceptibility of soils to erosion // Jour. Amer. Soc. Agron. 1935. V. 27. P. 738–741.
30. *Coote D.R., Malcolm-McGovern C.A., Wall G.J., Dickinson W.T., Rudra R.P.* Seasonal variation of erodibility indices based on shear strength and aggregate stability in some Ontario soils // Can. J. Soil Sci. 1988. V. 68. P. 405–416.
31. *Foster G.R.* Modeling the erosion process // Eds. C.T. Haan, H.P. Johnson, D.L. Brakenslek. Hydrologic Modeling of Small Watersheds. ASAE Monograph. St. Joseph, MI. 1982. № 5. P. 297–380.
32. *Grissinger E.H.* Resistance of selected clay systems to erosion by water // Water Resour. Res. 1966. V. 2. № 1. P. 131–138.

33. *Grissinger E.H., Asmussen L.E.* Channel stability in undisturbed cohesive soils // *J. Hydr. Div. ASCE*. 1963. V. 89. № 6. P. 259–264.
34. *Kirkby P.C., Mehuys G.R.* The seasonal variation of soil erosion by winter in South-Western Quebec // *Canadian J. Soil Science*. 1987. V. 67. P. 55–63.
35. *Liu X.-Z., Wang Q.-M., Goker M., Groenewald M., Kachalkin A.V., Lumsch H.T., Millanes A.M., Wedin M., Yurkov A.M., Boekhout T., Bai F.-Y.* Towards an integrated phylogenetic classification of the *Tremellomycetes* // *Studies in Mycology*. 2015. V. 81. P. 85–147.
36. *Ma R., Cai C., Li Z., Wang J., Xiao T., Peng G., Yang W.* Evaluation of soil aggregate microstructure and stability under wetting and drying cycles in two Ultisols using synchrotron-based X-ray micro-computed tomography // *Soil and Tillage Research*. 2015. V. 149. P. 1–11.
37. *Martin J.P., Ervin J.O., Shepherd R.A.* Decomposition and aggregating effect of fungus cell material in soil // *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 1959. V. 23. P. 217–220.
38. *Meyer L.D., Harmon W.C.* Soil erosion and sediment characteristics of typical soils and land use in the Goodwin Creek catchment // *Stream Channel Stability – Appendix G*. 1981. P. G2–G64.
39. *Middleton H.E.* Properties of soils which influence soil erosion // *USDA. Technical Bulletin*. 1930. № 178. 16 p.
40. *Mutchler C.K., Carter C.E.* Soil erodibility variation during the year // *Transactions of the ASAE*. 1983. V. 26. P. 1102–1104.
41. *Nearing M.A., West L.T., Brown L.C.* A Consolidation Model for Estimating Changes in Rill Erodibility // *Trans. of ASAE*. 1988. V. 31. № 3. P. 696–700.
42. *Park E.-J., Sul W.J., Smucker A.J.* Glucose additions to aggregates subjected to drying/wetting cycles promote carbon sequestration and aggregate stability // *Soil Biology and Biochemistry*. 2007. V. 39. № 11. P. 2758–2768.
43. *Pelle T.C.* The Relation of Certain Physical Characteristics to the Erodibility of Soils // *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 1937. V. 2. P. 97–100.
44. *Rejman J., Turski R., Paluszek J.* Spatial and temporal variations in erodibility of Loess Soil // *Soil and Tillage Research*. 1998. V. 46. P. 61–68.
45. *Sanchis M.P.S., Torri D., Borselli L., Poesen J.* Climate effects on soil erodibility // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2008. V. 33. № 7. P. 1082–1097.
46. *Torri D., Poesen J., Borselli L.* Predictability and uncertainty of the soil erodibility factor using a global dataset // *Catena*. 1997. V. 31. P. 1–22.
47. *Wischmeier W.H., Johnson C.B., Cross B.V.* A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites // *Jour. Soil and Water Conservation*. 1971. V. 26. P. 189–193.
48. *Wischmeier W.H., Mannering J.V.* Relation of soil properties to its erodibility // *Soil Sci. Soc. Amer.* 1969. V. 33. P. 131–137.
49. *Wischmeier W.H., Smith D.D.* Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: Guide for selection of practices for soil and water conservation. Washington. USDA. Agriculture Handbook. 1965. № 282. 47 p.