

АКАДЕМИЯ НАУК
НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ



П.В.ВЕРШИН И Н

ПОЧВЕННАЯ СТРУКТУРА
И УСЛОВИЯ
ЕЕ ФОРМИРОВАНИЯ

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
1958

А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р

НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ.



П. В. ВЕРШИНИН

ПОЧВЕННАЯ СТРУКТУРА
И УСЛОВИЯ ЕЕ
ФОРМИРОВАНИЯ



ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
Москва • 1958 • Ленинград

Редактор
доктор сельскохозяйственных наук
С. И. Долгов

ВВЕДЕНИЕ

Обработка почв применялась еще на заре земледельческой культуры. Хотя эта обработка была примитивна, так же как и орудие обработки — заостренный сук, тем не менее она была активным вмешательством в жизнь почвы. Под влиянием обработки в первую очередь менялся физический режим почвы. С развитием человеческого общества и земледельческой культуры изменялись орудия обработки почв, а вместе с тем и вмешательство человека в жизнь почвы становилось все более и более могучим. В настоящее время влияние обработки почвы на урожай сельскохозяйственных растений настолько очевидно, что идеи получения урожаев с необработанных почв исключаются, подобно идеям создания вечного двигателя.

Обработка изменяет рыхлость почвы, а вместе с тем и отношение ее к воде, теплу, воздуху. Но хорошо также известно, что в природных условиях все явления жизни почвы взаимосвязаны. Поэтому изменение физических условий в почве оказывает влияние на биологические и химические свойства самой почвы, что отражается на накоплении почвой необходимых для растений питательных веществ, а вследствие этого на состоянии самого растения.

Правильная обработка почв направляет все эти изменения в сторону, благоприятную для жизни и развития растений.

Под влиянием выпадающих осадков и естественной уплотняемости почв физический режим, созданный механической обработкой, ухудшается, и для растений, осо-

бенно чувствительных к плохим физическим условиям, в период их роста приходится те или иные приемы обработки почвы повторять несколько раз.

Поддержание благоприятных физических условий в почве на определенном, необходимом для данной культуры уровне облегчается и физический режим улучшается, если почва будет обладать водопрочной мелкозернистой структурой. Для одних почв такая водопрочная структура является даром природы. Задача сельскохозяйственного производства на них выражается в поддержании и улучшении ее состояния. Для других почв такую благоприятную структуру необходимо создавать. В том и другом случае важно знать законы образования в почве водопрочной мелкокомковатой или зернистой почвенной структуры. В высокоразвитом культурном хозяйстве улучшение почвенной структуры должно составлять часть мероприятий по поддержанию и развитию плодородия почв.

Исходя из этого и учитывая, что по конкретным вопросам структуры почв давно уже не выпускалось книг для широкого круга специалистов сельского хозяйства, мы сочли необходимым в научно-популярной форме изложить условия формирования структуры в почве на основе современных физических, химических и биологических представлений о них.

Насколько нам удалось выполнить эту задачу, будет видно из тех критических замечаний, которые последуют на эту книгу и которые нами будут приняты с благодарностью.

Глава I

ПОНЯТИЕ О ПОЧВЕННОЙ СТРУКТУРЕ, ЕЕ АГРОНОМИЧЕСКОЙ ЦЕННОСТИ И МЕТОДАХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Понятие о структурном строении почвы

Почвой называется поверхностный рыхлый слой земли, образовавшийся из горных пород под воздействием воды, воздуха, растительных и животных организмов и обладающий плодородием.

Почвенная масса или почвенное «тело» состоит из разных частей: твердой, жидкой и газообразной. Твердая часть состоит из обломков горных пород, обломков минералов, растительных и животных остатков различной степени измельчения и разложения, разнообразных нерастворимых химических соединений, живого вещества в виде насекомых, червей, микроорганизмов (бактерий, грибов, актиномицетов и простейших), бактериальной и грибной слизи.

Жидкая часть почвы состоит из почвенной влаги и растворенных в ней минеральных и органических веществ (почвенный раствор). Газообразная часть почвы, или почвенный воздух, удерживается силами притяжения у поверхности твердых частиц, а также находится в свободном состоянии в незаполненных водой крупных промежутках и капиллярах между твердыми частицами. Под влиянием биологических почвенных процессов состав этого воздуха несколько изменяется (увеличивается содержание CO_2 и уменьшается содержание O_2).

Размеры частиц, из которых состоит твердая часть почвы, могут быть определены различными путями. Частицы до 0.25 мм, а в отдельных случаях до 0.1 мм,

отделяются путем просеивания почвенной пробы через набор сит, диаметры отверстий которых известны. Размеры частиц от 0.1 до 0.001 мм определяются под микроскопом. В почвоведении принято определять размеры твердых частиц, из которых состоит почва, косвенным путем, методом отмучивания частиц в воде с применением уравнения Стокса, связывающего скорость оседания частиц в жидкости с их размерами. Чем мельче почвенные частицы, тем медленнее они оседают при взбалтывании в воде. Поэтому по скорости осаждения частиц в воде можно судить о их размерах.

Беря пипеткой определенные объемы взмученных в воде почвенных частиц с определенной глубины через определенные промежутки времени и выпаривая воду, можно, пользуясь уравнением Стокса, определить (в процентном соотношении), сколько и каких частиц меньше 0.25 мм содержится в данной почве. Дополнив эти сведения данными для частиц крупнее 0.25 мм, полученными на ситах, мы можем полностью судить о размерах твердых частиц и их количественных соотношениях. Этот метод определения размеров почвенных частиц при помощи сит и пипетки получил широкое распространение в почвоведении.

При установлении размеров почвенных частиц всегда должна быть уверенность в том, что почва действительно разделена на отдельные частицы. Дело в том, что в большинстве случаев частицы в почве не находятся раздельно, а слипаются в комочки или агрегаты, и требуется особая обработка почвенного образца, чтобы разрушить эти агрегаты. Для этих целей образец почвы, приготовленный для анализа, обычно растирается, кипятится в колбе с водой, обрабатывается слабыми растворами соляной кислоты, затем щелочи или даже перекиси водорода.

За исключением почв песчаных и супесчаных, агрегатное состояние почвы является общим для всех почв.

Твердая часть почвенной массы, как уже указывалось, состоит из минеральных частиц различной величины, живого и мертвого органического вещества. Эти частички, независимо от их размеров, можно назвать первичными почвенными частицами.

Первичные почвенные частицы, слипаясь или склеиваясь органическими и минеральными почвенными кле-

ями в комочки или агрегаты разных размеров, образуют почвенную структуру.

В настоящее время можно привести такое укрупненное разделение почвенной структуры по размерам агрегатов:

1. Глыбистая структура. Размеры агрегатов более 10 мм.

2. Комковато-зернистая структура, или макроструктура. Размеры агрегатов от 10 до 0.25 мм.

3. Микроструктура с подразделениями: а) на грубую микроструктуру или пылеватую структуру с размерами агрегатов от 0.25 до 0.001 мм, б) тонкую микроструктуру или структуру коллоидов с размерами агрегатов меньше 0.001 мм.

Почвенная макроструктура и ее агрономическая ценность

Первоначальное представление о почвенной структуре (макроструктуре) возникло в глубокой древности. Упоминание о рыхлом строении почвы встречается еще у Гомера. В более позднее время Лукреций Кар в своей поэме «О природе вещей» также упоминает о комковатом строении почвы. Однако научно-агрономическое обоснование необходимости структурного строения почвы было дано только во второй половине XIX в. Вольни и его школой. Исключительно важные исследования по вопросам почвенной структуры принадлежат основоположникам русского почвоведения В. В. Докучаеву и в особенности П. А. Костычеву и их ученикам и последователям — П. Ф. Баракову, А. А. Фадееву, А. Н. Сабанину и В. Р. Вильямсу.

В начале XX в. в связи с развитием учения о почвенных коллоидах вошло в научную агрономическую литературу понятие о почвенной микроструктуре, или структуре почвенных коллоидов. В отличие от нее указанная выше почвенная структура по предложению М. Х. Пигулевского (1925) стала называться агрономической структурой или макроструктурой.

Исследования агрономического значения почвенной структуры были начаты с изучения влияния размеров агрегатов на физические свойства почвы и урожай сельскохозяйственных растений. Вольни первый установил, что агрономически ценными являются агрегаты разме-

ром от 10 до 0.25 мм. Почва, состоящая из агрегатов меньше 0.25 мм, обнаруживает свойства бесструктурной: она медленно пропускает воду вовнутрь, т. е. слабо запасает ее, и не может использовать выпадающие осадки. Такая почва быстро высыхает. Будучи увлажненной, она содержит мало воздуха. Температурные колебания на такой почве более резкие, чем на структурной. Во всех случаях вегетационные опыты, поставленные Вольни, всегда приводили к одинаковым результатам для целого ряда культур, а именно: структурная почва всегда давала урожай выше, чем бесструктурная. Для примера приведем не-

Т а б л и ц а 1

Урожай сельскохозяйственных растений на структурной и распыленной почве (по результатам опытов в сосудах)

Название растения	Состояние почвы	Урожай						Количество зерен	Количество соломы и мякины
		количество колосьев или стрчков	количество побегов и стеблей	количество зерен	вес зерен, г	вес соломы, г	вес мякины, г		
Яровая пшеница	Распыленная . .	9	9	84	1.8	9.9	0.4	100	100
	Структурная . .	11	11	152	4.0	11.5	0.6	222.2	117.5
Рапс яровой	Распыленная . .	68	7	—	1.1	7.0	1.1	100	100
	Структурная . .	80	7	—	3.6	8.0	2.3	360.0	127.2
Горох	Распыленная . .	12	7	26	6.2	19.2	2.6	100	100
	Структурная . .	16	7	40	9.0	19.8	3.2	145.0	109.6
Белый люпин	Распыленная . .	10	7	12	5.0	11.4	6.4	100	100
	Структурная . .	14	7	32	16.0	26.4	15.4	320.0	224.7

сколько данных (табл.1) из обширных материалов Вольни (1896).

В опытах Вольни бралась суглинистая почва. После высушивания до воздушно-сухого состояния почвенный образец делился на две части. Одна часть растиралась в пыль и просеивалась через сито с отверстиями 0.25 мм, другая часть пропусклась через сита 0.5 и 4 мм. Отбирались агрегаты размером от 0.5 до 4 мм и набивались в сосуды. В первом случае почва называлась распыленной, во втором — структурной. Опыт ставился в обыкновенных цветочных горшках; почва удобрялась растертым в порошок конским навозом и минеральными удобрениями. Влажность во всех случаях была равна 50% от полной влагоемкости, рассчитанной на растертую почву. Полив производился сверху.

В последующее время изучение влияния размеров почвенных агрегатов на физические условия в почве продолжалось разными исследователями. В табл. 2 приводятся данные, полученные А. Г. Дояренко (1924) в лабораторных условиях.

Большие исследования по выяснению роли различных агрегатов в урожае сельскохозяйственных растений произ-

Т а б л и ц а 2

Водно-физические свойства почвы в зависимости от размеров агрегатов (почва — подзолистая суглинистая)

Размеры агрегатов	Капиллярная порозность ¹		Некапиллярная порозность, %		Скорость капиллярного поднятия, мм в сутки	Испаряемость, мм в час
	абс.	%	абс.	%		
Меньше 0.5 мм	44.8	92.0	2.7	8.0	117.5	1.58
0.5—1.0 мм	25.5	51.0	24.5	49.0	20.0	1.26
1.0—2.0 »	25.1	46.0	29.6	54.0	9.0	1.15
2.0—3.0 »	24.5	41.0	35.1	59.0	6.0	0.96
3.0—5.0 »	23.9	37.0	38.7	63.0	2.5	0.6

¹ В настоящей работе встречаются два термина — «порозность» и «пористость» — для выражения одного и того же свойства почв и почвенных комков. Термин «порозность» применяется в старых работах, «пористость» — в современных работах.

вел В. В. Квасников (1927, 1928). В табл. 3 приводятся данные В. В. Квасникова, полученные в бездонных сосудах, вмещающих 10 кг обыкновенного суглинистого чернозема (опытное поле Самарского сельскохозяйственного института). Сосуды наполнялись агрегатами, отсеянными из семнадцатилетней залежи. Влажность при закладке опытов (сосуды зарывались в почву, почва в сосудах была в уровень с естественной почвой) составляла 60% от полной влагоемкости; сосуды не поливались, использовались только природные осадки.

Т а б л и ц а 3

**Влияние структуры почвы на урожай проса
в полевых условиях. Опыт 1924 г.**

Вариант опыта	Наземный урожай, г	Средний вес чистого зер- на, г	Средний вес соломы и мяжины, г	Средний вес корней, г	Общий уро- жай, г	Количество зерна от общего уро- жая, %	Транспи- рационный коэффициент
60% агрегатов от 0 до 1 мм + 40% от 2 до 3 мм	14.0	5.01	8.99	2.27	16.27	30.78	352
30% агрегатов от 0 до 1 мм + 70% от 2 до 3 мм	18.4	7.50	10.90	2.79	21.19	35.22	305
15% агрегатов от 0 до 1 мм + 85% от 2 до 3 мм	21.4	9.35	12.05	3.18	24.58	38.63	298
100% агрегатов от 2 до 3 мм	30.23	14.65	15.57	4.09	34.32	42.36	265
100% агрегатов от 5 до 7 мм	25.50	11.86	13.64	3.78	22.29	40.50	277

Примечание. В табл. 3 и 4 знак 0 — условное обозначение, под ним следует понимать самые мелкие агрегаты.

Из данных табл. 3 видно, что наивысший урожай проса наблюдался на агрегатах размером от 2 до 3 мм. Прибавление пыли и агрегатов до 1 мм уменьшало урожай. Аналогичные данные получены автором в 1926 и 1927 гг.

В. В. Квасниковым подмечено, что концентрация электролитов и осмотическое давление почвенного рас-

твор тесно связаны с размером агрегатов, как это видно из табл.4.

Почвенные образцы, составленные из агрегатов размером от 2 до 1 мм, дали наибольшую концентрацию почвенного раствора и показали наибольшее осмотическое давление.

Т а б л и ц а 4

Влияние структуры почвы на концентрацию электролитов и осмотическое давление почвенного раствора

Размеры агрегатов	Концентрация электролитов, г на 1 л почвенного раствора		Осмотическое давление почвенного раствора, атм.	
	среднее абсолютное	относительное	среднее абсолютное	относительное
3—2 мм . . .	3.1	134.8	1.4	140
2—1 » . . .	3.7	160.9	1.5	150
1—0.5 » . . .	3.5	152.2	1.5	150
0.25—0 » . . .	2.7	117.4	1.2	120
3.0—0 » . . .	2.3	100	1.0	100

В последующее время агрономическая и в особенности агрофизическая оценка различных по размерам агрегатов производилась рядом авторов. На рис. 1 показана зависимость капиллярного поднятия воды от размера почвенных агрегатов, установленная С. И. Долговым (1949) в лабораторных условиях.

На рис. 1 видно, что агрегаты размером от 2 до 1 мм подняли воду по сравнению с другими агрегатами на меньшую высоту. Мало от них отличаются агрегаты до 10 мм, но резко отличаются пылеватые частицы меньше 0.25 мм. На рис. 2 приведены данные того же автора. Сравнивается испарение у двух образцов аллювиальной суглинистой почвы, взятых из зернистой поймы р. Москвы. Один образец (I) истерт в порошок, второй тоже истерт, но сверху на него насыпан структурный слой толщиной 3 см. Над образцами создавался слабый ветер, 2 м/сек.

Из рис. 2 следует, что почва, прикрытая агрегатами, испаряет воды значительно меньше той, у которой поверхность распылена. На рис. 3 показано распределение влажности по глубине у указанных на рис. 2 образцов после опыта.

Как видно из рис. 3, распределение влажности по глубине у двух образцов почвы резко различное. Бес-

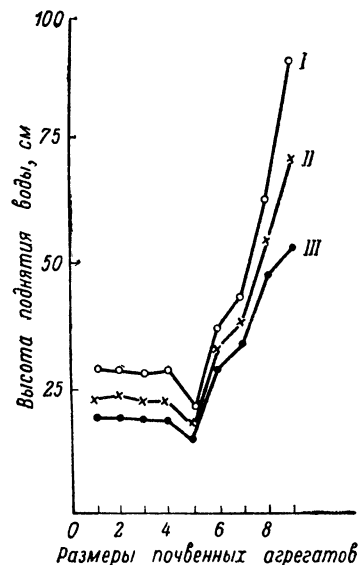


Рис. 1. Зависимость капиллярного поднятия воды от размера почвенных агрегатов.

I — от 10 до 7 мм, 2 — 7—5 мм, 3 — 5—3 мм, 4 — 3—2 мм, 5 — 2—1 мм, 6 — 1—0.5 мм, 7 — 0.5—0.25 мм, 8 — 0.25—0.1 мм, 9 — меньше 0.1 мм. Время капиллярного поднятия воды I — 152 часа; II — 94 часа, III — 48 часов.

структурная почва, прикрытая сверху слоем агрегатов толщиной 3 см, значительно экономит влагу по сравнению с почвой, поверхность которой распылена. Эти результаты полностью совпадают с наблюдениями Измаильского. По его данным, сразу же после дождя в пахотном слое влажность была на распыленной почве 7.13%, на такой же структурной почве — 10.62%. Спустя сутки на уплотненной — 12.75%, на структурной — 18.41%. Спустя трое суток на уплотненной — 9.25% (примерно одна треть испарилась), на структурной — 18.55% (осталась без изменения). В другом случае при выпадении осадков сразу наблюдалась влажность на уплотненной почве 12.3%, на рыхлой — 16.4%. Через трое суток на уплотненной — 7.2% (испарилась почти половина), на рыхлой — 18.9% (изменилась мало).

А. И. Куртнер (Куртнер и Романова, 1935), изучавший зависимость испарения бесструктурной почвой и почвой, покрытой агрегатами различного строения, пришел к выводу, что уменьшение испарения воды почвой

зависит от физического строения агрегатов структурного слоя и толщины самого слоя (рис. 4).

А. И. Куртнер дает уравнение $V = \frac{a}{h} + b$, где a — коэффициент диффузии паров воды, h — толщина структурной крыши, b — константа экономии на испарение, зависящая от размеров агрегатов и их порозности, V — отношение испарения к испарению со свободной

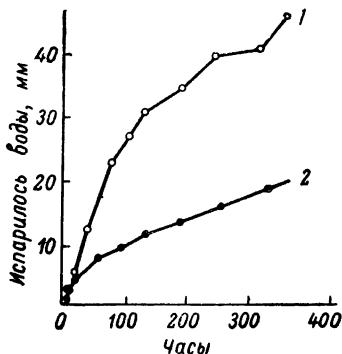


Рис. 2. Ход испарения влаги при ветре 2 м/сек. на аллювиальной суглинистой почве с зернистой поймы р. Москвы.

1 — распыленная почва, 2 — почва, сверху на 3 см мелкокомковатая

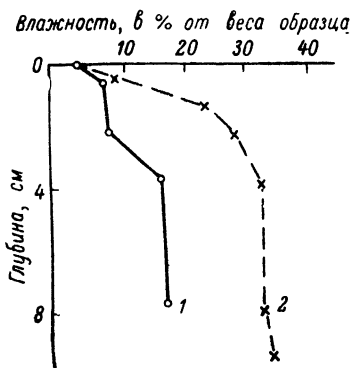


Рис. 3. Распределение влажности по глубине в аллювиальной суглинистой почве после длительного испарения при ветре 2 м/сек.

1 — распыленная почва после испарения в течение 356 час.; 2 — почва, на глубину 3 см структурная, после испарения в течение 444 часов.

водной поверхности. Выводы Куртнера подтверждаются и результатами Б. Д. Михайлова (см.: Рыжов, 1949). В табл. 5 приводятся данные по испарению воды при различном сложении верхнего слоя почвы. Наблюдения велись в сосудах-испарителях диаметром 36 см и высотой 100 см. Почва бралась в ненарушенном состоянии, а верхние слои 5, 10 и 15 см заменялись отсеянными агрегатами из суглинистого серозема.

Как показывает табл. 5, испарение воды почвой зависит как от величины агрегатов (самое малое количество

испарившейся воды дают агрегаты от 2 до 3 мм, самое большое — агрегаты от 10 до 15 мм), так и от толщины агрегатного слоя. Чем мощнее агрегатный слой, тем меньше под ним воды испаряет почва.

Михайловым получены также данные о зависимости испарения воды почвой от запыления агрегатов. Напри-

мер: естественная почва испарила за 15 дней 3000 г, покрытая агрегатами от 2 до 3 мм — 2350 г, покрытая смесью агрегатов от 2 до 3 мм (70%) и меньше 0.25 (30%) — 2850 г, покрытая агрегатами от 10 до 15 мм — 2600 г и покрытая смесью агрегатов от 10 до 15 мм (70%) и меньше 0.25 мм (30%) испарила 3400 г. Эти данные показывают, что прибавление 30% пыли уже резко изменяет количество испаряющейся воды.

Структурное строение влияет и на водопроницаемость почвы. И. Б. Ревут и Н. П. Поясов (1953) изучали изменение фильтрации структурной почвы в зависимости от ее запыления. Фильтрация велась на приборе Вильямса—Савинова, измененном Агрофизическим институтом. Агрегаты от 1 до 2 мм показали расход филь-

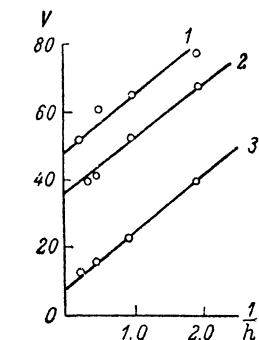


Рис. 4. Зависимость испарения от толщины структурного слоя.

h — толщина структурного слоя; v — отношение испарения с почвы к испарению со свободной водной поверхности, %. Слой из агрегатов размером 1—2 мм: 1 — подзолистой суглинистой почвы; 2 — пылеватого кварцевого песка, сцементированного клеем; 3 — крупного песка, несцементированного.

при напоре 20 мм водяного столба — 162.0 см³, те же агрегаты с прибавлением 3.6% пыли — 96.0 см³, с прибавлением 9.2% пыли — 60.0 см³, с прибавлением 21.1% — 16.6 см³, с прибавлением 50.7% пыли — 0.6 см³, наконец пыль показала расход фильтрации 0.084 см³. Как видно из этих данных, скорость фильтрации при прибавлении к агрегатам 50% пыли упала с 162.0 до 0.6, т. е. уменьшилась в 270 раз.

Таким образом, размер почвенных агрегатов имеет важное агрономическое значение. Если почва сложена из агрегатов, близких к пылеватым (меньше 0.25 мм), то

она плохо использует выпадающие весной и летом осадки, так как водопроницаемость ее мала, и потому большинство воды стекает с поверхности. Такая почва непрерывно испаряет воду и высыхает на большую глубину; она обычно бывает более плотной, для обработки ее, как показали известные опыты Пухнера, Шахбазиана, Вильямса, Качинского и др., требуется больше усилий, а следовательно, и больше расходуется горючего. Теплопроводность такой почвы также велика, поэтому колеба-

Т а б л и ц а 5

Испарение воды (г) за 15 суток из почвы при различном
сложении верхнего слоя

Размеры агрегатов	Мощность агрегатного слоя		
	5 см	10 см	15 см
Меньше 0.25 мм	4250	3350	2750
2— 3 мм	2850	2250	1600
10—15 »	4350	2350	2000

ния температуры между днем и ночью, в особенности в жаркое время, бывают значительными. Почти все поры такой почвы обычно обладают капиллярными свойствами и, будучи заполнены водой, уже мало содержат воздуха, а следовательно, кислорода. Микробиологические процессы в такой почве, если она влажная, носят анаэробный характер, в почве начинают нарастать восстановительные процессы, и она накапливает, как это показано выше, меньше пищи для растений. Поэтому лабораторные и полевые опыты с растениями, а также наблюдения физических свойств почвы свидетельствуют, что наиболее благоприятными для роста и развития растений являются размеры агрегатов от 2 до 3 мм и близкие к ним (1—2 и 3—5 мм). В высокоплодородных целинных почвах такие агрегаты преобладают над всеми другими, как это видно из данных, полученных на целинном заповедном участке обыкновенного глинистого чернозема Каменной

степи Экспериментально-опытного хозяйства Института земледелия им. В. В. Докучаева ЦЧП:

Размер фракций	Количество фракций, %
Больше 10 мм	0.5
10—5 мм	4.0
5—3 »	17.3
3—2 »	36.5
2—1 »	18.0
1—0.5 »	10.3
0.5—0.25 »	11.6
Меньше 0.25 мм	1.8

Из этих данных видно, что фракции размером от 5 до 1 мм составляют более 70% всей структуры. Следует также добавить, что эти фракции имеют важное значение и в сохранении самой почвы, т. е. в борьбе против явлений водной и ветровой эрозии. В сухих условиях почва подвергается развеиванию, в более влажных — размыванию. Н. А. Соколов показал зависимость между размерами переносимых ветром песчинок и скоростью ветра. Песчинки диаметром 0.25 мм начинают переноситься при скорости ветра 4.5—6.7 м-сек., от 0.25 до 0.5 мм — при скорости ветра 6.7—8.4 м/сек., 0.5—1 мм — при скорости ветра 8.4—11.4 м/сек., 1.0—1.5 мм — при скорости ветра 11.4—13 м/сек. Почвенные агрегаты легче песчинок соответственных размеров — снос верхних слоев почвы начинается происходить при скорости ветра у поверхности земли 5 м/сек. (чему соответствует показание флюгера 12 м/сек.). При этой скорости ветра почвенные частицы отрываются от поверхности почвы и поднимаются в воздух. Особенно подвержены разрушению ветром бесструктурные почвы. Наиболее часто пылевые бури наблюдаются на Украине, на Дону и на Кубани, где они носят название «черных бурь», так как при этом выдуваются темные гумусовые частицы чернозема. Пылевые бури захватывают территорию среднеазиатских республик, Западной Сибири, Бурят-Монголии, Казахстана. При отсутствии снегового покрова пылевые бури происходят и зимой, при сильном морозе. Почва, состоящая из агрегатов с преобладанием размеров 2—3 мм, большей частью гарантирована от развеивания.

† Аналогичное разрушение почвы совершается и стекающей с поверхности почвы водой. При скорости сте-

кающей воды 5 см/сек. частицы и агрегаты почвы меньше 0.25 мм взмучиваются в потоке и уносятся в лощины и низины. Почва обедняется ценными коллоидными частицами — одной из основ ее плодородия. Если почва структурная и в ней преобладают водопрочные агрегаты от 2 до 3 мм и близкие к ним, то размываемость почвы резко уменьшается.¹

Методика определения размеров почвенных агрегатов проста. В поле лопатой или почвенным буром с большим диаметром (больше 100 мм) берется почвенный образец с желаемой глубины, весом около 1.5 кг. Если нет уверенности в однородности почвы, то берется средний образец, обычно с четырех углов и из середины участка, подлежащего изучению. В сумме пробы из 5 точек должны составить те же 1.5 кг. Взятые образцы рассыпаются на листе бумаги, тщательно перемешиваются и высушиваются на воздухе. Далее образцы (индивидуальный или смешанный) пропускаются через набор сит с диаметром отверстий 10, 7, 5, 3, 2, 1, 0.5, 0.25 мм. Остатки на каждом сите взвешиваются и выражаются в процентах от первоначального общего веса. Почва, прошедшая через сито с отверстиями 0.25 мм, и соответствующая пыль также взвешиваются и выражаются в процентах к общей навеске.

Водопрочность почвенной структуры и методы ее определения

Размеры почвенных агрегатов только в том случае являются показателями того или иного физического режима в почве, когда агрегаты водоустойчивы, т. е. способны противостоять разрушающему действию воды: не расплываться в воде в бесформенную массу. В. Р. Вильямс это свойство почвенных агрегатов называл прочностью,

¹ Это правильно в общем виде. В отдельных случаях в смывных со склонов почвах мы обнаруживаем преобладание крупных агрегатов. Дело в том, что если почва рыхлоструктурная, то связь между агрегатами ослабевает тем больше, чем крупнее агрегаты, и сопротивление почвы потоку воды падает. Более крупные агрегаты легче отделяются от общей массы почвы и катятся по уклону вниз.

в отличие от связности, которая характеризует сопротивление комка раздавливанию. В физике и в учении о сопротивлении материалов под прочностью понимается именно то, что В. Р. Вильямс называет связностью. Эта величина характеризуется сопротивлением разрыву, сжатию, кручению и измеряется в килограммах на 1 см². В настоящее время для характеристики устойчивости почвенных агрегатов в воде применяется термин «водопрочность». Водопрочность определяется относительно. В определенных, стандартных для каждого метода условиях определяется процентное содержание водопрочных агрегатов при погружении почвенной пробы в воду и некотором ее просеивании на ситах в воде. В настоящее время различают водопрочность истинную, или безусловную (по М. Х. Пигулевскому, 1925, 1936), и ложную (по А. Ф. Тюлину, 1928).

Почвенные агрегаты обладают истинной водопрочностью, если они в воздушно-сухом состоянии при быстром погружении в воду не теряют форму и не разрушаются до размеров меньше 0.25 мм. Агрегаты, не обладающие истинной водопрочностью, могут обладать условной водопрочностью, если они не разрушаются в воде, будучи капиллярно смоченными перед погружением в воду.

Условная водопрочность одних и тех же агрегатов всегда выше истинной. В качестве примера приводится

Т а б л и ц а 6

Содержание агрегатов больше 0.25 мм (в %
к воздушно-сухой навеске) при условной и истинной
водопрочности структуры

	Обыкновенный суглинистый чернозем (Мичу- ринск)	Дерново-подзо- листая почва (Ленинградская область)
При быстром погружении образца в воду	46.7	37.7
При погружении в воду капил- лярно-насыщенных водою агре- гатов (условная водопрочность)	70.4	60.8

определение водопрочности в двух почвах — обыкновенном черноземе и дерново-подзолистой почве (табл. 6).

При определении водопрочности почвенных агрегатов применяются различные методы, причем они настолько разнообразны, что их можно разбить на группы. Первую группу составляют так называемые косвенные методы. Впер-

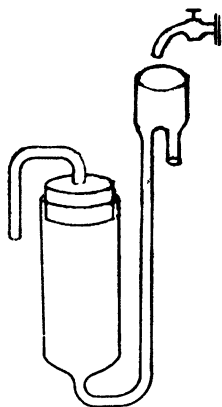


Рис. 5. Схема прибора Фадеева—Вильямса для определения водопрочности почвенной структуры.

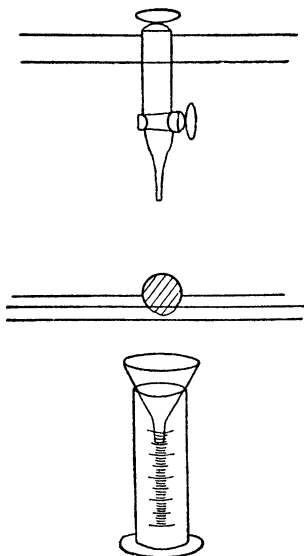


Рис. 6. Схема капельного прибора Д. Г. Виленского.

вые такой метод определения водопрочности агрегатов был предложен Фадеевым и Вильямсом. Сущность его заключается в том, что отсеянные воздушно-сухие агрегаты из почвенного образца помещаются в стеклянную трубку диаметром около 4 см. Снизу и сверху трубка закрывается пробками, через которые пропущена трубочка диаметром 7—8 мм. Верхняя и нижняя трубки изогнуты. Верхняя трубка служит для стока воды, нижняя — для подачи воды. Вода подается под небольшим постоянным напором. Скорость протекания воды через образец (см^3 в 1 сек. или мин.) по мере размывания почвенных агрегатов все уменьшается и уменьшается и, наконец, до-

стигает некоторой постоянной величины, что и служит концом анализа. Метод дает относительные представления о водопрочности той или иной почвы и позволяет сравнивать между собой водопрочности разных почв. На рис. 5 изображена схема этого прибора.

К числу косвенных методов относится и метод проф. Д. Г. Виленского. При этом методе суждение о водопрочности агрегатов производится путем сравнения числа капель, падающих из стандартной пипетки с установленной высоты на агрегат определенного размера и разрывающих его. Для каждого почвенного образца выводится средняя из 50 агрегатов. На рис. 6 приводится изображение капельного прибора Виленского.¹

Общим недостатком косвенных методов является то, что они не дают представления, на какие же комочки распадается почва при воздействии воды. Этот недостаток устраняется при так называемых ситовых методах агрегатного анализа, которые можно назвать и прямыми. Сущность этих методов заключается в следующем. Навеска почвенных агрегатов определенных размеров или чаще смесь агрегатов, взятых из средней полевой пробы при сухом рассеве на агрегатность (в том же процентном соотношении, как и в полевом образце), помещается на верхнее сито колонки сит разных размеров (10, 7, 5, 3, 2, 1, 0.5, 0.25), находящейся в воде. Далее путем поднятия и опускания в воде колонки сит определенное число раз производится просеивание агрегатов в воде. После этого сита разбираются и агрегаты с каждого сита смываются в фарфоровые чашечки, высушиваются до воздушно-сухого состояния и взвешиваются. По разнице в весе агрегатов разных фракций до купания и после купания и производится суждение о водопрочности. К прямым методам относятся методы Г. И. Павлова, А. Ф. Тюлина и Н. И. Саввинова. Метод последнего в настоящее время наиболее широко распространен в Советском Союзе. На изложении подробностей указанных методов мы не останавливаемся, так как они описаны в учебной литературе.

Стремление стандартизировать купание почвенных образцов в воде и увеличить производительность труда

¹ Более подробный разбор этих приборов см.: Сборник трудов по агрономической физике, вып. 5, 1953.

при анализах породило многочисленные приборы для определения водопрочности почв. Назовем главные из них. Первым из них является прибор проф. М. Х. Пигулевского. Схематическое изображение его приводится на

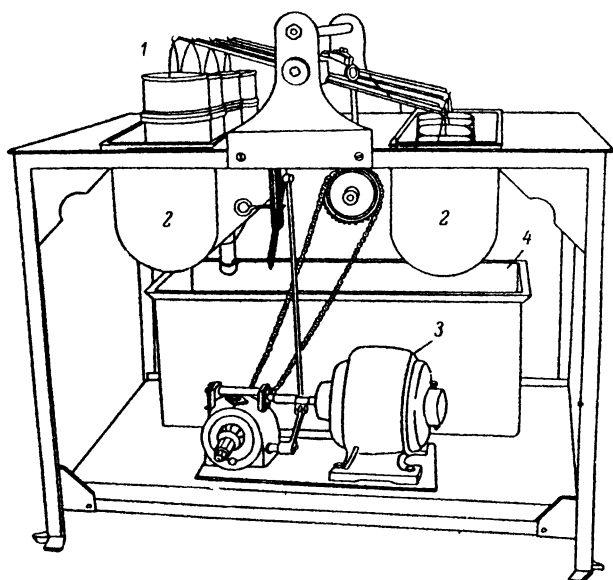


Рис. 7. Схема прибора М. Х. Пигулевского для определения водопрочности почвенной структуры.

1 — набор сит с почвенными агрегатами, 2 — сосуды для купания образцов почвы, 3 — электромотор с цепной передачей; 4 — ванна для спуска мутной воды из сосудов 2.

рис. 7. Восемь колонок с ситами подвешиваются к плечам коромысла. Коромысло качается. Качание производится электромотором. Несколько иначе механизировано купание образцов в воде в приборе Иодера, как это видно из рис. 8.

Оригинально разрешена задача автоматизации купания в приборе Рененкампа и Мейера. На рис. 9 приводится схема прибора. Колонка сит располагается в цилиндре. Вода подается снизу и поднимается одновременно по цилиндру с ситами и по сифонной трубке. Дойдя до верхней точки сифона, вода начинает по сифону сбрасываться.

После сбрасывания вода в цилиндре с ситами опять поднимается по трубке от водопровода, и таким образом осуществляется купание почвенных агрегатов. В данном приборе сита стоят на месте и мимо них непрерывно протекает вода.

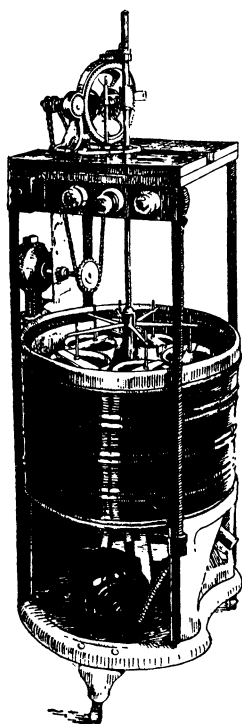


Рис. 8. Прибор Иодера для определения водопрочности почвенной структуры.

Автоматизация купания разрешена и в нашем приборе, модель которого показана на рис. 10. Колонка сит движется внутри цилиндра, в котором под постоянным небольшим напором протекает вода (от водопровода или напорной банки). Сита имеют только вертикальный возвратно поступательный ход, осуществляемый при помощи кривошипа и червячной передачи. Благодаря этому устройству они погружаются и поднимаются на 2 см. Число возвратно поступательных движений сит в единицу времени (минуту) регулируется при помощи реостата. Лучшим режимом для разных почв является такой, при котором число движений сит находится в интервале от 16 до 30 качаний в минуту. Вода, стекающая вниз, проходя через почвенный образец, размывает агрегаты и становится мутной. Мутность промытых вод в течение анализа меняется.

Концом анализа считается посветвление воды до исходного положения. Мутная вода, вытекающая из цилиндра с движущимися ситами, протскает через кювету с плоскопараллельными стенками, просвечивае-

мую электрической лампочкой, которая питается стабилизированным током от электросети. Определение мутности воды, протекающей через кювету, производится при помощи селенового фотоэлемента, сочлененного с гальванометром.

Фотоэлемент разделен на две равные части: одна часть покрывается плоской кюветой, по которой протекает мутная вода от разрушенных агрегатов почвы, другая — такой же кюветой с чистой водой. Стрелка гальванометра, соединенного с фотоэлементом, показывает разность мутности (светопрозрачности) вод.

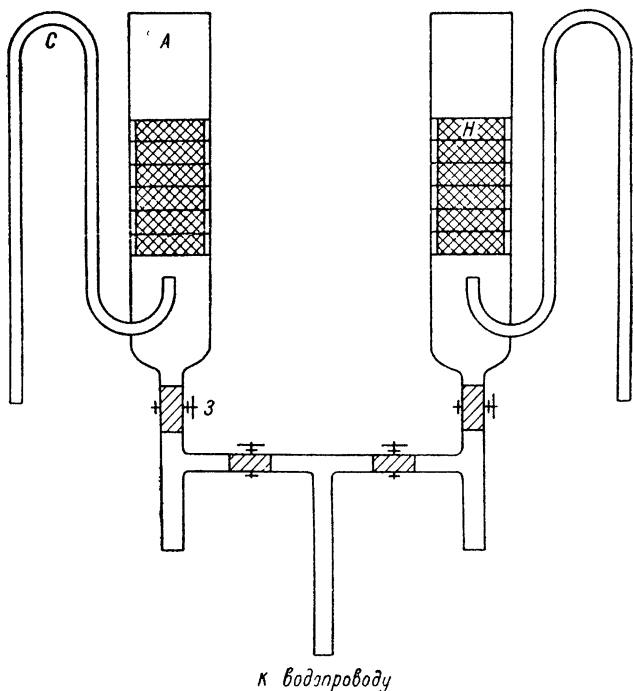


Рис. 9. Схема прибора У. Рененкампа и Л. Мейера для определения водопрочности почвенной структуры.

А — сосуд для полоскания; Н — набор сит; С — сифон для сливания, З — зажимы.

Автоматизация купания сит в воде оригинально решена и в приборе Бакшеева и Чижевского. В этом приборе сита меняют наклон при погружении в воду, благодаря чему, по мнению авторов, сита не забиваются разрушающими агрегатами. Отмыв идет быстрее и чище.¹ Схема прибора приводится на рис. 11.

¹ Методика агрегатных анализов самого последнего времени, в особенности американская, представляет модификацию перечи-

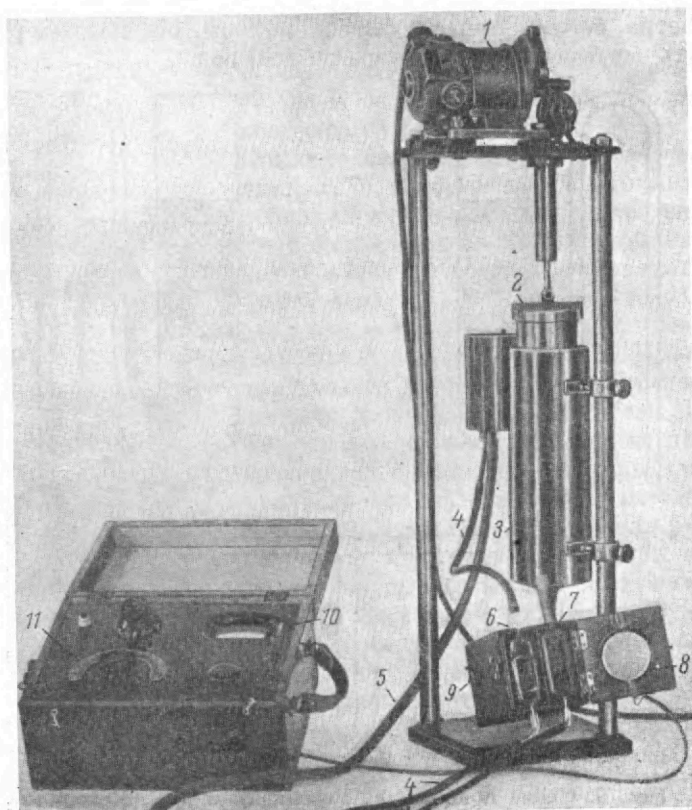


Рис. 10. Прибор П. В. Вершинина для определения водопрочности почвенной структуры.

1 — рама прибора с электромотором, 2 — колонна с ситами на подвеске; 3 — сосуд для купания почвенного образца, 4 — подающая воду (чистую) трубка, 5 — трубка для стекания избыточной воды из уравнильного сосуда; 6 — кювета с протекающей чистой водой; 7 — кювета с мутной водой, вытекающей из цилиндра 3, 8 — селеновый фотоэлемент; 9 — осветительная камера; 10 — нуль-гальванометр; 11.— реостат для приведения гальванометра (10) на нуль (ручка реостата, шкала с делениями и стрелка).

Обладая рядом несомненных достоинств (получение в достаточной мере быстро полного представления о водопрочности различных фракций структурного анализа почвенного образца, взятого в поле), ситовые методы определения водопрочности почвенной структуры имеют и некоторые недостатки. Основной и главнейший из них это тот, что, подвергая почву энергичному воздействию водой в процессе анализа, мы разрушаем почвенную структуру в такой степени, в какой она никогда в нормальных полевых условиях не разрушается. В силу этого лишь почвы с заведомо водопрочной структурой (например, целинные) и с резко выраженной неводопрочной структурой (например, орошаемые сероземы при непрерывной культуре хлопчатника) могут быть достоверно разделены. Поэтому исследовательская мысль была направлена на изыскание более «мягких» методов воздействия воды на почву в течение анализа.

С этой целью П. И. Андриановым предложен способ определения водопрочности почвенной структуры, который можно назвать счетно-статистическим методом. При этом методе проба почвенных агрегатов раскладывается на пористой пластинке, разбитой на квадраты. Каждый агрегат лежит в определенном квадрате. Пластика с агрегатами погружается в воду и затем осторожно вместе с агрегатами вынимается из воды. Применяя лупу, отделяют комки, развалившиеся при погружении в воду. Высушив неразвалившиеся комки и взвесив их, можно установить величину водопрочности в процентах от первоначальной навески. Если брать для анализа агрегаты

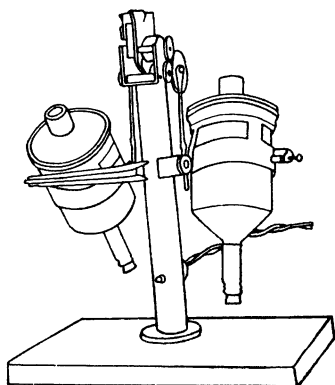


Рис. 11. Внешний вид прибора Бакшеева для определения водопрочности почвенной структуры.

сленных выше ситовых методов определения водопрочности с применением механизации купания образцов (Hedrick, 1954).

одного размера и примерно одного веса, можно процент водопрочности комков установить простым счетом. Этот метод имеет те же недостатки, что и косвенные методы, т. е. не дает представления о водопрочности отдельных фракций. Кроме того, счетно-статистическая обработка агрегатов после намачивания делает метод пригодным лишь для исследовательских целей.

Учитывая потребность в «мягких» методах определения водопрочности структуры, мы совместно с И. Б. Ревутом предложили метод определения водопрочности почвенных агрегатов, основанный на намачивании почвенной пробы в слабопроточной воде. Сущность метода заключается в следующем. Опытами установлено, что в воздушно-сухом состоянии почвенные агрегаты свободно переносят рассевание на ситах. Это обстоятельство учтено в новом методе. Образец для анализа берется из средней полевой пробы, как это обычно делается по методу Н. И. Саввинова. Взятый образец весом 50 или 25 г (в зависимости от размеров прибора) помещается на соответствующие по размерам сита, собранные в колонки, которые погружены в воду в сосуде конусообразной формы. Вода протекает со скоростью фильтрации (примерно 0.1 мм в 1 сек.). Постоянство уровня воды в конусообразном сосуде обеспечивается перетеканием воды из верхнего сосуда по принципу Мариотта. Агрегаты выдерживаются в проточной воде один час (величина получена эксперимен-

Т а б л и ц а 7

Водопрочность почвенных агрегатов обыкновенного глинистого чернозема, определенная разными ситовыми методами

Поля полевого севооборота среди лесных полос	Количество водопрочных агрегатов более 0.25 мм, %	
	по методу Саввинова	по методу Вер- шинина—Ревута
Паровое поле	50.5	71.0
Озимое поле	51.9	70.2
Травы первого года пользования	55.0	74.6
Яровая пшеница по пласту из-под многолетних трав одногодичного пользования	65.5	76.9
Яровая пшеница по обороту пласта	62.3	82.5

тально; Вершинин и Ревут, 1953). После часа намачивания протекание воды приостанавливается. Сита вынимаются из воды, а оставшиеся на ситах агрегаты высушиваются, просеиваются через колонку сит и затем взвешиваются. Разница между процентным содержанием фракций агрегатного анализа до намачивания и после намачивания характеризует водопрочность почвенной структуры. В табл. 7 приводятся данные по водопрочности структуры, полученные методом Саввинова и указанным методом. Из этих данных следует, что рассмотренная методика является наиболее «мягкой» в отношении разрушения агрегатов в процессе анализа и может быть рекомендована для характеристики водопрочности структуры в районах с невыраженной водноэрозийной деятельностью.

О плотности и пористости агрегатов

Кроме размеров агрегатов и их водопрочности, в настоящее время также придается значение плотности агрегатов или их пористости (Качинский, 1947). С пористостью связана микробиологическая деятельность в комке. Если комок обладает малой пористостью, то даже при незначительной влажности микробиологическая аэробная деятельность в нем резко снижается, ограничиваясь только поверхностной пленкой. Такой комок мало накапливает пищи для растений. Аэробные микробиологические процессы в комке увеличиваются по мере его высыхания, но они продолжают тоже недолго из-за недостатка влаги в комке.

При слишком высокой пористости комка, что бывает в том случае, если комок состоит из более мелких комочков, а те в свою очередь — из микроагрегатов, аэробные процессы в комке резко выражены даже при общей большой влажности. Органическое вещество его быстро минерализуется, что ведет к разрушению почвенной структуры.

При изучении связи пористости с микробиологической деятельностью почвы возникают затруднения в измерениях пористости почвенных комков вследствие отсутствия надежной методики определения объемов таких неправильных тел, как почвенные комки. Пори-

стость почвенных агрегатов обычно вычисляется по пространенной формуле:

$$P = \left(1 - \frac{d_0}{d}\right) \cdot 100,$$

где P — пористость агрегата в % от общего объема, d_0 — объемный вес абсолютно сухого агрегата (или плотность), d — удельный вес твердых частиц агрегата.

Удельный вес твердых частиц агрегата определяется пикнометрически по обычно принятой методике.

Для получения объемного веса необходимо иметь вес абсолютно сухого агрегата и его объем. Вес определяется простым взвешиванием агрегата или группы (10, 100 и т. д.) одноразмерных агрегатов (одновременно параллельным взвешиванием определяется их влажность). Объем (наружный) агрегата определяется так: поры внутри почвенных агрегатов заполняются каким-либо веществом, нерастворимым в жидкости, в которую комки погружаются, и по объему вытесненной жидкости пикнометрически определяется объем почвенных агрегатов. Некоторыми исследователями применяется способ пропитки почвенных агрегатов расплавленным парафином и определение объемов таких парафинированных комочков в воде, этиловом спирте или керосине. Неточность этого метода заключается в том, что парафин не только пропитывает поры агрегата, но и образует пленку на поверхности наружных частиц почвы. Толщину этой пленки трудно учесть. Введение поправок несколько повышает точность, но все же ошибки получаются значительные, в особенности при измерении агрегатов с диаметром меньше 1 мм. В целях повышения точности измерения мы в качестве пропиточной жидкости брали воду (так как она образует более тонкую пленку, чем парафин), капиллярно смачивали почвенные агрегаты (предварительно взвешенные) и определяли их объем в керосине методом вытеснения керосина. Керосин легче воды и не вытесняет ее из капилляров. Проверкой метода служил такой опыт. Из растертой почвы путем пропитки торфяным клеем¹ изготовлялась слитная водопрочная масса. Масса после высушива-

¹ О торфяном клее см на стр. 161 настоящего издания.

ния дробилась на агрегаты разной величины. Указанным выше методом определялась пористость различных по размерам агрегатов. Она должна быть у всех комков, независимо от их размера, одинакова.

Нами получены данные о пористости различных по величине агрегатов:

Размеры агрегатов, мм	Пористость, %
7	39.18
5	39.10
3	39.22
2	39.46
1	39.38
0.5	40.50
0.25	45.50

Как видно из этих результатов, достаточная точность в определении пористости получается лишь для агрегатов размерами более 0.5 мм. Если среднюю пористость комков размером от 7 до 1 мм включительно считать равной 39.27%, то агрегаты размером 0.5 мм дают отклонения на 3%, а агрегаты размером 0.25 мм — на 16%.

Наблюдение процесса капиллярного смачивания агрегатов под микроскопом показывает, что, поступая по капиллярам снизу, вода не только заполняет капилляры, но и «изливается» наружу, образуя сплошную пленку, толщину которой обычными методами можно установить лишь приблизительно. С уменьшением размеров агрегатов увеличивается их удельная поверхность, и неточность в определении толщины пленки начинает резко сказываться.

Еще меньшей точностью обладают распространенные методы определения объема агрегатов при помощи ртути. Последняя, видимо, частично проникает в поры агрегатов и дает уменьшенные показания пористости.

О биологической устойчивости почвенных агрегатов

Почвенные агрегаты, как упоминалось ранее, образуются из частиц, раздробленных в процессе выветривания горных пород. Эти так называемые первичные частицы склеиваются между собой различными клеями, как

минеральными, так и органическими. Водопрочность почвенной структуры, как будет сказано далее, связана с образованием в почве органических клеящих веществ, возникающих в результате разложения растительных и животных остатков почвенными микроорганизмами. Эти клеящие органические вещества различны по своей химической природе. Одни из них, например белки, хорошо склеивают почвенные частицы, придают агрегатам свойства водопрочности, но сами быстро «поедаются» другими микробами, и потому структура, образованная ими, неустойчива или, как говорят микробиологи (Мишустин, 1945), лабильна. Другие клеящие органические вещества, например типа гуматов, разрушаются микроорганизмами не так быстро, обычно лишь при остром недостатке органических веществ в почве. Структура, образованная этими клеями, устойчива во времени или более стабильна.

Структурное строение почвы лишь тогда может способствовать повышению урожая, когда создаваемые ею благоприятные физические условия могут существовать в почве более или менее продолжительное время, а это наблюдается лишь тогда, когда водопрочная структура относительно устойчива от разрушения микробами. Кратковременная водопрочность структуры не представляет практического интереса. Методика определения биологической устойчивости почвенных агрегатов заключается в том, что почвенный образец для анализа помещается в термостат и выдерживается в нем при оптимальной температуре и агрегатной влажности установленное время. Определение водопрочности структуры до помещения образца в термостат и после его прогревания в термостате покажет лабильность или стабильность водопрочности агрегатов.

В заключение необходимо отметить, что ценность почвенной структуры сказывается в конечном счете на высоте урожая сельскохозяйственных растений и способствует уменьшению энергетических затрат на обработку почвы. Но необходимо помнить, что сама по себе структура почвы без наличия других элементов плодородия — достаточного запаса питательных веществ при отсутствии вредных химических соединений, наличия полезных микроорганизмов и т. д. — не может обеспечить высокого урожая. Структура создает лишь благопри-

ятный водно-воздушный режим в почве и способствует накоплению доступных питательных веществ, но не подменяет их. И на структурной почве необходимо вносить удобрения, только эффект от их применения в этом случае выше.

Почвенная микроструктура, ее значение и методы определения

По утверждению В. Р. Вильямса (1945), структурные агрегаты меньше 0.25 мм независимо от их строения только отрицательно влияют на физические свойства почвы. Успехи коллоидной химии и достижения в области изучения почвенных коллоидов не подтвердили такого взгляда на почвенные частицы размером меньше 0.25 мм. Важное значение имеет то, как построены эти пылеватые частицы. Состоят ли они из первичных частиц или представляют собой агрегаты из более мелких частиц. Чем меньше по размерам почвенные частицы, тем больше вероятность их выноса в нижние горизонты почвы. В особенности эта опасность возрастает тогда, когда диаметр твердых почвенных частичек приближается к размеру крупных молекул (10^{-7} см). Почвенные поры уже не могут задерживать такие частицы. Это относится как к органическим, так и к минеральным соединениям почвы. В то же время по своей удельной поверхности, а следовательно, по своим физико-химическим свойствам эти частицы представляют наибольшую ценность, так как с ними тесно связано накопление и удержание в почве пищи для сельскохозяйственных растений, да и сами они могут в той или иной мере усваиваться корнями растений.

Укрупняясь под влиянием процессов коагуляции или слипания, эти частицы хотя и теряют часть своей удельной поверхности, но она все же остается достаточно высокой, а главное — вынос их в нижние горизонты резко уменьшается. И. Н. Антиповым-Каратаевым еще в 30-х годах было наглядно показано, что превращение почвенных коллоидов в коагулированное состояние улучшает фильтрационные свойства почвы и имеет большое значение как при накоплении в почве влаги, так и питательных веществ.

Наиболее правильное представление о микроструктурном составе почвы можно получить, сравнивая данные двух механических анализов одного и того же почвенного образца со специальной подготовкой и без подготовки. Специальная подготовка к механическому анализу заключается в том, что образец почвы обрабатывается 0.05 н. HCl для удаления поглощенного кальция, кипятится в воде с несколькими каплями аммиака или едкого натра. Как уже указывалось ранее, такая обработка преследует цель перевести весь почвенный образец в бесструктурное состояние. Второй образец не подвергается ни кипячению, ни обработке кислотой и щелочью, а намачивается лишь в воде. Производя механический анализ с подготовкой почвы и без специальной подготовки распространенным в настоящее время методом пипетки, можно выяснить, какие фракции в почве свернуты в микроагрегаты. Проф. С. В. Астапов, изучавший микроагрегатный анализ почвы, обоснованно рекомендует в этом случае численный коэффициент в формуле Стокса, равный $\frac{2}{9}$, заменить на 0.13, так как плотность микроагрегатных частиц меньше, чем первичных.

Изучению вопросов почвенной микроструктуры посвящено значительное количество трудов А. Ф. Тюлина. Он пришел к выводу, что ценность почвенной микроструктуры не ограничивается только размерами микроагрегатов, а значительную роль в плодородии почвы играет и тот материал, при помощи которого происходит образование почвенной микроструктуры. А. Ф. Тюлин создал метод дробного разделения почвенной микроструктуры, получивший широкое распространение как у нас, так и за рубежом.

При дробном разделении микроструктуры внимание уделяется частицам размером меньше 0.01 мм, так как частицы от 0.01 до 0.25 мм обычно в почве представлены первичными частицами — пылинками и песчинками, не имеющими на поверхности коллоидных пленок (эти частицы «голые»). Частицы меньше 0.01 мм разделяются на две группы. Для этого почвенный образец перед механическим анализом делится на две одинаковые части, которые насыщаются ионом натрия по Гедройцу (путем промывки его нормальным раствором хлористого натрия до прекращения в промывных водах реакции на кальций).

После насыщения одна почвенная проба взбалтывается с водой в литровом цилиндре и в ней обычным методом пипетки определяется содержание частиц размером меньше 0.01 мм. Это первая группа. Во второй пробе почва в состоянии пасты тщательно растирается резиновым пестиком до разрушения тех агрегатов, которые не разрушил едкий натр, после чего эта проба взбалтывается с водой в литровом цилиндре и в ней определяется методом пипетки количество частиц меньше 0.01 мм (первая и вторая группы в сумме). Вычитая из суммы первой и второй групп содержание частиц первой группы, мы получаем содержание в почве частиц второй группы.

А. Ф. Тюлин (1954) утверждает, что частицы второй группы формируются в ризосфере растений. Вторичные частицы этой группы (от 0.01 до 0.001 мм) обогащены полутонкими окислами и органическим веществом. Образуются эти частицы в микроразонах сгущения корневых волосков. Там, где нет сгущения корневых волосков, формируются частицы первой группы. Они обеднены полутонкими окислами, представляют обычно органические коллоиды или минеральные коллоиды, склеенные органическими. Эти частицы легко разъединяются на первичные частицы при насыщении почвы ионом натрия по Гедройцу.

Т а б л и ц а 8

Сезонное изменение двух различных групп водопрочных агрегатов в пахотном слое подзолистых почв 1948 г.

Место взятия образца	Срок взятия пробы	Влажность, %	Количество агрегатов, %		Соотношение I и II групп
			I группа	II группа	
Тимирязевская сельскохозяй- ственная акаде- мия, парк	12 IV	20.9	16.7	4.4	3.8
	26 VI	2.8	13.97	10.68	1.3
	28 X	15.69	15.46	10.71	1.4
Совхоз «Отрад- ное», клевер	12 IV	20.18	12.63	9.03	1.4
	26 VI	2.3	8.40	16.60	0.5
	28 X	13.81	12.0	9.3	1.3
Долгопрудное опытное поле	12 IV	26.65	25.0	5.58	4.4
	26 VI	2.79	22.97	10.66	2.1
	28 X	22.25	26.58	7.68	3.5

Схема разделения почвенной структуры по агро-

Происхождение почвенной структуры	Показатели	
	сложение комков	водопрочность комков
Климатогенное (компрессионно-гидротермическое). Структура формируется под влиянием изменения объема почвы, при высыхании и замерзании почвы. Чаще встречается в чистом виде в нижних горизонтах суглинистых и глинистых почв.	Простое. Агрегаты, сложенные из первичных частиц. Сложное. Агрегаты, сложенные из более мелких агрегатов или микроагрегатов <i>n</i>-го порядка.	Неводопрочные. Водопрочных агрегатов крупнее 0.25 мм менее 10%. Условно водопрочных менее 50%. Условно водопрочные. Водопрочных агрегатов крупнее 0.25 мм более 10%. Условно водопрочных более 50%.
Растительно-корневое. Образуется под корнями травянистой растительности.		Водопрочные. Водопрочных агрегатов крупнее 0.25 мм более 50%. Условно водопрочных более 85%.
Копролитовое. Почва проходит через пищеварительный тракт червей.		
Агротехническая структура. Образуется в результате воздействия на почву почвообрабатывающих орудий.		

Примечание. Таксометрическое разделение каждого последующего столбца.

физическим показателям (по П. В. Вершинину)

структуры

размеры комков и их названия	пористость комков	биологическая устойчивость комков
Крупноглыбистые, более 100 мм.	Весьма пористые. Пористость более 55%.	Неустойчивые (лабильные). В условиях благоприятной влажности и температуры в течение 10 дней разрушаются (распыляются) более чем на половину.
Глыбистые, 50—100 мм		
Мелкоглыбистые, 10—50 мм.	Хорошо пористые. Пористость 45—55%.	
Крупнокомковатые, 7—10 мм.		Относительно устойчивые. Слабо разрушаются при благоприятной температуре и влажности в течение 10 дней.
Комковатые, 5—7 мм.	Среднепористые. Пористость 35—45%.	
Мелкокомковатые, 3—5 мм.	Слабопористые. Пористость 30—35%.	Устойчивые. Слабо разрушаются при благоприятной температуре и влажности в течение 20 дней.
Зернистые, 1—3 мм.		
Мелкозернистые, 0.25—1 мм.	Непористые. Пористость менее 30%.	
Пылеватые, меньше 0.25 мм.		

столбца относится к каждой отдельной таксометрической единице предыдущего

Метод разделения микроагрегатов (метод дробной пептизации) при современном его толковании дает возможность проникнуть в природу формирования микроагрегатов и установить связь между высшими растениями и образованием в почве микроструктуры. В табл. 8 приводятся данные, характеризующие динамику первой и второй групп почвенной микроструктуры на различных почвах и под различными растениями (Тюлин, 1954).

О классификации почвенной макроструктуры

Разделение почвенных агрегатов по величине с присвоением каждому размеру агрегатов наименования произведено П. Ф. Бараковым в 1894 г. Названия отдельных размеров почвенных агрегатов, данные Бараковым, с небольшими изменениями сохранились до настоящего времени. Их мы приводили ранее. В дальнейшем проф. С. А. Захаров (1931) развил классификацию почвенной структуры, исходя не только из размеров, но и из формы почвенных агрегатов. Он выделил три типа почвенной структуры:

1. **Кубовидная.** Для этого типа структуры характерно равномерное расположение массы агрегатов по трем осям симметрии.

2. **Призмовидная.** Для этого типа характерно расположение массы в агрегате преимущественно по вертикальной оси.

3. **Плитовидная.** Расположение массы почвы в агрегате идет преимущественно по двум горизонтальным осям.

Далее типы структуры разделяются по формам на роды и виды. Захаров связал типы структуры с типами природного почвообразовательного процесса: кубовидную структуру — с черноземным типом, призмовидную — с солонцовым, плитовидную — с подзолистым. При обследовании почв в природном их залегании классификация почвенной структуры, данная Захаровым, облегчает почвоводам описание почв и их типизацию.

В связи с тем, что целинных и залежных земель становится все меньше, а распаханых и окультуренных почв все больше, сведения наши о структуре почв все расширяются; возникает потребность в агрофизической клас-

сификации почвенной структуры, облегчающей агрономическую оценку почвы. В процессе окультуривания почв типичные для целинных условий формы почвенной структуры (границы, ребра и пр.) изменяются. Образуются агрегаты, иные по форме, чем агрегаты целинной почвы. Это особенно ярко сказывается на подзолистых почвах. С целью облегчения агрономической оценки структуры приводим классификационную схему почвенной структуры по агрофизическим показателям.

По этой схеме агрономически ценной будет структура разного происхождения, состоящая из комков сложного строения, т. е. составленных из микроагрегатов, водопропрочная, с размерами комков от 1 до 5 мм, с пористостью 45—55 %, биологически устойчивая, т. е. удерживающая в течение 10 дней при благоприятной температуре и влажности большинство своих комков в состоянии водопропрочности. Дальнейшая разработка и уточнение классификации структуры помогут быстро и правильно оценивать ту или иную структуру.

Рассмотрев агрономическое значение почвенной структуры, перейдем теперь к рассмотрению того, как возникает та или иная структура в почве, какие факторы при этом участвуют и какие из них являются в тех или иных случаях ведущими.

Глава II

СЛИПАНИЕ ПОЧВЕННЫХ ЧАСТИЦ

Всякий, по всей вероятности, видел почвенный комок. Каждый комок можно разрушить: более прочный — растиранием в ступке, менее прочный — пальцами руки. Исследования показывают, что механический состав почвы в целом и механический состав комков из нее для большинства почв сходны между собой. Комок — это часть почвы, только почвенные частицы в нем слиплись и взаимно удерживаются. Как это происходит?

Капиллярная теория слипания частиц

Всем известно, что сухая песчаная почва сыпуча. Образец такой почвы можно легко пересыпать из одного сосуда в другой. Распыленная суглинистая и глинистая почва тоже сыпуча. При пересыпании образцов таких почв из сосуда в сосуд они пылят. Частицы почвы так малы, что при незначительном ветре поднимаются в воздух и «плавают» в нем. Однако стоит пройти дождю, и почва перестает пылить. Между твердыми частицами при смачивании их водой возникают капиллярные силы, удерживающие частицы между собой.

Величина этих сил обратно пропорциональна диаметру частиц:

$$H = \frac{75}{d},$$

где H — высота, на которую может подняться вода под действием капиллярных сил; d — диаметр

почвенных частиц. Обе величины выражаются в одинаковых единицах (обычно в миллиметрах).

Б. В. Дерягин (1946) предложил капиллярное давление выражать через удельную поверхность почвы. Это исключает необходимость иметь радиусы капилляров, определение которых в почве достаточно сложно. Тогда уравнение капиллярного давления принимает такой вид:

$$P = \gamma \alpha \cos \varphi,$$

где φ — угол смачивания жидкостью стенок капилляра; α — поверхностное натяжение жидкости (в почвенных условиях — воды); γ — удельная поверхность почвенных пор. Известно, что под удельную поверхность почвы понимается геометрическая поверхность частиц в одном грамме почвы. Чем мельче частицы, тем бóльшая поверхность их будет в одном грамме или в единице объема почвы. Если мы возьмем геометрическую поверхность 1 см^3 , то она равна сумме площадей его граней, т. е. 6 см^2 . Если мы грань куба разделим на 10 частей, то поверхность 1 мм^3 будет равна 0.06 см^2 . Но их в 1 см^3 1000, а их суммарная удельная поверхность $0.06 \text{ см}^2 \times 1000 = 60 \text{ см}^2$. Она возросла в 10 раз. Существует правило: уд е л ь н а я п о в е р х н о с т ь р а з д р о б л е н н ы х т е л р а с т е т п р о п о р ц и о н а л ь н о и х и з м е л ь ч е н и ю. Если, например, мы измельчим частицы в 10 раз, то и удельная поверхность возрастает в 10 раз.

В уравнении Б. В. Дерягина надо брать не общую геометрическую поверхность частиц, а лишь ту, которая доступна протекающему газу или воде. Она называется удельной поверхностью сквозных пор, т. е. поверхностью всех сообщающихся пор в единице объема. Такая удельная поверхность легко определяется опытным путем по скорости фильтрации воды с применением закона Дарси или по скорости прохождения через почву газа.

Из самой сущности капиллярной теории вытекает, что сухая распыленная почва при смачивании ее водой должна упрочняться, т. е. механическая прочность ее должна возрастать по мере нарастания смачивания. Это действительно наблюдается, как показывает табл. 9. В этой таблице приводятся данные по сопротивлению разрыву образца дерново-слабоподзолистой тяжелосу-

**Сопротивление разрыву почвенного образца в зависимости
от влажности (общая порозность 47.16%)**

Влажность, %		Эффектив- ная пори- стость, %	Сопротив- ление разрыву, г/см ²	Число повторе- ний	Отклоне- ния от- средней
весовая	объемная				
3.0 (воздушно- сухая)	3.9	43.26	0	—	—
10.17	13.2	33.96	70.0	10	±8
17.14	22.22	24.88	87.0	10	±11.8
29.75	38.67	8.49	89.9	10	±7.6
34.65	45.00	2.16	138.5	10	±9.0
40.30	52.40	—	104.0	10	±8.0

глинистой почвы из Павловского района Ленинградской области.

Сопротивление разрыву почвы определялось на приборе типа пресса Михаэлиса. Образец почвы измельчался и просеивался через сито с диаметром отверстий 0.25 мм, после чего набивался по весу в форму, имеющую вид восьмерки, схематически изображенную на рис. 12, а. Затем производился разрыв; влажность при этом варьировалась.

Как видно из данных табл. 9, наибольшая прочность на разрыв наблюдается при определенной влажности, близкой к полному заполнению капилляров почвы водой. При избыточной влажности капиллярные силы пропадают, так как вогнутых менисков уже не образуется, между частицами в местах соприкосновения появляются толстые пленки воды, ослабляющие силы сцепления. В почвенной системе нарастает текучесть, т. е. переход из твердого состояния в жидкое.

Из капиллярной теории слипания почвенных частиц вытекает, что чем меньше размеры почвенных частиц, тем тоньше создаваемые ими капилляры и тем выше кривизна менисков или удельная поверхность пор, а потому в таких почвах прочность, создаваемая капиллярными силами при увлажнении, выше. Иначе говоря, чем больше в почве содержится глинистых или близких к ним по размерам частиц, тем выше прочность таких почв.

И действительно, в природных условиях мы наблюдаем сходные явления. Глинистые почвы способны образовывать механически более прочные комки. Эти почвы более трудны для механической обработки, чем суглинистые, супесчаные и песчаные при той же влажности.

В практике земледелия хорошо известно, что при благоприятной влажности почвообрабатывающими орудиями — боронами, культиваторами — можно создать хорошую комковатость почвы. Но тем не менее капиллярными явлениями можно объяснить слипание почвенных частиц в комков лишь в начальной стадии процесса.

Действие капиллярных сил должно прекращаться с удалением воды из почвы, например при высушивании. В этом случае комков почвы, образовавшийся под влиянием капиллярных сил, должен рассыпаться и почва из связного состояния должна перейти в сыпучее. Опыт, однако, показывает, что это наблюдается лишь на песчаных почвах. Утверждение американского грунтоведа Терцаги, что воду из тонких капилляров удалить невозможно, неправильно. Современная техника сушки в соединении с высоким вакуумом позволяет полностью удалять воду из почвы. Но ослабления связи почвенных частиц при этом в суглинистых и глинистых почвах не наблюдается, наоборот, она увеличивается, как это видно из данных С. Н. Рыжова, полученных для темно-серого суглинистого серозема (Ташкентский район):

Влажность, %	Сопротивление сжатию, кг/см ²
0	117.8
0.61	101.57
0.81	74.08
1.71	68.74
4.32	42.28
5.90	29.60

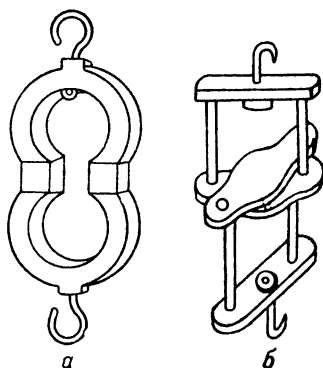


Рис 12 Формы для испытания почвенных образцов на разрыв и сжатие.

a — на разрыв, *б* — на сжатие

Суждение о прочности составлялось на основании измерения сопротивления сжатию (раздавливанию) изготовленных из почвы кубиков.

При избыточном увлажнении почвы действие менисковых сил тоже должно прекращаться и почва из связанного состояния должна перейти в пластичное или текучее. На самом же деле в почве встречаются комки, не разрывающиеся при самом большом ее увлажнении. Более того, как известно, наиболее ценной структурой считается та, агрегаты которой и после избыточного увлажнения не разрушаются в воде. Следовательно, одними капиллярными силами нельзя объяснить механизм слипания почвенных частиц, необходимо еще рассмотреть вопросы склеивания почвенных частиц.

Теория склеивания почвенных частиц

В сухом состоянии почвенные капилляры и поверхность почвенных частиц обычно заняты воздухом, который препятствует сближению частиц. Поэтому слипание сухих частиц в почве без приложения извне значительных давлений маловероятно. Опыт подтверждает это. Сухая, распыленная почва, как уже упоминалось, представляет тело сыпучее.

Иная картина наблюдается при наличии воды в почве. Поступающая в сухую почву вода вытесняет воздух с поверхности почвенных частиц, заполняет капилляры и образует мениски. Кроме того, она вступает с частицами почвы в более тесное взаимодействие. Для того чтобы более ясно представить картину этого взаимодействия, рассмотрим строение (физическое) минеральных частиц почвы.

В состав минеральной части почвы входят разных размеров частицы кварца, роговой обманки, ортоклаза, микроклина, эпидита, биотита, мусковита, плагиоклаза, различных карбонатов, сульфатов и др. В коллоидную часть почвы входят алюмосиликатные частицы монтмориллонита, галуазита, бейделита, каолинита, гидратов окисей железа, алюминия, марганца, а также кремнекислоты и др. Эти частицы в течение геологического времени под влиянием физических, химических и биологических факторов изменили свою внешнюю поверх-

ность. Она потеряла чисто кристаллическое строение, какое мы наблюдаем на свежих изломах, помутнела и приобрела, по выражению академика Б. Б. Полынова, пелитовый характер. Катионы алюмосиликатов кристаллических решеток, лежащих на поверхности, гидратировались, вступили в обменные реакции с раствором, выщелочились и ушли в раствор, поверхность же в силу этого приобрела ультрапористое, гелеобразное строение, способное к сильному набуханию.

Толщина (глубина) такой поверхностной пленки зависит от минералогического состава частиц, длитель-

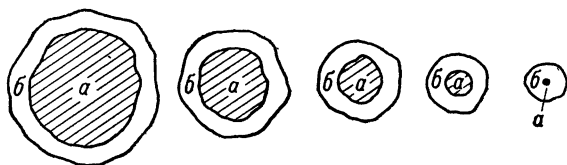


Рис. 13. Гелеобразные пленки на поверхности минеральных почвенных частиц различного размера:

а — кристаллическая часть, *б* — гелеобразная пленка.

ности и характера выветривания и, по измерениям академика И. В. Гребенщикова (1937), доходит до 0.000001 см. Чем меньше размеры почвенных частиц, тем относительно большую часть их занимает эта студенистая пленка, как это показано на рис. 13.

Частицы, приближающиеся по размерам к 0.000001 см, состоят из гелеобразной массы с ультракристаллической частицей внутри. По современным представлениям, поверхность каждой почвенной частицы в воде приобретает электрический заряд. Для большинства почв это отрицательный заряд. В почвенной воде имеются соединения, диссоциированные на катионы и анионы. Около отрицательно заряженной твердой почвенной частицы на молекулярном расстоянии от нее располагаются ионы с противоположным знаком, т. е. преимущественно катионы. Часть положительных зарядов расположена в молекулярной близости от поверхности почвенных частиц и как бы закреплена. По мере же удаления от поверхности частиц плотность зарядов уменьшается и образует так называемую «ионную атмосферу»

или диффузный ионный слой. Подвижность ионов диффузного слоя возрастает по мере удаления от поверхности почвенной частицы.

Следовательно, каждая отрицательная частица почвы окружена положительно заряженными ионами. Ионы взаимодействуют не только с почвенными частицами, но и с окружающими их молекулами воды. Под влиянием электрических зарядов ионов дипольные молекулы воды поворачиваются (ориентируются) концами с противоположными зарядами к иону. Чем больше плотность заряда иона на единицу поверхности, тем большее число молекул воды ориентирует вокруг себя этот ион. Наибольшую плотность заряда имеют одновалентные ионы. Наименьшую — трехвалентные. Ориентированные вокруг иона молекулы воды образуют так называемую гидратную оболочку ионов.

Таким образом, в переувлажненной бесструктурной почве почвенные частицы раздвинуты молекулами воды и слоями гидратированных ионов. Здесь уместно упомянуть следующее. Если воды очень много по сравнению с почвой и почвенные частицы (имеются в виду частицы малых размеров — коллоиды) свободно плавают в воде, то, находясь в броуновском движении, эти частицы могут сталкиваться (соударяться) по принципу упругих шаров. Энергия, получаемая почвенными частицами при броуновском движении, позволяет им в отдельных случаях преодолевать электростатические силы двойных ионных слоев и слипаться при столкновении. Слипаясь, частицы образуют хлопья (коагулируют), резко отделяясь тем самым от дисперсионной среды. Об этом случае слипания частиц при коагуляции мы скажем позднее, когда будем рассматривать происхождение микроструктуры. Сейчас же остановимся на случае, когда не частицы плавают в воде, а вода находится между частицами, т. е. случае сильно увлажненной почвы, например весной, после таяния снега. В этом случае частицы почвы самых разнообразных размеров хотя и раздвинуты водой и гидратными оболочками ионов, но как бы колеблются в ограниченных пределах и движутся вместе со всей массой почвы.

По мере высыхания почвы из нее сначала будет испаряться свободная влага, частицы почвы останутся

разделенными гидратированными слоями ионов. Затем при дальнейшем высыхании почвы начнет испаряться вода гидратных оболочек ионов. Частицы почвы ближе подойдут друг к другу и попадут в смежные поля когезионных сил (сил взаимного притяжения). Но сближению частиц будут препятствовать по мере удаления гидратных оболочек ионов сами ионы. Причем, чем меньше диаметры ионов, тем ближе частицы могут приблизиться и тем большие силы взаимодействия между ними возникнут, т. е. более прочно они слипнутся. В качестве примера приведем полученные нами данные испытания прочности на разрыв для подзолистой суглинистой почвы, насыщенной различными катионами по методу Гедройца. Почвенные образцы, насыщенные различными катионами, в воздушно-сухом состоянии растирались в ступке, после чего просеивались через сито с отверстиями 0.25 мм, одинаково увлажнялись и по весу набивались в формы (восьмерки), указанные ранее, после чего в формах высушивались на воздухе и разрывались на прессе типа Михаэлис. Оказалось, что образцы почвы, насыщенные H^+ , Ca^{++} , K^+ , Na^+ при сопротивлении разрыву показали соответственно 0.8, 1.0, 1.3, 1.6 кг/см², т. е. одновалентные катионы дают большую механическую прочность, чем двухвалентный кальций. Из одновалентных по приданию прочности на первом месте стоит натрий, имеющий меньший размер по сравнению с калием.

Для слипания частиц почвы необходимо, чтобы они попадали в силовые поля межмолекулярных сил. По мнению Б. В. Дерягина, силы притяжения есть межмолекулярные силы, они действуют вблизи поверхности частиц. Характерной особенностью этих сил является их резкое убывание с расстоянием (примерно обратно пропорционально шестой или седьмой степени расстояния). Следовательно, слипание возможно лишь тогда, когда частицы приблизятся друг к другу на молекулярное расстояние.

Необходимо различать непосредственное слипание и склеивание. В первом случае силы притяжения возникают непосредственно между сближающимися частицами. Во втором случае слипание между частицами почвы осуществляется при помощи другого, более дисперсного вещества. Это вещество служит прослойкой, соеди-

няющей почвенные частицы, и носит название клея. Химический состав клея может отличаться от химического состава склеиваемых частиц. Важно лишь то обстоятельство, что он не меняется в процессе склеивания. Изменяется лишь его физическое строение. Этим самым клей отличается от цемента, химическая природа которого изменяется в процессе цементации, а склеивание от цементации.

Так как при слипании частицы должны сильно сближаться, то большую роль играет размер самих частиц.

Для сферических частиц разных радиусов Б. В. Дерягин дает уравнение

$$F = 4\pi \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \sigma,$$

где F — сила слипания частиц; r_1 r_2 — радиусы частиц; σ — поверхностное натяжение на границе раздела частицы и среды. Для частиц одного и того же размера указанное уравнение примет вид $F = 2\pi r \sigma$.

Пересчитывая по последней формуле силы слипания на 1 см² поверхности почвы, мы получаем зависимость сил слипания от дисперсности частиц, как это показано в табл. 10.

Из табл. 10 следует: 1) силы слипания между частицами (в кг/см²) прямо пропорциональны их дисперс-

Т а б л и ц а 10

Сравнение сил слипания частиц с их весом

Радиус частиц, см	Сила прилипания между двумя частицами, дин	Площадь проекции частицы, см ²	Число частиц, умещающихся на 1 см ²	Сила прилипания, отнесенная к площади 1 см ² , дин	Сила прилипания, отнесенная к площади 1 см ² , кг	Вес частиц, покрывающих площадь в 1 см ² , кг
$5 \cdot 10^{-2}$	22.9	$7.9 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^2$	$1.3 \cdot 10^3$	$1.5 \cdot 10^{-3}$	$1.85 \cdot 10^{-1}$
$1 \cdot 10^{-2}$	4.6	$3.1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^{-3}$	$3.4 \cdot 10^{-2}$
$5 \cdot 10^{-3}$	2.3	$7.9 \cdot 10^{-5}$	$1.3 \cdot 10^4$	$1.5 \cdot 10^4$	$1.5 \cdot 10^{-2}$	$1.8 \cdot 10^{-2}$
$1 \cdot 10^{-3}$	$4.6 \cdot 10^{-1}$	$3.1 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^4$	$7 \cdot 10^{-2}$	$3.4 \cdot 10^{-3}$
$1 \cdot 10^{-4}$	$4.6 \cdot 10^{-2}$	$3.1 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^7$	$7 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^{-1}$	$3.4 \cdot 10^{-4}$
$1 \cdot 10^{-5}$	$4.6 \cdot 10^{-3}$	$3.1 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^9$	$7 \cdot 10^6$	7.0	$3.4 \cdot 10^{-5}$
$1 \cdot 10^{-6}$	$4.6 \cdot 10^{-4}$	$3.1 \cdot 10^{-12}$	$3 \cdot 10^{11}$	$7 \cdot 10^7$	70.0	$3.4 \cdot 10^{-6}$
$1 \cdot 10^{-7}$	$4.6 \cdot 10^{-5}$	$3.1 \cdot 10^{-14}$	$3 \cdot 10^{13}$	$7 \cdot 10^8$	700.0	$3.4 \cdot 10^{-7}$

ности, 2) слипание между частицами возможно лишь начиная с частиц диаметром менее 0.1 мм; более крупные частицы слипаться не могут, так как их собственный вес будет превышать силы слипания.

Эти положения в общем виде были известны еще классикам агрономической науки.

Почвенные частицы имеют разный размер, разную форму и неровную поверхность. Поверхность частиц при большом увеличении напоминает горную местность. Высокие «пики» чередуются с понижениями — «долинами». Чем крупнее частица, тем более крупные имеются неровности на ней.

Слипание частиц при сближении может происходить в отдельных точках (когда соприкасаются «пики») и в плоскостях (когда соприкасаются грани).

С увеличением раздробленности частиц суммарная площадь плоскостных контактов между частицами возрастает в первой степени их раздробления, число же точечных контактов — примерно в третьей степени раздробления. Это обстоятельство усложняет математическую разработку закономерностей слипания. При одинаковой раздробленности частиц при слипании переход от точечных контактов к плоскостным приводит к увеличению сил сцепления и повышению прочности почвы на разрыв и сжатие, отнесенных на 1 см². Поэтому становится ясной физическая природа давления при слипании частиц. Давление вызывает сближение почвенных частиц и тем увеличивает вероятность возникновения между ними сил сцепления, ведет к замене точечных контактов плоскостными, что тоже увеличивает силы сцепления, отнесенные на 1 см².

В почве между крупными почвенными частицами располагаются более мелкие и коллоидные частицы, служащие клеем. Процесс слипания частиц протекает обычно по типу склеивания. При значительном обводнении почвенные коллоиды и коллоидные пленки на поверхности более крупных частиц набухают. В этом состоянии они близко подходят друг к другу и составляют единую коллоидную систему. В ней при потере избыточной влаги возникают явления взаимодействия между частицами. Процесс напоминает медленную коагуляцию, происходящую при желатинировании гидрофильных кол-

лоидов — процессе, отличном от обычной коагуляции. При желатинировании частицы как бы выбирают положение, в котором связывают друг друга. При этом получается более упорядоченная система с некоторыми зачатками симметрии в структуре. Из физико-химии коллоидов известно, что при желатинировании коллоидные частицы образуют гель. В геле коллоидные частицы связываются друг с другом и образуют как бы скелет или пространственную ферму, придающую гелю свойства твердого тела. В ячейках, образуемых этим скелетом, размещается вода.

Во всех случаях, когда имеет место желатинирование, нужно искать у коллоидов особое строение, а именно: частицы могут состоять либо из длинных цепей, либо из плоских сеток-листьев, т. е. в них заложены зачатки каких-либо полимеризационных процессов.

Ввиду того, что частицы при желатинировании должны перед слипанием быть определенным образом построены, важно, чтобы процесс проходил медленно и однородно во всем объеме раствора. Поэтому такие медленно идущие процессы, как испарение, способствуют этому явлению. При испарении воды из почвы в процессе желатинирования коллоидов между частицами почвы возникают «коллоидные мостики», удерживаемые силами сцепления (вандерваальсовыми). Уплотнение почвы благоприятствует этим явлениям.

В Агрофизическом институте разработана методика измерения явлений склеивания и изучены клеящие свойства различных коллоидных веществ: гидратов окиси железа, алюминия, кремнекислоты, гуминовой кислоты, гуматов кальция, калия, натрия, коллоидов из подзолистой и черноземных почв. На рис. 14 приводится схематическое устройство прибора для испытания клеящих веществ. Прибор состоит из двух круглых, хорошо отшлифованных пластинок из кварца, вставляемых в особое устройство обоймы. На поверхность этих пластинок наносилось то или иное клеящее вещество в виде коллоидного раствора. Обоймы с пластинками и нанесенным клеем одинаково во всех случаях сжимались и подвешивались, как указано на рисунке. К нижней обойме, имеющей крючок, прикреплялся невытягивающийся шнур или тросик. Наливая воду или насыпая

песок или мелкую дробь в ведро, производили разрыв двух склеенных пластинок. Сопротивление разрыву относится на 1 см^2 поверхности пластинок.

На рис. 15 приводятся кривые склеивания кварцевых пластинок коллоидами из кремневой кислоты, железа и алюминия. Рассматривая данные, приведенные на рис. 15, можно сказать, что у взятых веществ зависимость склеивания от содержания воды в коллоидной системе ясно выражена. Наблюдается отчетливый максимум склеивания в узкой области при высокой влажности. Уменьшение прочности склеивания для всех веществ после максимума дает основания истолковывать его как область перехода золя в гель с образованием в коллоиде жесткой фазы. С уменьшением воды в коллоидах жесткая система начинает разрушаться, в ней появляется и нарастает хрупкость.

На рис. 16 приводятся данные по склеиванию кварцевых пластинок гуминовой кислотой и гуматами. Гуминовая кислота выделялась по методу Свен Одена из сфагнового торфа Шуваловских торфоразработок (Ленинград). Гуматы калия и кальция получались насыщением гуминовой кислоты гидратами окисей соответствующих металлов. Торфяной клей получался из того же торфа, что и гуминовая кислота, путем обработки его однопроцентным КОН и кипячением в течение двух часов. По своему составу он представлял смесь битумов и смол, гуматов, щелочнорастворимых лигнинов, растворимых углеводов и пр. с преобладанием в этой смеси гуматов.

Рассматривая рис. 16, можно видеть, что гуминовая кислота и гуматы обладают более высокими показате-

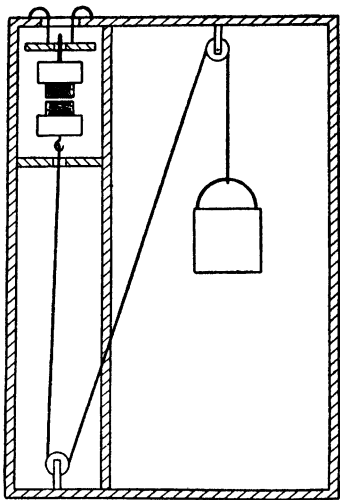


Рис. 14. Установка для испытания на прочность склеивания различными клеящими веществами.

лями прочности, чем предыдущая группа. Здесь нет узкой области перехода золя в гель. Клеящие свойства проявляются в более широкой области и при больших концентрациях клеящих веществ. Здесь мы имеем дело с «рассасыванием» упругих напряжений, создающихся в коллоидной системе. По мере увеличения концентрации коллоида скорость рассасывания упругих напряжений замедляется. Прочность склеивания возрастает в линейной зависи-

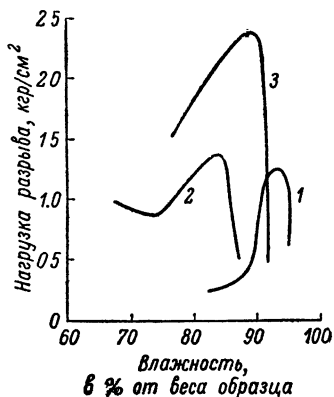


Рис. 15. Зависимость прочности склеивания минеральными коллоидными веществами от содержания в них воды.

1 — кремневая кислота; 2 — гидрат окиси железа; 3 — гидрат окиси алюминия

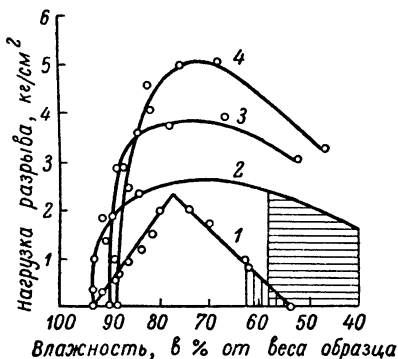


Рис. 16. Зависимость прочности склеивания гуматами от содержания в них воды.

1 — чистая гуминовая кислота; 2 — гумат кальция, 3 — торфяной клей; 4 — гумат кальция. Заштрихованы области появления нерастворимости в воде у клеящих веществ.

мости от концентрации клеящего вещества. Наконец, наступает такое состояние, что возникающие при склеивании упругие напряжения уже не успевают рассасываться. Возникают перенапряжения, появляются трещины. Эти явления нарастают также в линейной зависимости от концентрации вещества. Максимум прочности склеивания находится там, где концентрация клеящего вещества и время рассасывания упругих напряжений достаточно велики. В обе стороны от этого максимума прочность

склеивания резко падает. Такую типичную кривую прочности склеивания мы наблюдаем для гуминовой кислоты. Роль катионов в прочности склеивания гуминовой кислотой сказывается в том, что они придают ей большую пластичность. Скорость ослабления упругих напряжений в этом случае возрастает, и переход через максимум становится более плавным.

Вообще кривые прочности склеивания гуматами имеют характер, типичный для пластических веществ. Наибольшую прочность склеивания дают одновалентные катионы — калий и натрий, здесь не приведенный.

На рис. 17 показана зависимость склеивания кварцевых пластинок коллоидами деградированного суглинистого чернозема.

Почвенные коллоиды выделялись при помощи 0.05н едкого натра с последующим электродиализом до нейтральной или слабокислой реакции. Из данных рис. 17 видна также резкая зависимость прочности склеивания от влажности. Характер кривых указывает, что механические прочности склеивания минеральными и органическими почвенными коллоидами близки между собой. Это подтверждают опыты со склеиванием теми же коллоидами, обработанными H_2O_2 . Ход кривых в этом случае аналогичен для тех веществ, где обработка H_2O_2 не производилась. По характеру склеивания почвенные коллоиды напоминают полутораокислы и кремнекислоты, но в то же время отличаются от них более выраженным интервалом желатинирования. Это указывает на то, что хрупкость при склеивании начинает наблюдаться при значительном обезвоживании коллоида, и потому максимум прочности для почвенных коллоидов перемещен в область больших концентраций коллоида или малых влажностей.

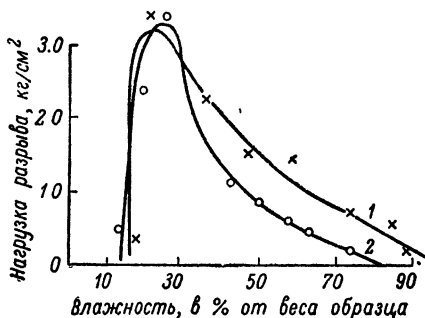


Рис. 17. Зависимость прочности склеивания почвенными коллоидами деградированного суглинистого чернозема от содержания в них воды.

1 — естественная почва; 2 — обработанная H_2O_2 .

Изучение клеящих свойств природных клеящих веществ также подтвердило известные в литературе данные, что прочность склеивания плоских отшлифованных поверхностей уменьшается с увеличением толщины прослойки. Объясняется это тем, что с утолщением клеящей прослойки ухудшаются физические свойства клеящих веществ — при высыхании из-за объемных изменений клея появляются трещины. Чем тоньше клеящая прослойка, тем меньше в ней дефектов из-за трещиноватости.

Другая картина наблюдается, когда мы вводим клеящее вещество в такое пористое тело, как почва. В табл. 11 показаны зависимости прочности склеивания на разрыв, полученные по указанной ранее методике, от рода поглощенных катионов и количества вводимого в почву

Т а б л и ц а 11

**Сопротивление почвенных блоков разрыву
в зависимости от рода поглощенных катионов
и количества органического вещества**

Количество введенного в почву органического вещества, % от веса почвы	Сопротивление блока разрыву, кг/см ²			
	катион, которым насыщена почва			
	H ⁺	Ca ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺
0	0.8	1.0	1.3	1.6
0.5	0.7	1.0	1.5	—
1.0	0.7	1.0	1.7	1.8
3.0	0.9	0.9	1.8	2.5
5.0	1.0	1.4	1.7	2.5
10.0	1.6	1.0	1.7	1.9
15.0	1.6	1.0	—	1.3
20.0	0.9	0.9	1.3	1.2

органического вещества. Опыты производились на образце дерново-подзолистой суглинистой почвы. В качестве клеящего вещества применялся торфяной клей, упоминаемый выше, отдиализированный до pH 6.0. Сопротивление почвы разрыву можно рассматривать как константу склеивания.

Рассматривая табл. 11, мы видим следующее.

1. Органическое вещество, вводимое в количестве до 3—5%, увеличивает силы склеивания почвенных частиц, дальнейшее же увеличение количества ведет к уменьшению прочности на разрыв.

Объяснение этим данным надо искать в характере изменения контактных условий. В восходящей части имеется улучшение контактных условий вследствие введения высокодисперсного материала. Число контактов между частицами при этом увеличивается, а вместе с тем возрастает площадь отрыва. Схематически это показано на рис. 18.

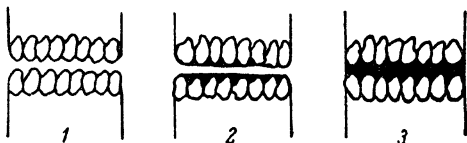


Рис. 18 Изменение контактных условий при склеивании почвы органическими веществами.

1 — без органических веществ; 2 — полное сглаживание неровностей органическим веществом, контактные условия наилучшие, 3 — избыточное количество органических клеящих веществ.

Максимум сопротивления разрыву соответствует заполнению всех неровностей. Дальнейшее увеличение клеящего материала уже ничего не прибавляет к контактным условиям и ведет лишь к увеличению прослойки клеящего материала между частицами, а выше указывалось, что с увеличением клеящей прослойки сопротивление разрыву падает.

2. Поглощенные катионы увеличивают сопротивление почвы разрыву в направлении $\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Ca}^{++} > \text{H}^+$, причем эта картина наблюдается и при введении клеящих веществ примерно до 10% от веса почвы. При дальнейшем увеличении количества вводимых клеящих веществ картина изменяется и такой ясной закономерности уже не наблюдается.

Итак, в результате высыхания обводненной почвы почвенные частицы слипаются между собой или непосредственно (при малых размерах) или путем склеивания

коллоидами, располагающимися между крупными частицами. Коллоидные пленки на поверхности более крупных частиц и истинные коллоиды почвы при высыхании связываются в общую систему, упрочняющуюся при высыхании. Поэтому из слипшейся почвенной массы или из комков, образующихся из нее, ни одна частица почвы не выпадает, а все они связаны клеящим материалом, который некоторыми авторами неправильно называется цементом. Исключением являются лишь песчаные и близкие к ним супесчаные почвы. Крупные частицы, составляющие эти почвы, не могут слипаться между собой, коллоидов же, могущих служить клеем для них, в этих почвах мало.

Для возникновения процесса слипания между почвенными частицами не обязательно, чтобы почва была всегда переувлажнена. Начальной стадией слипания является возникновение в почве капиллярных сил, появляющихся при смачивании ее водой и удерживающих частицы друг около друга. В местах смачивания частиц почвы вытесняется поглощенный воздух, который мешал сближению частиц, далее «возбуждаются», т. е. начинают набухать коллоидные пленки на поверхности частиц и собственно коллоиды, что способствует их скольжению и более плотной укладке при незначительных нагрузках.

Т а б л и ц а 12

**Сопротивление разрыву образцов дерново-слабоподзолистой
тяжелосуглинистой почвы
(Павловский район Ленинградской области)**

Влажность (%), до которой доводился образец		Предел прочности разрыву в сухом состоянии, г/см ²			
весовая	объемная	на всю площадь	среднее на 1 см ²	среднее из числа образцов	отклонения от средней величины предела прочности
30	39.0	3820	955	8	±71.3
25	32.5	2070	518	9	±77.4
20	26.0	1000	250	10	± 3.3
15	19.5	965	241	8	±10.9

В результате в этих местах между частицами при высыхании возникают молекулярные силы взаимодействия. Чем больше частица смочена, тем больше таких сил возникает. Это видно из следующего опыта.

Образцы из дерново-подзолистой суглинистой почвы растирались в воздушно-сухом состоянии в ступке и просеивались через сито с отверстиями 0.25 мм. Просеянный материал набивался в восьмерки указанной ранее формы. Далее образцы различно увлажнялись и находились в состоянии увлажнения одни сутки, после чего высушивались на воздухе. В этом состоянии они испытывались на разрыв по указанной ранее методике. Как следует из данных табл. 12, прочность почвенных образцов на разрыв возрастает по мере увеличения предварительного увлажнения.

При высыхании увлажненной почвы капиллярные силы переходят в межмолекулярные силы сцепления, между частицами возникают силы, которые, как указывалось ранее и как следует из табл. 12, не могут быть объяснены капиллярными силами, так как разрыв образцов производился в сухом состоянии. Под влиянием этих сил почвенные частицы после увлажнения и последующего высыхания почвы связываются в слитную массу.

Глава III

КРОШЕНИЕ ПОЧВЕННОЙ МАССЫ НА СТРУКТУРНЫЕ ОТДЕЛЬНОСТИ

Слитная почвенная масса, образовавшаяся после увлажнения и последующего высыхания почвы, разделяется на комки (агрегаты) под влиянием целого ряда физических явлений, совершающихся как в самой почве, так и в окружающей среде. Во всех случаях в почве возникают капиллярные силы, вызывающие в ней объемные изменения. Эти силы приводят к перераспределению плотности в почвенной массе. В одних местах почвенные частицы сближаются, в других раздвигаются. Появляются плоскости, по которым силы сцепления между частицами ослабевают и по которым почва разбивается на комки при воздействии на нее извне. Эффект крошения почвы усиливается от неоднородности сложения почвы. Крошение почвы совершается либо самопроизвольно, под влиянием лишь физических явлений, протекающих в твердой части почвы, либо «принудительно», под воздействием животных, растений и человека.

К числу самопроизвольных явлений, вызывающих появление в почве участков с ослабленными силами сцепления между слипшимися частицами, относятся изменения, возникающие в почве под влиянием высушивания и промораживания. К числу явлений, «принудительно» изменяющих соотношение сил сцепления между частицами почвы, относятся такие, как действие корневых систем растений на почву, действие роющих и копающих животных и почвообрабатывающих орудий.

Крошение почвы на агрегаты под влиянием высушивания

Бесструктурная почва при значительном увлажнении превращается в сплошную, более или менее вязкую массу. Силы сцепления между частицами этой массы, как мы уже видели ранее, с увеличением увлажнения сначала возрастают, а затем падают. Вязкость почвенной массы тем меньше, чем больше в ней воды. Вода, размещаясь между почвенными частицами, раздвигает их, ослабляя силы сцепления между ними. При этом большую роль будут играть такие факторы, как размер почвенных частиц, состав минеральных и органических коллоидов почвы и характер катионов, которые находятся в поглощенном состоянии. Чем больше почва содержит мелких частиц, в особенности коллоидов, а среди коллоидов — органических веществ, тем больше она удержит в поглощенном состоянии катионов. Катионы же, взаимодействуя с водой, ориентируют молекулы воды, создавая вокруг себя гидратную оболочку. Увеличение количества поглощенных катионов увеличивает и количество связанной с ними воды. Чем меньше радиус катиона, тем большей плотностью электрических зарядов на единицу поверхности он обладает и тем большее количество воды он свяжет вокруг себя. Одновалентные катионы, а среди них литий и натрий, больше свяжут слоев воды вокруг себя, чем двухвалентный кальций или трехвалентные алюминий и железо. Значит, одновалентные катионы при увлажнении почвы дальше отодвинут слипшиеся почвенные частицы друг от друга и уменьшат силы взаимодействия между ними, как это видно из следующих данных (для дерново-подзолистой, суглинистой на моренном суглинке почвы):

		Сопротивление разрыву, кг/см ²
При 24% влажности	{ Na ⁺	. . 0.207 ± 0.00570
	{ Ca ⁺⁺	. . 0.415 ± 0.038
В воздушно-сухом состоянии	{ Na ⁺	. . 2.268 ± 0.053
	{ Ca ⁺⁺	. . 0.878 ± 0.11

Образцы дерново-подзолистой суглинистой почвы насыщались ионами натрия и кальция, в воздушно-сухом состоянии растирались в ступке, просеивались на сите

с отверстиями 0.25 мм, после чего набивались в стандартные формы до определенной, одинаковой во всех случаях плотности, затем смачивались и испытывались на разрыв во влажном и воздушно-сухом состояниях. Как видно из приведенных данных, почва, насыщенная ионами натрия, во влажном состоянии оказывает меньшее сопротивление разрыву, чем почва, насыщенная кальцием, в сухом же состоянии наоборот. Разница между разрывами во влажном и сухом состоянии у почвы, насыщенной натрием, значительно большая, чем у кальция.

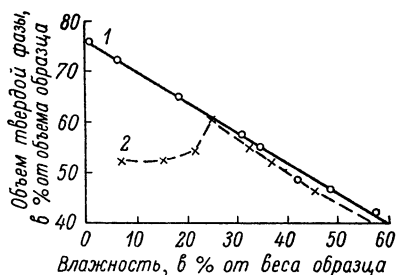


Рис. 19. Уплотнение образца обыкновенного суглинистого чернозема в зависимости от увлажнения и высыхания.

1 — распыленный образец почвы избыточно увлажнялся и высушивался, 2 — распыленный образец почвы постепенно увлажнялся и уплотнялся методом вибрации.

фазному (вода + твердые частицы почвы + воздух) в массе почвы возникают капиллярные силы, сжимающие в определенном направлении почвенную массу и уплотняющие ее. Чем более увлажняется почва, тем больше она уплотняется при высыхании. На рис. 19 показано изменение плотности образца почвы обыкновенного суглинистого чернозема в зависимости от увлажнения и высыхания.

Образец из обыкновенного суглинистого чернозема растирался в ступке, просеивался через сито с отверстиями 0.25 мм и различно смачивался и уплотнялся методом вибрации (образец 2). Как видно из рисунка, уплотнение образца возрастало с увлажнением, достигало максимума, а затем падало. Уплотнение измерялось взвешиванием определенного объема почвы с принятием

во внимание влажности. На рисунке показаны объемы, занимаемые твердой фазой почвы при данной влажности. При достижении абсолютной влажности 58% почва превращалась в грязь. В таком состоянии она поддерживалась более суток и затем подвергалась высушиванию. Плотность почвы в этом случае измерялась путем взвешивания на весах вырезаемых из почвы геометрически правильных фигур, с учетом влажности почвы. Высушивание без давления извне показало, что плотность образца почвы продолжает расти до абсолютно сухого состояния. По сравнению с воздушно-сухим состоянием почва уплотняется в полтора раза, таким образом уплотнение почвы, возникшее под влиянием капиллярных сил, переходящих в дальнейшем в силы взаимного притяжения, вызывает объемные изменения в почве. Ввиду неоднородности (анизотропности) почвы направление этих сил различно, а вместе с тем различны и объемные изменения. По этой причине в почве возникают перенапряжения, в результате которых появляются трещины. Повторяющиеся увлажнения и высушивания почвы увеличивают ее трещиноватость, которая является началом образования агрегатов. Характер объемных изменений почвы, приведенный на рис. 19, не является типичным для всех почв. Встречаются почвы, объемные изменения которых при высыхании воды доходят до определенного предела и далее не увеличиваются, несмотря на убыль воды. Это связано с наличием в почве «жесткого» скелета из крупных частиц, несжимаемого объема которого достигает почва при высушивании.

Теоретически можно представить себе смесь из почвенных частиц различной дисперсности, почти лишенную способности давать трещины при высыхании. В этом случае почва должна иметь грубую фракцию (например, песчаную), которая образует несжимаемый скелет. В порах этой грубой фракции размещается другая, более дисперсная фракция. В порах, образующихся в результате смешения двух фракций, размещается еще более мелкая фракция и т. д. При таком построении образуется смесь с малыми объемными изменениями. Практика дорожного и гончарного дела выработала примерные рецепты добавок грубого материала в глину для получения прочной и не растрескивающейся смеси.

Чем больше почва содержит коллоидных частиц и чем однороднее ее механический состав, тем больше способность давать трещины. Увеличение количества органического вещества в почве в общем способствует возникновению ее трещиноватости, в особенности тогда, когда между минеральными частицами образуются сплошные прослойки органического вещества. На характере трещиноватости сказывается род поглощенных почвенных катионов, как это видно из данных, полученных на подзолистой суглинистой почве и приведенных в табл. 13.

Почва в воздушно-сухом состоянии растиралась деревянным пестиком и просеивалась через сито с отверстиями 0.25 мм. Такой обработке подвергались серии почв, насыщенных Н⁺, Са⁺⁺, Na⁺, К⁺ (методика их насыщения основаниями описана ниже). Все образцы пропитывались разными концентрациями коллоидных органических веществ, затем в состоянии грязи раскладывались в мелкие стеклянные чашечки с плоским дном и сушились на воздухе. Образующиеся при этом трещины замерялись. Линейное протяжение трещин на 1 см² и служило мерой сравнения. Полученные данные приводятся в табл. 13.

Т а б л и ц а 13

**Трещиноватость почвенных образцов (мм на 1 см²)
в зависимости от количества органического вещества и рода
поглощенного катиона**

Количество введенного в почву органи- ческого вещества, % от веса почвы	Н ⁺	Са	К	Na ⁺
0	1.2	2.5	Трещин нет	Трещин нет
0.5	1.4	2.3	То же	То же
1.0	1.6	Трещин нет	»	»
3.0	4.8	0.6	»	0.7
5.0	6.2	4.9	3.0	Трещин нет
10.0	9.7	9.5	15.2	8.7
15.0	7.5	9.9	—	3.2
20.0	5.0	10.9	10.0	0.8

Не останавливаясь на детальном анализе данных табл. 13, необходимо сказать, что Са⁺⁺ и Н⁺ дают в общем более высокую трещиноватость, чем К⁺ или Na⁺. Но тре-

щины, образованные одновалентными катионами, шире и глубже. Почва, насыщенная одновалентными катионами, имеет более мелкие поры, так как число микроструктурных элементов в ней значительно меньше. Высыхание такой почвы идет медленнее, и упругие напряжения, возникающие в ней под влиянием капиллярных и вандерваальсовых сил, успевают рассасываться. Зависимость процесса возникновения в почве трещин и деформаций от величины структурных отдельностей показана еще М. Х. Пигулевским.

Вопросам образования в почве макроструктуры при высушивании почвы посвящен ряд работ. В табл. 14 приводятся данные, полученные П. Г. Адерихиным (1949), о влиянии высушивания на формирование почвенной структуры.

Образцы испытуемых почв доводились до воздушно-сухого состояния, растирались и просеивались через сито с отверстиями 3 мм и в количестве 2 кг помещались в вегетационные сосуды, где увлажнялись до указанных влажностей и при этих влажностях держались 12 дней, после чего высушивались. При высыхании почвы приобретали ту или иную структуру. Хорошо выраженная зернистая структура при высушивании образуется у почв, богатых гумусом и почти полностью насыщенных катионами кальция и магния. Крупнокомковатая структура образуется у почв, относительно бедных гумусом и содержащих, помимо катионов кальция и магния, хотя бы в незначительном количестве катион натрия (чернозем Митрофановского поля).

Итак, высыхание увлажненной почвы способствует, с одной стороны, склеиванию частиц, с другой — объемным изменениям, возникающим в почве под влиянием капиллярных сил. Длительное нахождение почвы в переувлажненном состоянии способствует соприкосновению частиц, возникновению между ними коллоидных «мостиков» и ведет к наибольшим объемным изменениям в связи с набуханием почвенных коллоидов. Эти явления при дальнейшем высыхании вызывают крошение почвы на отдельности, что наблюдается в природе при высыхании почвы весной.

На эффекте крошения сказываются: механический состав почвы, количество и качество поглощенных осно-

Влияние высушивания на формирование почвенной структуры

Почва	Влажность, % от полной влагоемкости	Количество агрегатов, %			
		больше 3 мм	3—1 мм	1—0.5 мм	меньше 0.5 мм
Обыкновенный чернозем (Митрофановский)	Воздушно-сухая (исходная)	—	19.0	18.2	62.8
	40.0	—	14.5	15.3	70.2
	80.0	100.0	—	—	—
Обыкновенный чернозем (Каменноостепной)	Воздушно-сухая (исходная)	—	37.8	15.1	47.1
	40.0	—	29.1	13.7	57.2
	60.0	1.6	25.7	17.4	55.3
	80.0	32.5	59.7	6.2	1.6
Мощный чернозем (Чакинский)	Воздушно-сухая (исходная)	—	37.5	15.1	47.4
	40.0	—	29.9	16.0	54.1
	60.0	10.0	29.8	14.8	45.4
	80.0	35.4	53.1	9.1	2.4
Дерново-подзолистая почва (Долгопрудное)	Воздушно-сухая (исходная)	—	30.6	10.8	58.6
	40.0	—	29.3	9.8	60.9
	60.0	98.3	1.0	0.2	0.5
	80.0	100	—	—	—

ваний, увеличение общего количества коллоидов в почве, в особенности органических, наличие двухвалентных поглощенных оснований. Быстрое высушивание почвы, попеременность высушивания и намачивания также благоприятствуют крошению почвы на отдельные при высушивании.

Крошение почвы при замораживании и оттаивании

Еще П. А. Костычев (1940) в курсе лекций по почвоведению, прочитанных в 1886—1887 гг. писал: «Практические хозяева считают вообще полезным промораживание почв, в особенности же почв тяжелых, и полагают,

что почвы делаются от этого рыхлее». Далее П. А. Костычев указывал: «Обстоятельным же исследованиям над влиянием промораживания на различные почвы мы обязаны теперешнему профессору Петровской академии А. А. Фадееву.

«Фадеев показал, что из влажных промороженных и снова оттаявших почв действительно вытекает часть воды, и если эту воду опять налить на оттаявшую почву, то она уже не задерживается почвою, т. е. влагоемкость почв после замораживания их действительно уменьшается, а это значит, что почвы делаются плотнее. Кроме того, найдено, что после промораживания оттаявшие почвы делаются менее связными, так как они распадаются на куски при меньшем давлении.

«Фадеев указал, что явления эти объясняются тем, что при замерзании почв лед образуется преимущественно только в некоторых местах, к которым стягивается вода из других частей почвы. Вследствие этого местами образуются гнезда льда, а в других частях почвы количество воды уменьшается, вследствие чего в этих частях почва уплотняется, как при высыхании. В местах образования льда после его растаивания остаются такие большие полости, что в них не может задерживаться вода; в уплотнившихся частях почвы ее задерживается тоже меньше. Меньшее сопротивление промороженных почв раздавливанию можно объяснить только образованием в почве трещин».

Приводя эту выдержку из «Почвоведения» П. А. Костычева, хочется отметить, что физические концепции формирования почвенной структуры под влиянием промораживания в дальнейшем не только не были развиты и углублены, но в связи с распространением и утверждением коллоидно-химических представлений на эти явления просто забыты.

Лишь в 20-х годах нашего века обширные исследования по замерзанию воды в почве и некоторые наблюдения над образованием структуры при замораживании почвы проведены Боюкосом. В дальнейшем работ, посвященных замерзанию воды в почвах и грунтах, было сделано много как за рубежом, так и у нас, в особенности в связи с изучением явлений вечной мерзлоты в почвах.

При изучении замерзания воды в почве и происходящих в ней в связи с этим изменений необходимо вспомнить о физических свойствах воды при различных температурах. Как известно, вода имеет наибольшую плотность при температуре 4°C . При понижении и повышении температуры плотность воды падает, т. е. один и тот же вес воды занимает все бóльшие и бóльшие объемы.

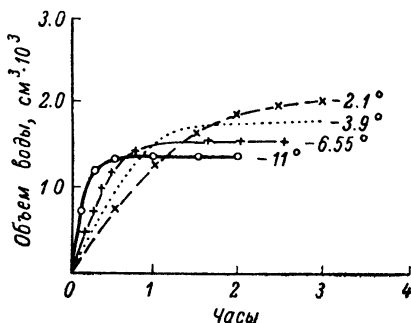


Рис. 20. Зависимость скорости замерзания воды в почве от величины отрицательной температуры (по Е. Юнгу).

При переходе воды в лед при 0° плотность воды скачком падает на 9%. При дальнейшем понижении температуры плотность льда начинает опять увеличиваться. Скорость кристаллизации воды или льдообразования, как это показано Юнгом (Jung, 1932), зависит от величины отрицательной температуры (рис. 20). Размеры кристаллов льда также связаны с величиной отрицательной температуры. Самые крупные кристаллы образуются при 0° . Чем ниже температура, при которой замерзает вода, тем более мелкие кристаллы льда при этом образуются. Этим до известной степени объясняется так называемый фактор тесноты при замерзании воды в почве (Вершинин, Дерягин и Кириленко, 1949). Фактор тесноты, или стерический фактор, заключается в том, что в узких промежутках или капиллярах вода не замерзает при 0° . Чем меньше диаметр капилляра или капли, тем при более низкой температуре замерзает в них вода, что под-

тверждается данными, полученными Т. Ф. Боровик-Романовой (1937):

	Диаметр, мм	Температура замерзания, С°
Капли воды	{ 1.57	— 6.4
	{ 0.24	—13.3
	{ 0.15	—14.6
	{ 0.06	—18.5
Капилляра	{ 2.01	— 9.6
	{ 1.72	—10.1
	{ 1.234	—10.9
	{ 0.656	—11.35

Применительно к почвам это явление было известно еще П. А. Костычеву. Так, в курсе почвоведения, указанном выше, он писал следующее: «Известно, что вода в капиллярных трубках может быть охлаждена значительно ниже 0° С без замерзания ее; несомненно, что подобное переохлаждение бывает и в почвах».

Для каждой раздробленной (дисперсной) системы характерна способность переуплотняться под влиянием промерзания. В табл. 15 показано влияние добавок

Таблица 15

Крошение каолина на агрегаты в зависимости от количества прибавленного песка при промораживании

Вариант опыта	Количество агрегатов, %							Коэф- фици- ент глыби- стости
	больше 7 мм	7—3 мм	3—2 мм	2—1 мм	1—0.5 мм	0.5—0.25 мм	меньше 0.25 мм	
Каолин	66.3	22.4	4.3	4.4	1.6	0.7	0.3	2.0
Каолин + 20% песка	89.0	7.4	1.4	1.1	0.5	0.3	0.3	8.1
Каолин + 40% песка	92.5	5.0	1.1	0.7	0.3	0.2	0.2	12.7
Каолин + 60% песка	90.5	6.9	1.2	0.8	0.2	0.2	0.2	9.5

¹ Коэффициентом глыбистости называется отношение суммы частиц больше 7 мм к сумме частиц от 7 до 0.25 мм.

песка с частицами размером от 0.5 до 0.25 мм на оструктурирование каолина при промораживании. Образцы смеси каолина и песка после промораживания слегка сжимались руками. Образующиеся при этом агрегаты рассеивались на ситах. Данные ситового анализа приводятся в табл. 15.

Опыт проводился при 43% влажности. Условия промораживания были однородны (пятисуточная экспозиция в холодильном шкафу типа ХТЗ при температуре

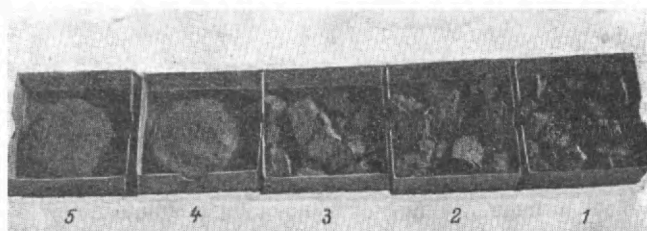


Рис. 21. Зависимость крошения образцов кембрийской глины при промораживании от различных добавок песка.

1 — без добавки; 2 — 20% песка, 3 — 40% песка; 4 — 60% песка; 5 — 80% песка.

—16° С). Приведенные в табл. 15 данные показывают, что прибавка песка к каолину значительно ухудшает его способность крошиться после промораживания. Аналогичные результаты получены при промораживании высокодисперсной глины (кембрийская глина из-под Пулкова) с добавлением песка (рис. 21). Рассмотрение этого рисунка позволяет сделать заключение, что 60%-я прибавка песка к глине совершенно лишает ее способности крошиться от промораживания. Кроме того, следует попутно отметить, что указанная глина, несмотря на высокодисперсный механический состав, грубо крошится (оструктурируется) от промораживания.

Для хорошего крошения почвы при промораживании необходимо, чтобы она имела наряду с тонкими капиллярами достаточное количество более крупных капилляров или наряду с коллоидными частицами содержала

бы и достаточное количество более грубых частиц. На рис. 22 показан крошащий эффект от промораживания дерново-подзолистой суглинистой почвы. Механический состав ее таков: частиц больше 0.25 мм — 1.33%, от 0.25 до 0.05 мм — 15.95%, от 0.05 до 0.01 мм — 27.24%,

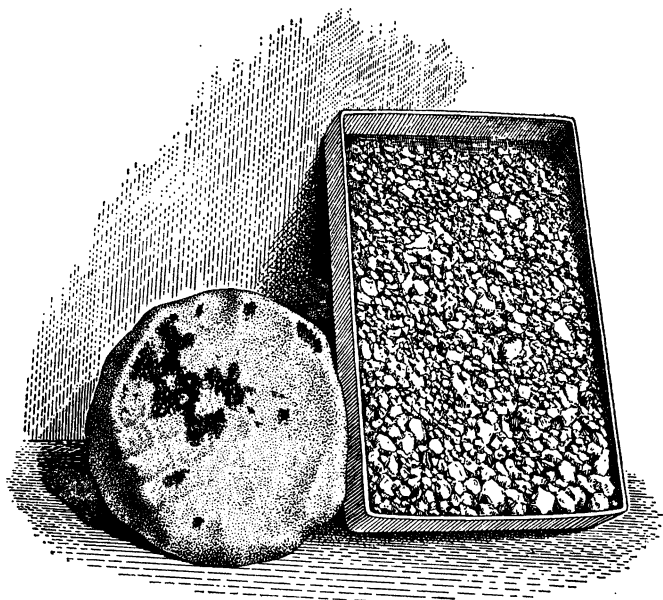


Рис. 22. Крошащий эффект от промораживания дерново-подзолистой суглинистой почвы. Слева: почва распылена, увлажнена и высушена. Справа: та же почва распылена, увлажнена, проморожена и высушена.

от 0.01 до 0.005 мм — 33.98%, от 0.005 до 0.001 мм — 9.1% и частиц меньше 0.001 мм — 12.4%. Несмотря на то, что почва содержит частиц меньше 0.001 мм всего 12.4%, но фракция пыли высока, причем пыли самых разнообразных размеров. Эти фракции пыли создают систему достаточно крупных пор, в которых в первую очередь начинает замерзать вода при температуре, близкой к нулевой. Это обстоятельство, как будет сказано

ниже, играет большую роль при крошении почвы на агрегаты.

На характер пористой системы почвы влияет также плотность почвы. В табл. 16 приводятся данные о влиянии исходной плотности почвы при промерзании на способность ее крошиться на агрегаты. Опыт произведен с почвой северокавказского суглинистого чернозема' (из Красного Аксая). Образцы почвы в воздушно-сухом состоянии растирались в ступке и просеивались на сите с отверстиями 0.25 мм, набивались в формы до различной плотности по весу, доводились до 30% влажности и промораживались в холодильном шкафу в течение 5 суток при температуре -16°C так же, как указано выше. После этого вынимались из шкафа, доводились до комнатной температуры и слегка сжимались. Ситовой анализ получающихся при этом агрегатов приводится в табл. 16. Из приведенных данных следует, что способность почвы крошиться резко падает при увеличении плотности более единицы, глыбистость же соответственно возрастает.

Таблица 16

**Агрегированность почвенных образцов при промораживании
в зависимости от плотности**

Плотность исходного образца почвы, г/см ³	Крошение, %							Коэффициент глыбистости
	более 7 мм	7—3 мм	3—2 мм	2—1 мм	1—0.5 мм	0.5—0.25 мм	менее 0.25 мм	
0.86	5.6	37.5	18.5	22.5	10.7	4.3	0.9	0.06
1.03	14.4	35.5	16.5	19.7	8.2	4.1	1.6	0.17
1.31	35.3	39.3	9.6	9.6	3.8	1.8	0.9	0.55
1.57	45.0	41.0	7.3	3.8	2.1	0.7	0.1	0.82

На характере пористой системы почвы сказывается и содержание в ней органического вещества. Для опыта взяты 10 почв примерно одинакового механического состава (суглинистые и глинистые). Образец каждой почвы доводился до влажности структурообразования,

промораживался в холодильном шкафу 5 суток при температуре -16°C , после чего вынимался из шкафа, доводился до комнатной температуры и слегка сжимался в руках. Образующиеся при этом агрегаты анализировались на ситах. На рис. 23 показана зависимость содержания в образцах агрегатов от 7 до 0.25 мм от количества органического вещества в почве, окисляемого H_2O_2 по Гедройцу.

Рассматривая рис. 23, можно сказать, что, несмотря на разброс точек, указывающий на влияние других факторов, способность почв крошиться на агрегаты при промораживании возрастает вместе с возрастанием в них органических веществ.

В почвенно-агрономической литературе можно встретить и противоположные утверждения о влиянии промораживания на последующее крошение почвы. Эти мнения не лишены основания. Дело в том, что крошение почвы после промораживания эффективно в тех случаях, когда в почве при замерзании нет избыточного количества воды. Избыточная влага раздвигает почвенные частицы. Это лишает их возможности уплотняться под влиянием давления, развиваемого льдом при замерзании воды. Почвенные частицы или микроагрегаты оказываются разделенными льдом. Никакого структурообразующего эффекта в этом случае ждать нельзя. На рис. 24

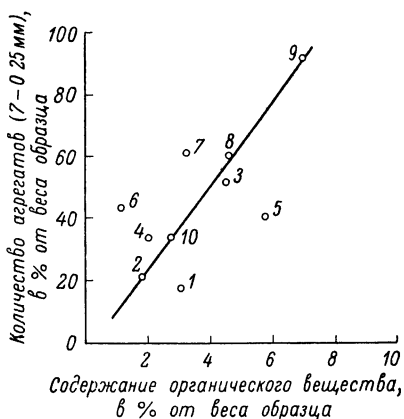


Рис. 23 Зависимость оструктурирования различных почв при промораживании от содержания в них гумуса.

1 — каштановая суглинистая почва из Красного Кута (черный пар), 2 — та же почва — 4-летний житняк, 3 — та же почва — 4-летний житняк + желтая люцерна, 4 — та же почва — 4-летняя желтая люцерна, 5 — та же почва — ковыльная степь, 6 — осолоделый солонец тяжело-суглинистый, 7 — солонец призматический суглинистый, 8 — тучный чернозем глинистый, 9 — обыкновенный чернозем глинистый, 10 — обыкновенный чернозем суглинистый.

показана зависимость крошения образцов северокавказского суглинистого чернозема от влажности, при которой они промораживались. Почвенные образцы при разных влажностях промораживались в холодильном шкафу, так же как и во всех предыдущих опытах (при -16°C в течение 5 суток). После промораживания и оттаивания образцы крошились путем легкого сжатия в руке. Как видно из рис. 24, до 30% увлажнения крошение почвы после промораживания возрастает, а далее падает.

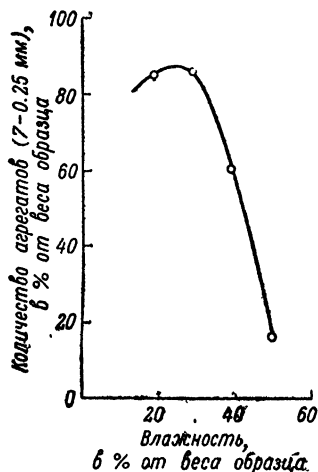


Рис. 24. Зависимость оструктурирования черноземной суглинистой почвы от влажности, при которой производилось промораживание.

Подводя итоги всему сказанному о крошении почвы при замерзании, надо отметить, что промораживание способствует крошению почвы на агрегаты, но степень этого крошения зависит от ряда условий.

Механический состав почвы, определяя соотношение крупных и мелких пор, прямо влияет на крошение почвы на агрегаты при промораживании. Как показывает опыт, суглинистые почвы со значительным содержанием пыли лучше крошатся при промораживании, чем тяжелые кембрийские глины. В последнем случае вода в почвенных капиллярах замерзает при более низких температурах, образуя мелкие кристаллы льда, и уплотняюще-дробящий эффект ее значительно ниже, чем в суглинистой пылевой почве.

Как и в случае с высушиванием, фактором, ограничивающим крошение почвы на агрегаты, может быть примесь песчаных частиц, которые при определенных количествах могут образовать несжимаемый «каркас», препятствующий объемным изменениям почвы и крошению ее на агрегаты.

Роль органического вещества при крошении почвы на агрегаты связана с образованием микроструктуры

почвы. Чем больше почва содержит органического вещества, тем более дифференцирована ее капиллярная система и тем более совершенно она крошится на агрегаты при промораживании.

Уплотнение сближает почвенные частицы, но эффект объемного расширения в этом случае снижается ввиду возрастания количества микропор. Льдообразование в почве в этом случае будет происходить при более низких температурах. Будут образовываться более мелкие кристаллы льда с малым объемным расширением.

Влажность почвы при замерзании играет важную роль в крошении ее на агрегаты. При избыточном содержании воды, когда между первичными почвенными частицами или микроагрегатами находятся прослойки воды, а в дальнейшем льда, макроструктура не только не образуется, наоборот, наблюдается распыление макроструктуры на более мелкие агрегаты.

Для лучшего крошения на агрегаты необходимо, чтобы наряду с высоким содержанием воды в почве имелись твердые контакты между почвенными частицами или микроагрегатами, тогда объемные изменения в почве, вызываемые водой, переходящей в лед, поведут к уплотнению почвенных частиц, слипанию их с одновременным расчленением слипшейся массы на отдельные прослойки льда. При малом содержании воды структурообразующий эффект при промораживании ничтожен. Вода в этом случае находится в тонких капиллярах и у поверхности частиц и замерзает при низких температурах с малым коэффициентом объемного расширения.

Многократное замораживание и оттаивание почвы повышает ее способность крошиться на агрегаты. Даже жирные глины при этом могут рассыпаться на отдельные. Мелкие волосные трещины, возникшие при первоначальном замораживании, при оттаивании заполняются водой и расширяются при повторных замораживаниях. При этом важно, что при окончательном оттаивании был обеспечен поверхностный сток, так как при долгом лежании в воде неводопрочные агрегаты, возникшие в процессе замерзания воды, расплываются, мелкие трещины заплывают и эффект крошения на агрегаты исчезает.

Для крошения почв на отдельности в процессе промораживания важно, чтобы в почве возникало достаточное количество льда. В конкретных полевых условиях это будет возможно лишь в том случае, когда при достаточном увлажнении почвы скорость кристаллизации воды будет превышать скорость ее испарения из данного слоя почвы.

В засушливых условиях юго-востока под влиянием осенних дождей почва может достаточно увлажняться. Но с появлением отрицательных температур и связанной с этим сухости воздуха, усиленной ветром, может создаваться и создается такая природная обстановка, когда скорость испарения воды будет превышать скорость льдообразования в почве. Крошения на отдельности в этом случае происходить не будет. Подзимний полив почвы может исправить положение.

Образование льда в почве при наступлении отрицательных температур начинается сразу во многих точках почвы. В первую очередь замерзает вода в крупных порах и некапиллярных промежутках. Очерчиваются участки в почве, разделенные замерзшей водой. В таких участках создаются «закрытые системы», отделенные от атмосферы прослойками льда. Такие системы грубо расчленяют почву на отдельности. Внутри этих участков, уплотненных замерзшей водой, при дальнейшем понижении температуры будут возникать другие, более мелкие участки с образованием льда и почва будет продолжать крошиться на мелкие агрегаты.

Практика земледелия с давних пор использует крошащий эффект промораживания почвы, применяя вспашку на зябь. В этом случае необходимо стремиться к тому, чтобы поле было обеспечено нормальным стоком. В противном случае избыток воды весной вызовет заплывание трещин, разделяющих почву на агрегаты в процессе замерзания в ней воды, и сведет на нет крошащее действие промерзания. Надо помнить, что агрегаты, образующиеся в почве под влиянием мороза, не водопрочны. При правильном регулировании осенне-весенних вод на полях и проведении своевременных культиваций и боронования весной можно с выгодой для урожая реализовать структуру, возникшую в почве при замерзании в ней воды.

Крошение почвы под действием корневых систем многолетней травянистой растительности

Еще в XVIII в., проезжая по русским черноземным степям, академик Рупрехт высказал мысль, что вопрос о происхождении чернозема — это вопрос ботанический.

Классики русского почвоведения — В. В. Докучаев и в особенности П. А. Костычев — связывали ореховатую структуру лесостепи с воздействием на почву корней деревянистой растительности, а зернистую структуру чернозема — с воздействием корневых систем травянистой луговой растительности. Изучая смену растительности на зарастающем перелогe, П. А. Костычев в 1886 г. установил степень крошения почвы под воздействием корневых систем различных видов травянистой растительности. Его работы получили дальнейшее развитие в учении о травопольной системе земледелия, разработанной В. Р. Вильямсом.

Идеи русских ученых о восстановлении структуры почвы под воздействием на нее корневых систем травянистой растительности были восприняты и в других странах. Известный американский почвовед Л. Д. Бейвер (Baver, 1942) в своей книге «Почвенная физика» пишет: «...травяной дерн повышает грануляцию. Каждый, изучающий почву, знаком с высокой оструктуренностью почв прерий. Кто работал с травами, тот будет находиться под сильным впечатлением влияния корней на грануляцию почвы».

Воздействие корневых систем травянистой растительности на почву происходит следующим образом. Корни и корешки, пронизывающие почву во всех направлениях, раздвигают почвенные частицы на своем пути. Почва между ходами корней уплотняется. Корни, отмирая и перегнивая в почве, создают в ней переменную плотность. По ходам сгнивших корней сопротивление почвы почвообрабатывающим орудиям будет наименьшим. По этим плоскостям происходит крошение почвы при обработке.

В. Р. Вильямс в курсе лекций по почвоведению писал: «Не может быть сомнения, что влияние корневых остатков на прочность почвы тем лучше, чем развитее корневая система растений по отношению к разветвленности,

поэтому наилучшее влияние на строение почвы и на ее прочность оказывают такие растения, как клевер, люцерна и другие многолетние кормовые бобовые». В дальнейшем, развивая учение о структурообразующей роли травянистой растительности, акад. Вильямс обращает внимание на еще большую роль в этом процессе многолетних злаков луговой формации. Корни и корешки, отмирая в почве, накапливают в ней органическое вещество, которое придает водопрочность почвенным агрегатам. Это свойство корневых систем травянистой растительности мы рассмотрим в дальнейшем. Здесь же постараемся уяснить себе количественную сторону крошения почвы на агрегаты под действием корневых систем.

Если с небольшого участка однородной почвы из разных мест мы возьмем образцы с глубины пахотного слоя, перемешаем их, получим средний образец, разложим его тонким слоем и высушим на воздухе, затем рассеем на ситах с разным диаметром отверстий, то мы получим данные о размерах агрегатов, на которые распадается почва. Такие образцы можно брать с разных полей севооборота¹ и составить картину, как корневая система различных растений действует на почву в отношении крошения ее на агрегаты.

Остановимся на нескольких примерах. В табл. 17 приводятся данные Н. И. Саввинова (1936а), полученные на опытном поле Тимирязевской сельскохозяйственной академии. Почва дерново-подзолистая, легкосуглинистая на моренном суглинке. Опыт с бесменными культурами проводился в течение нескольких десятков лет.

Сравнивая коэффициенты структурности, мы видим, что непрерывное парование не способствует агрегации почв. Однолетние зерновые культуры по сравнению с паром улучшают крошение почвы, но более эффективно действует клевер, который повышает коэффициент структурности почвы в 10 раз.

В табл. 18 приводятся аналогичные данные, полученные нами на дерново-слабоподзолистой суглинистой карбонатной почве в совхозе Губино Волосовского района Ленинградской области.

¹ Для характеристики целого поля образцов берется столько, сколько необходимо для получения статистически достоверных данных.

Зависимость крошения почвы от занимающей поле культуры

Делянки	Количество агрегатов, %						Коэффициент структур- ности ²
	больше 10 мм	10—3 мм	3—1 мм	1—0.5 мм	0.5—0.25 мм	меньше 0.25 мм	
Бессменный пар	75.7	12.9	5.1	2.4	1.4	2.5	0.28
Бессменная рожь	30.0	30.2	21.5	8.2	5.1	5.0	1.9
Бессменный кле- вер по фону минерального удобрения . .	19.7	26.7	24.0	11.3	11.2	7.1	2.7

Т а б л и ц а 18

Зависимость крошения почвы на агрегаты от характера растительности

Поля севооборота	Количество агрегатов, %								Коэффициент структур- ности
	больше 7 мм	7—5 мм	5—3 мм	3—2 мм	2—1 мм	1—0.5 мм	0.5—0.25 мм	меньше 0.25 мм	
Овес с подсевом клевера	16.2	11.9	14.2	14.8	13.8	9.7	9.6	9.8	2.85
Клевер 1-го года пользования .	13.0	6.1	18.6	11.2	22.8	14.6	5.7	8.0	3.76
Целина, покры- тая разнотрав- ной луговой растительно- стью и редкой серой ольхой .	5.8	13.9	34.2	12.6	20.1	6.2	1.6	5.6	7.77

Образец почвы, взятый с целины, крошится на агрегаты лучше, чем образец со старопахоты. Количество фракций меньше 1 мм резко уменьшается. Агрономическая ценность агрегатов возрастает.

² Под коэффициентом структурности понимается отношение суммы фракций от 10 до 0.25 мм к сумме фракций меньше 0.25 мм и больше 10 мм.

**Зависимость крошения обыкновенного глинистого
чернозема от характера растительности**

Поля севооборота	Количество агрегат в, %								Коэффициент структур- ности
	больше 10 мм	10—5 мм	5—3 мм	3—2 мм	2—1 мм	1—0.5 мм	0.5—0.25 мм	меньше 0.25 мм	
Паровое поле на- ропропашного севооборота, не прошедшее че- рез ротацию (колхоз «Высо- кий» Таловско- го района Во- ронезской об- ласти	23.4	3.3	8.1	7.6	15.8	26.8	3.0	12.0	1.8
Паровое поле 7- польного тра- вопольного се- вооборота с од- нолетним поль- зованием трав, уже прошедшее одну ротацию (Институт зем- леделия им. В. В. Докуча- ева в Централь- ной чернозем- ной полосе) . .	10.7	11.3	7.7	10.9	12.3	16.1	28.9	2.1	6.0
Поле из-под мно- голетних трав 7-польного тра- вопольного се- вооборота с од- нолетним поль- зованием трав, проходящее вто- рую ротацию (тот же инсти- тут)	4.3	11.5	8.6	11.8	13.0	19.5	28.5	2.8	13.1
Некосимая це- лина в степи (заповедник, тот же инсти- тут)	0.5	4.1	17.3	36.5	18.0	10.3	11.5	1.8	42.5

В табл. 19 приводятся данные для черноземной почвы, которые указывают на высокую способность чернозема крошиться на агрегаты. Даже при паропропашном севообороте коэффициент структурности остается высоким (1.8). Под влиянием ротаций правильных севооборотов с годичным использованием трав коэффициент структурности почвы возрастает в 8 раз. Примером идеального крошения почвы на агрегаты является целина. На ней агрономически ценные фракции от 5 до 1 мм составляют более 70%.

На юго-восток от обыкновенных черноземов при большей сухости климата эффект крошения почвы под действием трав ослабевает, что видно из данных Н. И. Савинова (1936а), полученных на темно-каштановых суглинистых почвах Краснокутской опытной станции (табл. 20).

Т а б л и ц а 20

Эффект крошения почвы под действием трав

Поля севооборота	Количество агрегатов, %						Коэффициент структурности
	больше 10 мм	10—3 мм	3—1 мм	1—0.5 мм	0.5—0.25 мм	меньше 0.25 мм	
Четырехлетний пар	48.6	13.6	12.1	13.1	5.8	6.8	0.8
Четырехлетняя люцерна с житняком	36.7	20.0	19.9	10.3	7.1	6.0	1.3

Четырехлетнее пребывание травосмеси улучшило коэффициент структурности почвы только в 1.5 раза, что, как видно было из приведенных данных, могут сделать и зерновые культуры. Недостаток воды в условиях юго-востока ограничивает урожайность многолетних трав, а вместе с тем и крошащую роль многолетней травянистой растительности. Аналогичные данные получаются и на неполивных сероземах. Это обстоятельство не было учтено при повсеместном внедрении травопольной системы земледелия.

В заключение необходимо сказать, что в зонах достаточного увлажнения почва под действием корневых сис-

тем травянистой растительности приобретает способность крошиться на агрегаты. Полевые культуры, в особенности зерновые, способны улучшать агрегацию почв. Большим крошащим эффектом обладают травы, в особенности многолетние, так как они имеют более развитую, сильно разветвленную корневую систему. Само собой очевидно, что крошащее действие корневых систем трав тесно связано с их урожайностью. При высоких урожаях трав крошащий эффект их значительно превышает зерновые полевые культуры.

Сельскохозяйственное производство в зоне достаточного увлажнения давно применяет травы и травосмеси на полях. Крошение почвы на агрегаты под действием корневых систем травосмесей стало могучим средством воздействия человека на почву. Вводя в состав травосмесей растения с глубоко уходящей корневой системой (донник и др.), мы можем воздействовать на структуру не только пахотного, но и подпахотного и других более глубоких горизонтов, что повышает плодородие этих почв.

Чем большее число лет травосмеси находятся на данном поле, тем более высоким коэффициентом структурности обладает почва. Наибольший агрегирующий эффект наблюдается на целинных почвах в зоне обыкновенных черноземов под луговой растительностью (луговая степь),

Но нахождение трав на полях в системе севооборотов связано не только с их крошащим эффектом, но и с экономическими условиями хозяйства и в каждом конкретном случае решается в соответствии с местными естественно-историческими условиями.

Как протекает процесс рыхления почвы под травами? Изучение этого явления на дерново-подзолистых почвах показывает следующее. В первый же год после однолетней зерновой культуры, в которую подсеваются травы, поле начинает уплотняться. Ввиду прекращения обработки, рыхлящей почву, и под действием корневых систем развивающихся травосмесей плотность почвы под травами продолжает повышаться.

В зависимости от состава травосмесей, удобрительного фона и общих почвенных условий основная масса корней под травами создается либо в первый год пользования травами, либо во второй. Ходы по отмершим корням и кореш-

кам в осенне-зимнее время заполняются водой, которая, замерзая, расширяет эти ходы, реализуя тем самым агрегатное строение почвы, создаваемое корневыми системами травосмесей. На второй год пользования травами или на третий год жизни трав в пахотном горизонте (где сосредоточивалась основная масса корней) плотность почвы начинает уже уменьшаться. Уплотняющий эффект трав переходит в рыхлящий, как это можно видеть из

Т а б л и ц а 21

Динамика уплотнения почвы под многолетними травами

Вариант опыта	Травосмеси	Плотность на глубине 0—20 см			
		1949 г.		1950 г.	1951 г.
		май — по- сев тра- восмесей	сентябрь	сентябрь	сентябрь
По фону навоз- ного удобрения из расчета 30 т/га. Покров- ная культура — овес	Клевер с тимо- феевкой	1.20	1.36	1.37	1.27
	Клевер с люцер- ной и овсяни- цей	1.21	1.36	1.43	1.35
	Клевер с тимофе- евкой и овся- ницами	1.23	1.37	1.35	1.24
По фону мине- ральных удо- брений из рас- чета $N_{60}P_{60}K_{60}$. Покровная культура — овес	Клевер с тимофе- евкой	1.23	1.36	1.32	1.32
	Клевер с люцер- ной и овсяни- цей	1.24	1.37	1.40	1.23
	Клевер с тимофе- евкой и овся- ницами	1.19	1.38	1.34	1.21
Без удобрений. Покровная культура — овес	Клевер с тимофе- евкой	1.18	1.33	1.36	1.29
	Клевер с люцер- ной и овсяни- цей	1.16	1.33	1.41	1.31
	Клевер с тимофе- евкой и овсяни- цей	1.20	1.34	1.50	1.29

данных, полученных нами с Е. Н. Хайкиной на дерново-подзолистых суглинистых почвах экспериментально-опытного совхоза (Всесоюзного научно-исследовательского института растениеводства) «Красный пахарь» Пушкинского района Ленинградской области и приведенных в табл. 21.

Т. Мальцев (1954), исходя из своих опытов, считает, что многолетние травы в условиях засушливого Зауралья дают низкие урожаи, их следует заменить однолетними травами, высеянными по дискованной стерне. Зерновые культуры, высеваемые по однолетним травам, растут не хуже, как это принято считать, а лучше, чем после многолетних трав. Не имея материала для суждения об агрегирующем действии однолетних трав в опытах Т. С. Мальцева, мы должны отметить, что однолетние травы, посеянные по дискованной стерне, сохраняют в основном уплотнение почвы в нижней части пахотного слоя, приобретенное в конце года в результате посева зерновых культур. Возможно, что крошение почвы корневыми системами сильно развивающихся однолетних трав будет сходным с действием на почву многолетних трав одногодичного пользования.

Крошение почвы под действием почвообрабатывающих орудий

Здесь не рассматривается проблема взаимодействия между почвой и почвообрабатывающими орудиями во всей ее полноте, так как она велика и требует специального изучения. Здесь затрагивается лишь одна сторона этой проблемы: могут ли почвообрабатывающие орудия самостоятельно крошить почву на агрегаты или же они мобилизуют лишь то, что произошло в почве под воздействием на нее корневых систем травянистой растительности, промерзания, деятельности землероев, червей и насекомых, населяющих почву? Эти воздействия на почву уже наметили в ней структуру. Орудия же обработки почвы лишь доводят процесс агрегации до конца, переводя почву из плотноструктурного в рыхлоструктурное состояние.

Это действительно так, если рассматривать работу плуга. Когда отрезаемый пласт почвы поднимается по

отвалу плуга, он сжимается и в нем возникают скалывающие напряжения. В местах наименьших связей почва будет давать трещины и крошиться на мелкие отдельныености. Если в почве мест с наименьшими связями нет или мало, то под влиянием скалывающих напряжений на отвале плуга она будет крошиться на глыбистые отдельныености. Другая картина наблюдается при работе зубовых орудий (борон, культиваторов).

Целый ряд исследователей с давних времен указывают на то, что эти орудия обработки могут самостоятельно крошить почву, бывшую до того бесструктурной. Важно лишь правильно выбрать влажность обработки.

А. Пухнер еще в 1889 г. указывал на зависимость механической прочности почвы от дисперсности и содержания в ней воды. Гельригелю в 1898 г., как указывает Эренберг (Ehrenberg, 1931), удавалось соответствующим добавлением воды к почве создавать в ней комковатую структуру. Эту зависимость отмечает целый ряд иностранных авторов (Фиппин, Камерон, Боюкос, Слиффер и др.).

У нас эти исследования широко развивались с 1933 г. Д. Г. Виленским (1945) и рядом авторов. Создалось направление, разрабатывающее основы формирования почвенной структуры орудиями обработки.

Почвенно-физические основы этого направления таковы. К. К. Гедройц говорил о влиянии давления на формирование почвенной структуры. Надо сказать, что еще раньше на роль уплотнения обратил внимание П. А. Костычев. Он первый в своем курсе почвоведения рассмотрел законы укладки или упаковки почвенных частиц.

Для идеальной системы одинаковых по размерам шаров известны две укладки: кубическая или рыхлая и пирамидальная или плотная. В первом случае объем, занятый шарами, равен 52.4% общего объема, остальные 47.6% падают на пористые промежутки. Во втором случае соответственно 73.8% и 26.2%. Каждый шар при кубической укладке соприкасается с шестью соседними шарами; при пирамидальной же — с двенадцатью. Нетрудно предположить, что система шаров, рыхло сложенных под влиянием внешних воздействий, будет стремиться перейти в плотно сложенную, как более

устойчивую и более равновесную. Почва не состоит из идеальных шаров одного и того же размера. В агрегатном состоянии она может иметь более рыхлое сложение, чем идеальная система шаров. В бесструктурном же состоянии она, ввиду разнообразности размеров своих частиц, может уплотняться сильнее, чем система шаров с пирамидальной укладкой. Можно утверждать, что в естественных условиях почва неуклонно стремится перейти из рыхлого сложения в плотное. Этот элементарный закон почвенного сложения подмечен был давно. Так, П. А. Костычев в курсе лекций по почвоведению писал: «Почвы, предоставленные самим себе, при естественных условиях становятся со временем все более и более п л о т н ы м и, т. е. твердые частицы все более и более сближаются».

Это свойство почвы, хорошо всем известное, лучше наблюдается в нижних горизонтах, чем в верхних, где имеется наличие других, противоположно направленных процессов. Не является ли обработка почв на всем протяжении человеческой культуры борьбой с этой тенденцией почвенных частиц? Если тенденция почвы к уплотнению есть естественный закон, то должны существовать факторы, способствующие его проявлению. И это действительно наблюдается. К числу таких факторов относятся: 1) давление, 2) увлажнение почвы в определенных пределах.

В табл. 22 показана зависимость упаковки почвенных частиц от влажности и давления для обыкновенного суглинистого чернозема с удельным весом 2.33. Под упаковкой (укладкой) почвенных частиц понимается отношение объема твердой фазы почвы к общему объему образца.

Почва в воздушно-сухом состоянии растиралась в ступке и просеивалась через сито с отверстиями 0.25 мм. Затем в воздушно-сухом состоянии или при заданной влажности набивалась до постоянного объема, т. е. до тех пор, пока многократно приложенное давление с досыпкой почвы уже не изменяло заданного объема образца. Объем почвы во время опыта оставался постоянным, варьировали влажность и давление.

Из данных табл. 22 следует: почва в воздушно-сухом состоянии под нагрузкой стремится уплотниться, вследствие чего упаковка ее частиц возрастает с 48 до 63.6%.

Зависимость уплотняемости почв (в %) от влажности и давления

Влажность, %	Давление, кг/см²										
	0 37	0.74	1 3	1.85	3.7	11.1	18 5	37 0	55.5	74 0	110.0
Воздушно-сухая . .	48.0	48.8	49.9	50.0	50.7	53.0	55.1	57.6	58.1	60.4	63.6
10	45.6	47.0	47.5	48.6	49.4	52.7	55.3	60.5	62.3	63.3	67.2
15	42.2	45.0	45.8	47.0	47.8	52.7	56.1	62.8	64.1	63.6	59.5
20	41.4	41.0	44.4	45.4	47.2	52.7	56.3	62.3	64.6	63.6	69.3
25	41.1	43.0	46.1	48.6	49.9	57.7	60.5	65.7	69.0	69.3	69.8
30	41.7	46.5	48.4	51.7	54.5	61.5	62.3	63.3	62.3	63.7	63.7
35	47.5	54.6	56.1	56.3	57.3	58.1	58.7	58.7	59.5	56.9	58.1
40	51.0	52.5	52.5	53.6	51.8	54.8	51.9	53.0	54.3	52.7	54.9
45	51.6	47.7	49.6	47.6	47.1	—	—	—	—	—	—
50	46.0	45.6	47.2	45.8	47.8	—	—	—	—	—	—

Уплотнение почвы происходит пропорционально давлению. Кривая изменения плотности от давления имеет логарифмический вид, как это показано на рис. 25.

Наибольшая плотность почвы наблюдается при оптимальной влажности, которая различна при разных давлениях. Чем выше давление, производимое на почву, тем меньше оптимальная влажность максимального уплотнения почвы. Это ясно указывает на связь явления уплотняемости почвы с расположением воды в почвенно-капиллярной системе, деформирующейся под нагрузкой. Вода

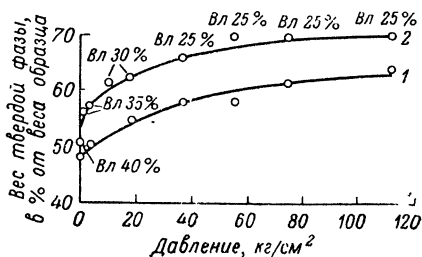


Рис. 25. Зависимость уплотнения образца обыкновенного суглинистого чернозема от давления.

1 — почва воздушнo-сухая, 2 — максимальные уплотнения твердой фазы при различных влажностях.

обладает смазочными свойствами. Эти ее свойства наглядно иллюстрируются кривой 2 на рис. 25. Кривая изображает максимумы уплотнения почвы (при оптимальных влажностях) в зависимости от давлений. Площадь между кривыми 1 и 2 характеризует смазочные свойства воды. Смазочные свойства воды объясняются не только тем, что вода заполняет неровности на поверхности почвенных частиц, но и тем, что под влиянием воды частично ¹ набухают коллоидные пленки на поверхности почвенных частиц. В силу этого частицы под нагрузкой скользят, поворачиваются и укладываются наиболее плотно. Данные рис. 26 характеризуют смазочные свойства трех изученных нами жидкостей.

¹ Частично при этих влажностях. Более полное набухание почвенных частиц происходит при полном обводнении почвы.

Обыкновенный суглинистый чернозем (Мичуринск) в распыленном состоянии при одном и том же давлении уплотнялся нами с различными жидкостями: водой, этиловым спиртом и керосином. Из данных рис. 26 следует, что ни этиловый спирт, ни керосин не обладают смазочными свойствами, т. е. смоченная ими почва не дает увеличения плотности по сравнению с воздушно-сухим состоянием. Этими свойствами обладает только вода. Только в ней набухают почвенные коллоиды.

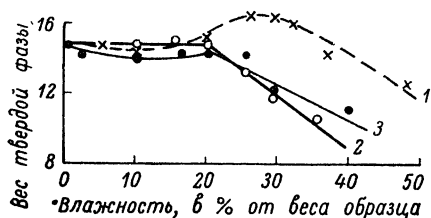


Рис. 26. Зависимость уплотнения обыкновенного суглинистого чернозема от степени его смачивания различными жидкостями.

1 — водой, 2 — этиловым спиртом; 3 — керосином

Напряжения, возникающие в почве под влиянием давления, носят неупругий, остаточный характер. Уплотнения, возникающие в смоченной почве, сохраняются и при ее высыхании. Это положение ясно подтверждается данными, приведенными в табл. 23 для подзолистой суглинистой почвы и кварцевой пыли.

Почва подготовлялась для анализа так же, как и в опытах, указанных выше, лишь набивка происходила при одном определенном давлении. После набивки почва выталкивалась из форм в виде цилиндров, доводилась до воздушно-сухого состояния и испытывалась на прессе типа Михаэлиса.

Данные табл. 23 указывают, что величины сопротивления сжатию как в подзолистой почве, так и в кварцевой пыли, полученные в воздушно-сухом состоянии, следуют за уплотнениями, созданными в почве во влажном состоянии, т. е. деформации, вызванные в почве во влажном состоянии, носят остаточный, неупругий характер.

**Зависимость уплотняемости почв и сопротивления сжатию
от влажности замешивания**

Почвы	Влажность, % на воздушно-сухую почву	Плотность	Упаковка, %	Сопротивле- ние сжатию, кг/см ²
Подзолистая су- глинистая почва	0	1.175	47.0	0
	10	1.265	50.6	1.735
	20	1.810	72.4	30.50
	25	—	—	35.00
	30	1.94	77.6	36.70
	40	1.85	54.0	23.50
Кварцевая пыль	20	1.31	54.8	0.882
	30	1.46	56.1	1.293
	40	1.92	76.1	3.668
	50	1.61	64.4	1.580

Возвращаясь к данным табл. 22 и наблюдая зависимость уплотнения обыкновенного чернозема от влажности и давления, можно сделать следующие выводы: 1) при малых давлениях плотность почвы при увеличении влажности сначала падает, затем повышается, достигает максимума и после опять падает; 2) при средних давлениях (10—11 кг/см²) плотность сначала остается постоянной, затем повышается до максимума и потом падает; 3) при больших давлениях плотность сразу начинает повышаться, доходит до наибольшего значения, а затем падает.

При смачивании сухой почвы незначительными дозами воды жидкость распределяется в почве дискретно, заполняя лишь клинообразные поры в местах соприкосновения частиц друг с другом. В этих местах образуются водные мениски и возникают капиллярные силы, удерживающие частицы друг с другом. При перемешивании почвы в момент набивки в сосуд слипшиеся частицы образуют комочки. Почва агрегируется, и плотность системы начинает падать. Уменьшение плотности будет продолжаться до тех пор, пока количество прибавленной воды еще недостаточно для смачивания всей почвы. Как только количество прибавляемой воды будет достаточным для объе-

динения дискретно смоченных участков в сплошные, способность почвы к агрегированию резко начинает падать, а плотность системы резко возрастать. В момент окончания дискретности в распределении воды почва приобретает новые качества. Поверхностная энергия почвенных частиц будет всецело определяться водой, расположенной уже сплошным слоем, в силу чего сопротивление частиц сдвигу будет минимальным (скользящие свойства частиц — максимальными). В то же время капиллярные силы в системе еще существуют и удерживают частицы друг около друга (трехфазное состояние почвы еще не разрушено). Нагрузки, прилагаемые к почве при различном увлажнении, действуют в противоположном направлении по отношению к силам, вызывающим агрегацию частиц. Под нагрузкой, равной 10 кг/см^2 , агрегации частиц не наблюдается, идет непрерывное нарастание уплотнения частиц.

Из всех произведенных исследований вытекает, что состояние максимального потенциального структурообразования почвы определяется не только соотношением почвенных частиц и воды, но и изменившимся состоянием самих твердых частиц почвы.

Если в состоянии влажности структурообразования почву рыхлить зубowymi орудиями, то она будет крошиться до зернистой структуры, проявляя тем самым основное свойство всех дисперсных тел — стремление принять состояние с наименьшей свободной поверхностной энергией. Поверхностная энергия в данном случае будет главным образом определяться водой, образующей непрерывную сеть пленок и менисков. Разрываемые на части рабочими органами орудий пленки воды вместе с частицами почвы будут стремиться принять, согласно второму закону термодинамики, форму с наименьшей поверхностью — шарообразную, т. е. крошиться на зерна округлой формы. М. Х. Пигулевский (1936), не зная этого свойства почвы, подмечал его в природе, что видно из следующего его высказывания: «Я заметил, что при небольшой пластичности и значительной способности к расширению при увлажнении большинства черноземов поверхность их агрегата стремится принять форму с наименьшей величиной поверхности при данном объеме вещества (шаровую).

Агрегаты в этом случае представляются в виде обособленных крупинок (5—7 мм в поперечнике), а вся масса слоя, в случае его однородности, резко выявляет крупитчатость, сохраняющуюся в результате рыхления даже после интенсивных дождей». Чтобы определить это состояние для любой почвы, необходимо образец воздушно-сухой почвы растереть и пропустить через сито с отвер-

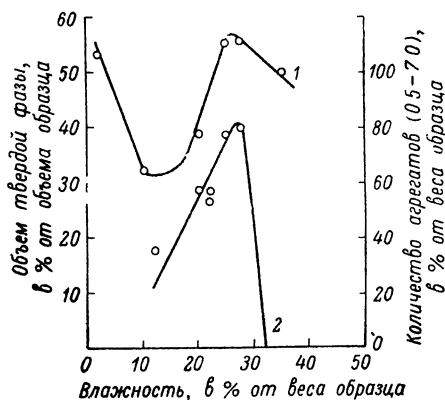


Рис. 27. Сравнение методов определения влажности структурообразования.

1 — метод уплотнения (по П. В. Вершинину),
2 — метод рассеивания на ситах (по Д. Г. Виленскому)

ствиями 0,25 или 0,5 мм. Из образца приготовить малые образцы 60—80 г каждый и увлажнить их до разных влажностей (10, 15, 20, 25, 30% и т. д. в зависимости от влагоемкости почвы). Далее, все образцы по очереди набиваются в металлический стаканчик емкостью не более 40 см³ (с отношением длины к ширине 3 : 2), который постукиванием (или на электровибрационном столике) заполняется до верху. Почва досыпается в стаканчик каждый раз до тех пор, пока не прекратится осадка. После этого образец взвешивается на технических весах. Зная объем стаканчика и влажность почвы, можно определить плотность почвы при каждой из заданных влажностей. Самая высокая плотность укажет на влажность структурообразования для зубовых орудий.

Влажность структурообразования, по Д. Г. Виленскому, определяется перемешиванием распыленной почвы с разными количествами воды (в фарфоровой чашке шпателем) и определением на ситах получающегося при этом агрегатного строения почвы.

На рис. 27 показано определение влажности структурообразования, произведенное нашим методом и методом проф. Д. Г. Виленского. Как видно из рисунка, оба метода указывают на одно и то же количество воды, при котором происходит максимальное крошение почвы.

Приводим агрегатные анализы почвы, полученные при влажности структурообразования, определенной нашим способом.

Соотношение между влажностью почвы и объемным весом почвенного образца дерново-суглинистой карбонатной почвы (Ленинградская область), установленное методом вибрации

Влажность, % на абсолютно сухую навеску

Вес твердой фазы в объеме сосуда с почвой, г

9.71	10.92
24.33	11.49
29.50	11.75
34.57	13.76
37.50	14.32
40.80	14.14
42.50	13.86

При установленной оптимальной влажности 37.5% получены следующие результаты агрегирования (% к весу образца):

Агрегатов больше	7 мм		4.46
»	»	5 »	 9.86
»	»	3 »	 25.07
»	»	2 »	 15.98
»	»	1 »	 36.26
»	»	0.5 »	 6.80
»	»	0.25 »	 1.03
»	меньше	0.25 »	 0.54

Соотношение между влажностью и объемным весом почвенного образца суглинистого чернозема (Оренбургская область), установленное методом вибрации

Влажность, % на абсолютно сухую навеску	Вес твердой фазы в объеме сосуда с почвой, г
Воздушно-сухая почва	16.15
10	13.95
20	15.05
25	19.55
28	20.75
30	21.00
32	21.00
35	20.69
40	20.05

При установленной оптимальной влажности 30.0—32.0% получены следующие результаты агрегирования (% к весу образца):

Агрегатов больше	7 мм	10.0
»	5 »	22.0
»	3 »	33.2
»	2 »	16.0
»	1 »	16.0
»	0.5 »	2.2
»	0.25 »	0.3
» меньше	0.25 »	0.3

В результате рассмотрения изложенных выше вопросов можно сделать такой вывод.

Почва, как дисперсная система, предоставленная сама себе, проявляет постоянную тенденцию, направленную: 1) к максимальному уплотнению слагающих ее частиц, 2) к их слипанию и агрегированию в соответствии с природой и характером строения частиц.

Давление, приложенное к почве (или возникшее в ней), способствует уплотнению частиц и их слипанию. Вода при трехфазном состоянии почвы способствует набуханию почвенных коллоидов и пленок, обеспечивает скольжение и более плотную укладку почвенных частиц и вероятность их слипания. Следствием этого являются уменьшение общей пористости и увеличение сопротивлений сжатию и разрыву почвы, особенно возрастающих в сухом состоянии. При избыточном содержании воды и окончательном вытеснении из капиллярной системы

воздуха действие воды переходит в свою противоположность. Размещаясь между твердыми почвенными частицами в силу своей несжимаемости она раздвигает их, лишает твердых контактов и препятствует их уплотнению, вне зависимости от величины прилагаемой нагрузки.

Для всякой почвы существует оптимальная влажность, при которой ее частицы способны максимально уплотняться под нагрузкой. Величина этой влажности зависит от формы частиц, их строения и генезиса и для данной почвы является характерной константой. С физической точки зрения эта влажность близка к влажности, при которой происходит массовое слияние водных кольцевых менисков, окружающих твердые контакты соприкасающихся частиц.

При этой влажности твердые частицы почвы наиболее чувствительны к сдвигу и без всякого дополнительного давления, под действием только рыхлящих почвообрабатывающих орудий, способны переуплотняться, а при наличии в этом случае «свертывающего эффекта воды» крошиться до размеров зернистой структуры. Это замечательное свойство почвы — распадаться при благоприятной влажности на структурные элементы — должно получить более широкое применение в полевой земледельческой практике, чем это было до сих пор.

О крошащей деятельности землероев и червей

Деятельность роющих и копающих животных принципиально ничем не отличается от деятельности почвообрабатывающих орудий. Своим «роющим аппаратом» животные производят работу, сходную с воздействием на почву рыхлящих орудий. Поэтому наилучший структурообразующий эффект в этом случае будет зависеть от влажности почвы, при которой совершается эта работа. Если это происходит при влажности структурообразования, то агрегирование получается высокое. При влажности структурообразования почва легко поддается уплотнению, легко «раздается» и делается проходимой для землероев. Это легко замечается на кротовинах. Крот, делая проходы в почве, выносит на поверхность правильно оформленные агрегаты, что указывает на совершаемую им в почве работу при влажности струк-

турообразования. Аналогичные заключения можно сделать и о работе других землероев. Что касается деятельности дождевых червей при агрегировании почвы, то она протекает несколько иначе. Широко известно мнение Дарвина (1882) о влиянии деятельности дождевых червей на почву. Он даже подсчитал количество червей в садово-огородной почве. Получилась внушительная цифра, из которой можно было заключить, что в течение нескольких лет дождевые черви могут через свой пищевод пропустить весь пахотный слой и таким образом его оструктурировать.

Однако расчет количества червей в садово-огородной почве, богатой органическими остатками не годится для полевых почв, в особенности для бедных органическим веществом дерново-подзолистых почв и сероземов, где дождевых червей значительно меньше. Тем не менее дождевые черви играют известную роль в крошении почвы на отдельные части. Структура, созданная дождевыми червями, по форме легко отличима: поверхность агрегатов после выброса их червями носит типичный «оплавленный» характер. Дождевые черви передвигаются в почве, пропуская почвенные частицы через свой пищеварительный тракт. Выбрасывание почвенных частиц из тела червя связано с перистальтикой его пищеварительного тракта, т. е. сокращением и расслаблением его мышц. Червь выбрасывает почвенные частицы в форме агрегатов, уплотненных сокращением мышц в момент выбрасывания. Частицы почвы при этом склеиваются слизистыми выделениями пищеварительного тракта, приобретая ту или иную водопрочность. Наличие водопрочных клеящих выделений зависит от видового состава червей, условий их питания и физико-химических свойств почвы.

В свое время на деятельность дождевых червей при структурообразовании указывал Г. Н. Высоцкий (1899, 1900, 1933). В последнее время вопросам образования почвенной структуры дождевыми червями много уделила внимания С. И. Пономарева (1949), некоторые опыты которой приводятся ниже. При проведении опытов почвенные образцы предварительно просеивались через сито с отверстиями 1 мм и набивались в сосуды. В сосуды с почвой вносились дождевые черви: *Lumbricus terrestris* и

Alloobophora caliginosa (из расчета 7 штук на 1 кг почвы).
Контролем служили сосуды с почвой без дождевых червей.

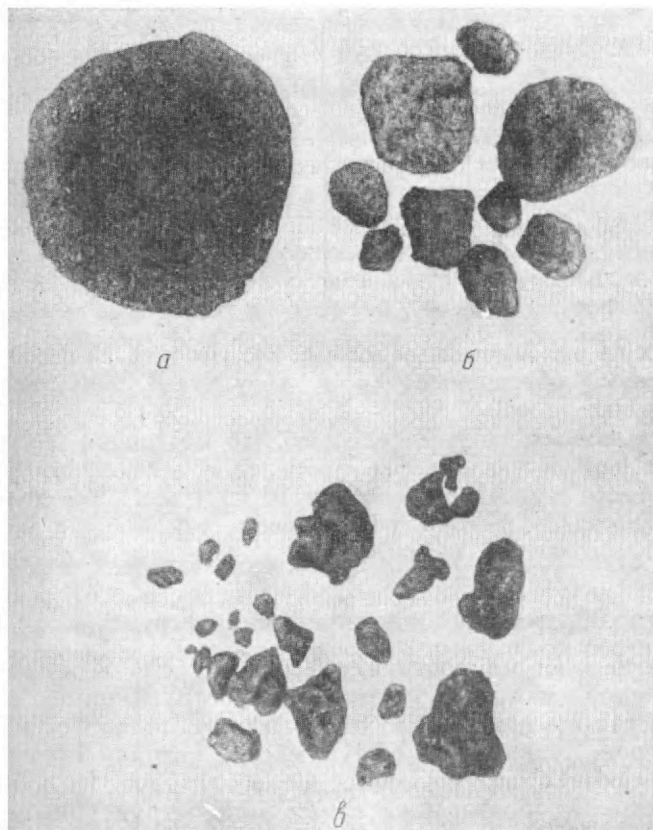


Рис. 28. Агрегирование почвы дождевыми червями в течение 47-дневного опыта (по С. Н. Пономаревой).

a — неагрегированная исходная почва; *b* — агрегаты, образованные без участия дождевых червей; *c* — агрегаты, образованные дождевыми червями.

На поверхность земли в сосудах, как в контрольном, так и в опытном, помещались листья салата и клевера. Опыты были поставлены на буроземе. Результаты неко-

**Влияние деятельности дождевых червей на формирование
почвенной структуры**

Вариант опыта	Продолжи- тельность опыта, дни	Количество агрегатов, %		
		10 мм	10—1 мм	меньше 1 мм
Почва без дождевых червей	47	41.2	16.3	42.5
	70	59.2	30.1	10.7
Почва, измененная дождевыми чер- вями	47	9.4	27.7	62.9
	70	14.4	68.3	17.3

торых из них приведены в табл. 24. На рис. 28 показаны агрегаты, образовавшиеся в результате деятельности дождевых червей.

Из данных табл. 24 следует, что благодаря деятельности червей увеличилось процентное содержание агрономически ценных фракций от 10 до 1 мм. Чем дольше продолжалась деятельность червей, тем больше возрастало абсолютное и процентное содержание этих фракций.

Образование почвенной микроструктуры

Почвенная микроструктура участвует в образовании почвенной макроструктуры. Микроструктурные агрегаты, так же как и первичные частицы соответствующих размеров, слипаются в общую массу, которая крошится под влиянием перечисленных выше факторов. Но как же происходит образование самих микроструктурных отдельныхностей?

Совершенно очевидно, что существует путь образования микроагрегатов из макроагрегатов при разрушении последних под влиянием: 1) механического распыления при обработке и раздавливании движущимися по поверхности машинами, орудиями, людьми и животными, 2) микробиологического разрушения клеящих материалов, 3) физико-химических изменений, происходящих в почве, под влиянием которых клеящие вещества

почвы переходят из нерастворимого в воде состояния в растворимое.

Но помимо этого в почве существует другой путь возникновения микроагрегатов, а именно из первичных почвенных частиц. Первичные почвенные частицы могут образовать микроструктуру под влиянием процесса коагуляции или свертывания почвенных частиц. Свертывание наблюдается лишь среди коллоидных и близких к ним по размерам частиц (меньше 0.0001 мм). Раствор этих частиц в воде носит название золя (гидрозоля). Частицы в золе находятся в непрерывном движении (броуновское движение) под влиянием теплового движения молекул воды. Во время движения частиц возможны их встреча и соударение. В момент удара частицы золя настолько сближаются, что между ними возникают силы взаимодействия и они могут слипнуться и взаимно удерживаться этими силами (коагулируют).

В зависимости от строения самих коллоидных частиц, их родства к воде (гидратированности) процесс коагуляции протекает или быстро, и в этом случае из слипнувшихся частиц образуются хлопья-коагели (гидрофобный тип коагуляции), или медленно. В последнем случае хлопьев не образуется, а частицы, слипаясь, образуют скелет, в котором размещается вода растворителя. Вся система превращается в твердое тело — гель (гидрофильный тип коагуляции). Этот случай мы рассматривали выше при слипании и склеивании частиц при высыхании почвы.

Рассмотрим случай быстрой коагуляции. Во всех ли случаях почвенные частицы слипаются при встрече друг с другом в процессе броуновского движения? Оказывается, не всегда. Должны существовать определенные условия, при наличии которых частицы могут слипаться.

М. Смолуховский считает, что каждая частица обладает определенной сферой притяжения, так называемым радиусом аттракции. Лишь попадая в эту сферу, частицы способны слипаться. В табл. 25 приводятся данные о величине радиуса аттракции для частиц золота различной величины. Коагулятором служил хлористый натрий (Вершинин и Константинов, 1935).

Из данных табл. 25 следует, что слипание начинается при сближении частиц на расстояние, примерно равное диаметру частиц.

**Зависимость слипания частиц при коагуляции
от радиуса аттракции**

Вещество	Размер частиц (2 r)	Время коа- гуляции, сек	Количество частиц в 1 см ³		$\frac{A}{r}$
			наблюдено	вычислено по формуле Смолухов- ского	
Амикроскопический коллоид золота .	3.69	0	8438 · 10 ⁸	8438 · 10 ⁸	—
		270	5.3 · 10 ⁸	5.8 · 10 ⁸	2.6
		450	3.8 · 10 ⁸	3.5 · 10 ⁸	2.2
		570	2.6 · 10 ⁸	2.7 · 10 ⁸	2.4
Грубодисперсный коллоид золота .	97	0	3.6 · 10 ⁸	3.6 · 10 ⁸	—
		120	2.9 · 10 ⁸	2.8 · 10 ⁸	2.3
		240	2.5 · 10 ⁸	2.4 · 10 ⁸	2.0
		480	1.9 · 10 ⁸	1.9 · 10 ⁸	1.9

П р и м е ч а н и е. В последней графе A — радиус аттракции, r — радиус частицы.

Условия коагуляции почвенных коллоидов обстоятельно разработаны академиком К. К. Гедройцем. Как уже указывалось ранее, коллоидные почвенные частицы, называемые мицеллами, несут на себе электрические заряды. Обычно отрицательный заряд размещается сразу под поверхностью частицы. На молекулярном расстоянии от поверхности находятся заряды противоположного знака (противозаряды). В почвенных условиях носителями этих зарядов являются преимущественно катионы, названные акад. Гедройцем поглощенными. Первые слои противозарядов расположены очень плотно, они неподвижны. Последующие же располагаются более рыхло и носят, как указывалось, название диффузных слоев. На границе неподвижных и подвижных противозарядов возникает электрический потенциал, носящий название электрокинетического потенциала. Наличие одноименного по знаку электрического потенциала мешает частицам слипаться при броуновском движении. Введением в почву различных электролитов можно уменьшить электрокинетический потенциал. Количество электро-

лита (выраженное в нормальной концентрации), необходимое для введения в почву, чтобы началась коагуляция коллоидов, называется порогом коагуляции. Величина этого порога зависит: 1) от рода коллоида, 2) степени его дисперсности, 3) рода электролита.

Все соли, кислоты и щелочи, являясь электролитами, вызывают коагуляцию почвенных коллоидов. Наиболее изучена свертывающая способность катионов, которые легко поглощаются почвами. Как показал К. К. Гедройц, свертывающая способность различных катионов в отношении почвенных коллоидов зависит от валентности катионов и их атомного веса. Чем выше валентность катиона и его атомный вес, тем меньше его электролитический порог и тем выше его свертывающая способность. Например, глинистая суспензия с частицами меньше 0.0005 мм начинает свертываться при концентрации хлористого лития от 0.025 до 0.0125 н, хлористого же алюминия — 0.000125 н, т. е. почти в 100 раз меньшей. Для катионов одинаковой валентности свертывающая сила тем больше, чем больше объем катиона. Например, для щелочных металлов: $Cs > Rb > K > Na > Li$; для щелочноземельных: $Ba > Sr > Ca > Mg$.

Свертывание коллоидов, а следовательно, и образование микроагрегатов в почве может происходить и под влиянием взаимного свертывания коллоидов. В почвенном растворе могут находиться частицы гидрата окиси железа и гидрата окиси алюминия, которые при определенных условиях приобретают положительный заряд. Встречаясь там же с частицами органических веществ или кремнекислоты, заряженных всегда отрицательно, они, взаимно компенсируя свои заряды, слипаются, образуя микроагрегаты сложного строения.

В вопросе коагуляции почвенных частиц акад. Гедройц (1932) исключительное значение придавал поглощенным катионам. Из всех же катионов особую роль он отводил поглощенному катиону кальция и указывал на связь его с плодородием почвы: «... кальций является тем поглощенным катионом, который придает почвам структуру, наиболее прочную и благоприятную в сельскохозяйственном отношении. Поэтому раз почва содержит в своем поглощающем комплексе такие катионы, как натрий, водород, магний, замена их кальцием повле-

чет за собой улучшение их структурных свойств, а значит и вообще физических свойств.

«Из почв, содержащих поглощенный водородный ион, последний должен быть по возможности удален полностью, так как и небольшие его количества ухудшают физические свойства этих почв, вообще бедных поглощающим комплексом. Таким образом, потребность подзолистых почв в известковании для придания им возможно оптимальной структурности совпадает в отношении количества потребной извести с потребностью почвы в известковании для приведения ее в нейтральное состояние, т. е. она вычисляется на основании процентного содержания в почве поглощенного водорода».

Опыт подтверждает, что в тех почвах, в которых имеется в поглощенном состоянии кальций, например в черноземах и сероземах, микроструктура хорошо выражена. Замена же водорода на кальций в подзолистых почвах существенных изменений в физические свойства почвы не вносит, так как водород и кальций имеют почти одинаковую свертывающую силу (а следовательно, почти одинаково способствуют образованию микроструктуры). И. Н. Антипов-Каратаев заменял поглощенный водород в торфянисто-подзолистых почвах на кальций и наблюдал скорость фильтрации образцов из этой почвы. Оказалось, что фильтрация образцов, насыщенных катионом водорода и кальция, происходит с почти одинаковой скоростью. Американские ученые Стефенсон и Марквурт наблюдали скорость фильтрации двух глинистых почв, насыщенных водородом и кальцием. В одном случае почвенный образец, насыщенный катионом кальция, показал скорость фильтрации 18 см^3 в минуту. Насыщенный же водородом, при прочих равных условиях, показал скорость фильтрации 23.5 см^3 в минуту, т. е. близкую. В другом случае (с другой почвой) при том же напоре образец глинистой почвы, насыщенной кальцием, дал скорость фильтрации 36.3 см^3 в минуту, насыщенной же водородом, при таких же условиях, — 30.3 см^3 в минуту, т. е. тоже сходную.

Другой результат будет получаться, если мы заменим, например, поглощенный натрий на поглощенный кальций. Скорость фильтрации почвенного образца при замене натрия кальцием так резко возрастает, что Антипов-

Каратаев даже предложил, пользуясь этим свойством, способ определения в почве поглощенного натрия по скорости фильтрации воды через природный образец и образец, насыщенный кальцием. Это согласуется с представлениями о том, что коагулирующая способность кальция значительно выше, чем натрия. Пороги коагуляции у кальция и натрия различны. Концентрация, при которой соли кальция свертывают почвенные коллоиды и образуют микроструктуру, для натрия недостаточна,— при ней натрий не только не коагулирует, а наоборот, разъединяет свернутые коллоиды (пептизирует). Почва под влиянием этого становится тонкопористой, вода через нее фильтруется с трудом.

Из указания о том, что катионы кальция и водорода по свертывающей силе коллоидов близки друг к другу, не следует делать вывода о том, что подзолистые почвы не надо известковать. Польза от известкования кислых почв известна земледелию еще со времен древнего Рима и практикой известкования подзолистых почв в СССР полностью подтверждается. Известь снижает вредную для большинства сельскохозяйственных растений кислотность почв, коагулирует многие органические кислоты и тем удерживает их в почве от вымывания, улучшает микробиологическую деятельность почв в сторону накопления в почве ценных органических соединений.

Но механизм формирования почвенной макроструктуры при деятельном участии катиона кальция, описанный в свое время К. К. Гедройцем, экспериментально не подтверждается. Гедройц считал, что слипшиеся под действием кальция почвенные частицы своими свободными поверхностями могут вновь слипаться, образуя агрегаты второго рода. Агрегаты второго рода тоже могут слипаться, образуя агрегаты третьего рода, и так далее до образования в черноземах макроагрегатов размером 2—3 мм. Однако швейцарским ученым Вигнером и его учениками было экспериментально доказано, что при коагуляции коллоидов частиц крупнее 0.05 мм не наблюдается. Они быстро выпадают из раствора, осаждаясь на дне. Аналогичные явления совершаются и в почве. В почвенных растворах, содержащих коллоиды, при соответствующих условиях происходят явления коагуляции. Свернувшиеся коллоиды размером около 50 μ быстро

выпадают из раствора. Их дальнейшее укрупнение будет протекать не по принципу соударения, как это происходит в растворе, а по принципу слипания и склеивания. Иначе говоря, микроагрегаты, осевшие из раствора, будут слипаться при высыхании почвы и крошиться под влиянием факторов, излагаемых ранее, при этом слипание этих микроагрегатов будет протекать аналогично слипанию первичных частиц таких же размеров.

Как уже указывалось ранее, вопросам формирования почвенной микроструктуры много уделял внимания А. Ф. Тюлин. На основании экспериментальных исследований А. Ф. Тюлин разделяет почвенные микроагрегаты на две резко отличные группы. Одна группа микроагрегатов формируется из органических коллоидов гуматного типа. Эти коллоиды свернуты по преимуществу катионом кальция, они менее прочны. Другая группа формируется с преобладанием минеральных почвенных частиц, свернутых очень прочно катионами полуторных окисей (железа и алюминия). Эта группа, по мнению А. Ф. Тюлина, формируется в зоне энергичной деятельности корневых волосков растений и связана с выделяемыми ими полуторными окисями. Эти интересные и важные соображения, если они окончательно экспериментально подтвердятся, дают новое направление в изучении явлений происхождения почвенной микроструктуры.

Глава IV

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ВОДОПРОЧНОСТИ В ПОЧВЕННОМ КОМКЕ

Понятие водопрочности

Водопрочность или устойчивость почвенных комков в воде — явление сложное. Сухой комок почвы, брошенный в воду, атакуется со всех сторон молекулами воды, которые быстро начинают занимать места на поверхности наружных почвенных частиц, вытесняя воздух. Последний, атакованный и теснимый молекулами воды, уходит во внутренние полости комка. При этом зажатый воздух испытывает двоякое воздействие. Уходя вовнутрь, он сжимается, но под влиянием тепла, выделяемого при смачивании водой почвы и называемой теплотой смачивания, он расширяется по обычным газовым законам (на $1/273$ своего объема при нагревании на 1°). Пузырьки воздуха совершают работу против сил сцепления почвенных частиц в комке. Если последние меньше, чем разрушающая сила пузырьков воздуха, то комок будет распадаться на более мелкие комки, микроагрегаты и первичные частицы. Очевидно, чем суше почвенные комки, тем больше в них заключается воздуха и тем сильнее они разрушаются при погружении их в воду. И наоборот, чем влажнее почвенный комок, тем меньше в нем воздушных пузырьков и тем водоустойчивей он будет казаться.

Наибольшую водопрочность имеют комки, у которых весь воздух вытеснен или заменен водой, т. е. комки в состоянии полного капиллярного увлажнения. Как указано выше, водопрочность в этом случае называется

условной или ложной. Это свойство почвенной структуры не было известно классикам почвоведения. Оно открыто и изучено в наше время Г. И. Павловым (1930), Е. Г. Петровым (1927) и Ф. С. Соболевым (Соболев и Чапек, 1930). На основании этого свойства почвенной структуры в свое время Г. И. Павлов предложил поливать хлопчатник по бороздам, а не напуском. Почвенные агрегаты при таком поливе капиллярно насыщаются водой и приобретают дополнительную водопрочность, а почва на длительное время сохраняет хорошие физические свойства.

Связь водопрочности почвенных комков с содержанием в них воздуха доказывается прямым опытом. 50 г почвенных агрегатов, предварительно отсеянных на ситах, помещаются в сосуд, схематически изображенный на рис. 29. При закрытом кране 2 и открытом кране 1 сосуд с почвенными агрегатами подключается к воздушному насосу. Воздух откачивается. После этого кран 1 перекрывается и в образец почвы, лишенный воздуха, сразу большой струей приливается дистиллированная, хорошо прокипяченная и остуженная до температуры опыта вода. Затем почвенный образец переносится на

Т а б л и ц а 26

Роль зажатого воздуха в водопрочности почвенной структуры

Размеры агрегатов	Количество водопрочных агрегатов, %					
	обыкновенный суглинистый чернозем			дерново-подзолистая суглинистая почва		
	1	2	3	1	2	3
Больше 3 мм	9.1	17.4	15.2	0.8	8.5	8.1
3—2 мм	5.6	30.4	36.8	6.1	35.7	39.0
2—1 мм	3.9	4.8	1.0	13.3	15.3	7.6
1—0.5 мм	11.0	6.8	6.2	22.2	9.1	16.3
0.5—0.25 мм	8.1	1.4	2.7	4.2	1.8	1.8
Сумма агрегатов больше 0.25 мм	37.7	60.8	61.9	46.6	70.4	72.8
Каменные фракции . .	21.7	21.4	21.4	6.9	7.8	7.6
Меньше 0.25 мм	40.6	17.8	16.7	26.5	21.8	19.6

сита нашего прибора и размывается при жестком режиме (40—50 колебаний сит в минуту). В табл. 26 приводятся сравнительные данные водопрочности агрегатов двух почв при быстром погружении их в воду без откачки воздуха (1), с откачкой воздуха (3) и с предварительным капиллярным насыщением водой (2). Как видно из данных табл. 26, удаление воздуха откачкой и удаление его водой при капиллярном насыщении при-

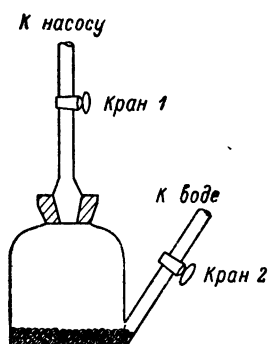


Рис. 29. Схема сосуда для откачивания воздуха из почвенных агрегатов.

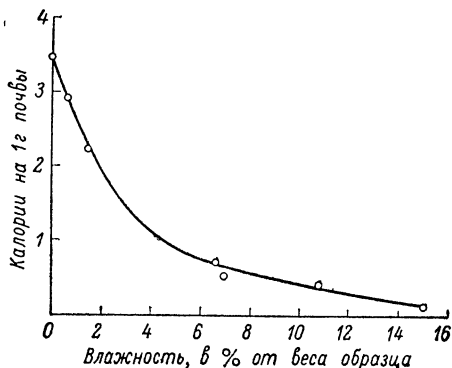


Рис. 30. Зависимость теплоты смачивания почвы от ее влажности.

мерно одинаково повысили количество водопрочных агрегатов.

По данным П. И. Андрианова (1946), теплота, выделяемая почвой при смачивании ее водой, зависит от влажности почвы, как это видно на рис. 30.

После этого становятся понятными опыты Ф. С. Соболева, сделанные четверть века тому назад и не объясненные им. Соболев установил, что если температура воды и почвы разная, то водопрочность агрегатов становится выше, в особенности если вода, в которой производится размывание образцов, будет значительно холоднее почвы. В этом случае теплота смачивания идет на выравнивание температуры, расширение воздуха в пузырьках не происходит и разрушение агрегатов будет меньше. Это подтверждается и новыми данными Лоу (Low, 1954), приведенными на рис. 31.

В связи с этим следует отметить, что и сложение самого агрегата играет немалую роль. Если комок состоит из глинистых частиц, не свернутых в микроагрегаты, то он обладает исключительно тонкими порами. Поступающая со всех сторон вода при быстром погружении такого комка в воду будет пропитывать его очень медленно, так как трение в тонких капиллярах очень велико. Если комок не водопрочный, то в этом случае размываться он будет очень медленно, создавая видимость водопрочности.

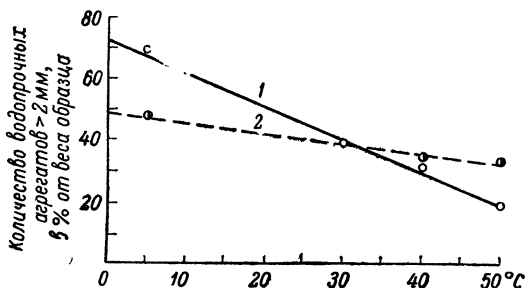


Рис. 31. Зависимость водопрочности агрегатов от температуры промываемых вод (по А. Лоу).

1 — суглинок; 2 — тяжелый суглинок.

Но полежав то или иное время в воде, такие неводопрочные комки могут полностью разрушиться. Аналогичную роль играет и уплотнение комков. Даже небольшие изменения в плотности комков могут существенно сказаться на скорости их разрушения в воде (рис. 32).

Явления водопрочности почвенного комка зависят и от водопрочности и механической прочности веществ, склеивающих почвенные частицы. Механическая прочность клеящих веществ может быть такой, что превысит разрушающую работу воздушных пузырьков. Такой комок не будет быстро разваливаться в воде, но если клеящие вещества не водопрочны, то, полежав то или иное время в воде, он все же разрушится. Следовательно, водопрочность комка зависит также в значительной степени от физико-химической природы клеящих веществ, их способности после склеивания не разрушаться (растворяться) в воде.

Таким образом, если погруженный в воду почвенный комок разваливается, то это может происходить главным образом от того, что клеящие вещества комка неводопрочны, или они водопрочны, но механическая прочность клеев мала и не может противостоять разрушительной силе воздушных пузырьков при быстром погружении в воду. Методически эти свойства разделяются на основании данных двух анализов на водопрочность структуры: путем погружения в воду почвенных агрегатов в воздушно-сухом состоянии и с предварительным капиллярным их насыщением водой.

О появлении в почвенном комке свойств водопрочности

Процессы замораживания и высыхания сами по себе не могут вызвать явления водопрочности в комке, если этим свойством не обладала почва. Уплотнение почвы тоже не вызывает в почве водопрочности. Самое большое, указанные факторы могут лишь восстановить ту водопрочность комков, которой они обладали до механического разрушения. Не является первопричиной и поглощенный кальций, которому в этом смысле так много внимания посвятили виднейшие почвоведы.

В табл. 27 приводятся данные по водопрочности трех почв, поглощенный кальций которых замещен на водород обработкой почвы 2%-м раствором HCl до потери реакции на кальций и 5%-м раствором HCl до потери реакции на железо. Обработка этими растворами производилась так: природные агрегаты раскладывались в один ряд на плоских тарелках; раствор приливался сначала осторожно по краям сосуда с таким расчетом, чтобы агрегаты насыщались капиллярно и не «подтоплялись»; затем раствор HCl наливался и поверх агрегатов, настаивался и сли-

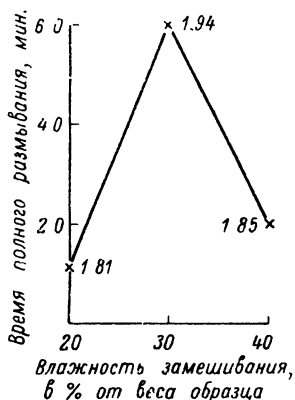


Рис. 32. Скорость размыывания воздушно-сухих образцов дерново-подзолистой суглинистой почвы в зависимости от их плотности.

1.81, 1.85, 1.94 — плотности образцов.

Влияние поглощенных кальция и железа на водопрочность почвенной структуры

Вариант опыта	Количество агрегатов, %					
	более 5 мм	5—3 мм	3—2 мм	2—1 мм	1—0.5 мм	0.5— 0.25 мм
Обыкновенный глинистый черно- зем из Каменной степи:						
1) исходный образец	7.5	24.2	18.9	29.2	9.8	6.3
сухой рассев						4.1
водный агрегатный анализ	2.0	4.3	31.6	20.6	21.0	16.6
2) образец, обработанный 20%-й HCl						
сухой рассев на ситах . .	7.5	24.9	14.0	29.5	13.4	6.6
водный агрегатный анализ	4.4	6.8	29.5	28.9	16.4	4.1
Краснозем тяжелосуглинистый, совхоз «Махинджаури» \Аджар- ской АССР:						9.4
1) исходный образец	33.0	29.6	10.6		24.0	2.8
сухой рассев				12.7	5.90	7.7
водный агрегатный анализ	31.1	13.5	30.0			

Т а б л и ц а 27 (продолжение)

Вариант опыта	Количество агрегатов, %						
	более 5 мм	5—3 мм	3—2 мм	2—1 мм	1—0.5 мм	0.5—0.25 мм	менее 0.25 мм
2) образец, обработанный 5%-й HCl							
сухой рассев	15.7	22.0	14.1	31.9	13.3	3.0	0.0
водный агрегатный анализ	18.1	5.6	29.2	20.8	19.6	3.5	3.2
Дерново-слабоподзолистая сугли- нистая почва на карбонатной морене, совхоз «Губино» Ленин- градской области:							
1) исходный образец							
сухой рассев	19.7	34.2	12.6	20.1	6.2	1.5	5.7
водный агрегатный анализ	3.0	7.3	19.2	14.2	15.4	5.7	35.2
2) образец, обработанный 2%-й HCl							
сухой рассев	15.2	35.4	14.1	21.6	9.3	1.9	2.5
водный агрегатный анализ	4.2	6.7	23.1	9.6	17.1	9.0	29.1

вался декантированием до тех пор, пока в нем не исчезал кальций, после чего агрегаты высушивались, вновь рассеивались на ситах и испытывались на водопрочность на нашем приборе.

Из данных табл. 27 следует, что удаление катиона кальция, а из красноземной почвы и железа, и замена их водородом не сказались отрицательно на водопрочности структуры почвы. Следовательно, не кальций является первопричиной водопрочности комка.

Главным и ведущим началом, от которого зависит водопрочность почвенного комка, — это наличие в нем особого органического вещества. Лишенные органического вещества почвенные комки навсегда лишаются свойств водопрочности. Почвы глинистые и суглинистые, лишенные органического вещества, под влиянием высыхания, замораживания и действия орудий обработки могут образовывать комки агрономически ценных размеров, но эти комки будут неводопрочны. В табл. 28 показана водопрочность структуры двух указанных выше почв: дерново-подзолистой суглинистой на карбонатной морене и суглинистого краснозема. Органическое вещество этих почв удалено окислением H_2O_2 (перекисью водорода).

Аналогичные данные получены и по черноземным почвам. Капиллярное насыщение H_2O_2 производилось так же, как и обработка HCl , т. е. природные агрегаты (кроме пыли) раскладывались на поверхности плоских сосудов в один ряд и насыщались 10%-й H_2O_2 , приливаемой осторожно, так, чтобы не «подтоплять» агрегаты. После каждого насыщения образцы высушивались на воздухе и часть их испытывалась на водопрочность, другая часть поступала на вторичное насыщение. Агрегатный анализ велся на нашем приборе.

Интересные и наглядные данные о роли органического вещества при явлениях водопрочности получены И. Н. Антиповым-Каратаевым с сотрудниками. Они подвергали почвенный комок капиллярной обработке различными химическими реактивами.

Таким образом, мы видим, что: 1) замена поглощенного кальция на водород не изменяет водопрочности почвенных агрегатов, 2) водопрочность почвы исчезает и действие поглощенных катионов нивелируется после

Изменение воднорочности почвенной структуры при удалении из почвы органического вещества

Почва	Характер обработки	Количество агрегатов после размывания в воде, %					
		более 5 мм	5—3 мм	3—2 мм	2—1 мм	1—0.5 мм	0.5—0.25 мм
Дерново-слабая подзолистая на карбонатной морене	Природная почва . .	3.0	7.3	19.2	14.2	15.4	5.7
	Обработанная H_2O_2 на холоду капиллярным насыщением агрегатов . .	2.2	—	—	—	—	3.1
		31.1	13.5	30.0	12.7	5.0	7.7
Краснозем тяжелосуглинистый	Природная почва . .						
	Обработанная H_2O_2 на холоду капиллярным насыщением агрегатов:						
	1 раз	1.0	0.9	5.8	33.8	28.5	4.5
	2 раза	—	0.9	4.1	5.8	22.2	0.7
	3 раза	—	—	—	—	—	—
							25.5
							66.3
							100

удаления из почвы органического вещества. Следовательно, поглощенные катионы играют существенную роль в формировании водопрочности почвенного комка только в связи с органическим веществом почвы и на его фоне. Удаление органического вещества из почвы всегда приводит к потере водопрочности почвенных комков.¹

Органическое вещество, придающее водопрочность почвенным агрегатам

На роль органических веществ в образовании почвенной структуры указывали многие исследователи. Первые опыты по этому вопросу проведены Шлезингом (Schloesing, 1874). Э. Вольни (1896), говоря о склонности почвы образовывать агрегаты, писал: «Коллоидные вещества благоприятствуют образованию агрегатов. Перегнойные кислоты связывают одни составные части с другими». Далее, указание на роль перегнойных веществ в структурообразовании мы находим как у почвоведов-классиков П. А. Костычева, В. Р. Вильямса, К. К. Гедройца, так и у целого ряда последующих ученых — Соколовского, Тюлина, Гельцер, Саввинова,

¹ *От редактора.* В этом разделе автор (как и в ранее опубликованных своих работах — 1948, 1953 и др.) без достаточных оснований противопоставляет роль поглощенного кальция роли органического вещества в создании водопрочной почвенной структуры, в то время как современное почвоведение считает для этого необходимым наличие того и другого условия. Основанием для такого противопоставления автора служат его опыты по сравнению водопрочности природных почвенных агрегатов с их водопрочностью после замены всех поглощенных катионов на водород, который, как известно, обладает высокой коагулирующей способностью. При этом автор, естественно, не обнаруживал существенных различий в водопрочности. Однако общеизвестно, что замена этих поглощенных катионов на одновалентные металлические катионы (натрий, литий, аммоний и др.) приводит к полной потере почвенной структурой водопрочности, что используется при подготовке почв к гранулометрическому анализу. Особое значение поглощенного кальция состоит в том, что он при наличии в почве соответствующих количеств органических веществ не только определяет водопрочность почвенной структуры, но создает в почве благоприятную для почвенных микроорганизмов и культурных растений среду. Теоретические представления о роли поглощенного кальция лежат в основе таких важных мероприятий по химической мелиорации почв, как известкование кислых почв и гипсование солонцовых почв. С. И. Долгов.

Ваксмана, Тюрина, Кононовой, Антипова-Каратаева и др.

Первые, ранние исследования значения органического вещества в формировании почвенной структуры имели общий характер. Они установили зависимость водопрочности структуры от содержания почвенного гумуса. Однако было неясно, какая же часть органического вещества почвы является наиболее действенной, наиболее активной. Крупным шагом вперед было учение В. Р. Вильямса. Почвенный гумус разделяется им на активный и неактивный. Под активным гумусом понимается та его часть, которая участвует в образовании водопрочной структуры.

Какие же органические образования входят в состав активного гумуса?

В начале XX в. В. Р. Вильямс считал, что активную часть гумуса составляет перегнойная гуминовая кислота, но впоследствии он несколько изменил свою точку зрения. Вильямс (1935) отмечал: «Только после длительных исследований удалось твердо установить, что прочность (водопрочность) комков почвы зависит от пропитывания комков ульминовой кислотой, выделяемой анаэробными бактериями при разрушении ими корневых остатков многолетних травянистых растений. Другие перегнойные кислоты — гуминовая и апокреновая — только в исключительных случаях могут принимать участие в этом процессе. Ульминовая кислота, впитываясь в комки, легко переходит в денатурированное состояние, т. е. состояние аморфного коллоидального измельченного вещества. От валентности обменных оснований, поглощенных гранулами ульминовой кислоты, зависит отношение самих гранул к воде. Если поглощенный гранулой коллоида обменный катион одновалентен, то сама гранула приобретает способность образовывать коллоидальный раствор. Когда одновалентный обменный катион замещается двухвалентным, гранула коллоида утрачивает способность к образованию коллоидального раствора, т. е. коллоид обращается в цемент, „нерастворимый“ в пресной воде».

В. Р. Вильямсу в развитии учения о перегнойных кислотах принадлежит особая роль. Он связал наличие в почвенном гумусе тех или иных перегнойных кислот

с биохимической деятельностью почвенных микроорганизмов, развивающихся в почве, и наземными зелеными растениями. Оставив терминологию Берцелиуса, В. Р. Вильямс вложил в понятие гуминовой, ульминовой и креновой кислот новое биохимическое содержание. Но тем не менее существование указанных перегнойных кислот как самостоятельных химических образований он признавал и даже разрабатывал методы их выделения

в чистом виде и предлагал их химические формулы.

Отсутствие точной методики разделения этих кислот затрудняет изучение ульминовой кислоты как структурообразователя. Более доказанным и химически обоснованным является наличие в почве гуминовой кислоты. Методика ее выделения усовершенствована И. В. Тюриным, М. М. Кононовой и др. Но, как ни странно, до самого последнего времени, так же как и полвека тому назад, можно указать на ряд ученых, не признающих

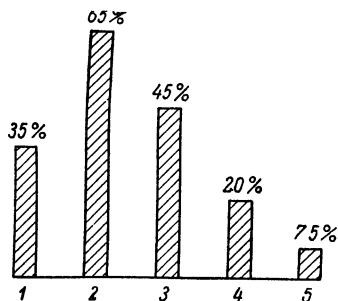


Рис. 33. Водопрочность структуры почвенных типов (по Н. И. Саввинову).

1 — дерново-подзолистые почвы; 2 — черноземы разные, 3 — черноземы южные, 4 — каштановые почвы, 5 — серозем.

существования гуминовых кислот как индивидуальных химических образований. О связи водопрочности почвенной структуры с наличием в почве гумуса и гуминовых кислот в нем в разных почвенных зонах имеется значительная литература. Об этом говорят Н. И. Саввинов (1931) — рис. 33, Л. Бейвер (Bayer, 1942) — рис. 34, М. М. Кононова (1954). На тесную связь между водопрочностью структуры, гумусом почвы и содержанием в нем гуминовых кислот указывают и приводимые на рис. 35 наши данные. По подзолистым почвам (1) взяты средние данные, полученные нами для почв из различных мест подзолистой зоны (Ленинградская область, Воркута, Свердловская, Московская, Смоленская области).

Для деградированных (2) и мощных (3) черноземов взяты данные из работы О. С. Ростовцевой и М. И. Авае-

вой. Для обыкновенного чернозема (4) приводятся данные, полученные нами по Каменной степи. Они несколько завышены, так как целинные участки Каменной степи по запасу гумуса и гуминовых кислот богаче обыкновенных типичных черноземов. Для каштановых почв (5) приводятся данные Н. И. Саввинова. Сероземы (6) характеризуются данными, полученными Ф. Е. Колясевым для целинного участка опытной станции СоюзНИХИ

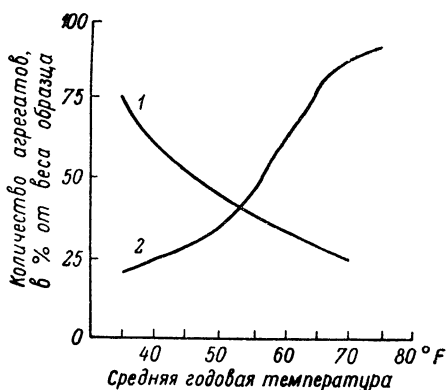


Рис. 34. Водопрочность структуры почвенных типов (по Л. Бейверу).

1 — семиаридные и черноземоподобные,
2 — подзолы и гумидные латериты

в Каунчах и приведенными им в отчете по этой станции за 1930 г.

По красноземам (7) приводятся наши данные по совхозу Махинджаури (ВАСХНИЛ) Аджарской АССР (между Чаквой и Батуми). По субтропическим подзолам (8) приводятся наши данные с опытного участка Института эфирно-масличных культур в Сухуми. Все почвы, по которым приводятся данные по водопрочности структуры, имеют примерно один и тот же механический состав (тяжелосуглинистые). Для исследования структуры взяты образцы преимущественно с целинных участков. Гуминовая кислота определялась по И. В. Тюрину.

Диаграмма 35 убедительно доказывает связь водопрочности почвенной структуры с наличием в почве

гумуса и гуминовой кислоты в нем. Особое положение занимают красноземы. Но о роли в них железа и алюминия, закрепляющих гуминовые кислоты, а возможно и образующих нерастворимые соединения с фульвокислотами, в почвенной литературе более или менее известно. Как уже указано нами ранее, даже в красноземах в явлениях водопрочности структуры главная и ведущая роль принадлежит органическому веществу; полутораоксили лишь усиливают эффект, образуя с органическими кислотами нерастворимые в воде соединения.

Таким образом, между водопрочностью почвенной структуры и количеством и качеством органического вещества существует связь в широком географическом аспекте. Следуя от мощных черноземов, с одной стороны, на север, а с другой — на юг и юго-восток, мы наблюдаем уменьшение гумуса и запаса гуминовых кислот в почвах. В полном соответствии с этим и в такой же закономерности наблюдается и падение водопрочности почвенной структуры. Это, конечно, не означает, что водопрочная почвенная структура может встречаться только в зоне мощных черноземов. В каждой почвенной зоне в соответствии с естественно-историческими условиями агротехнические мероприятия для увеличения плодородия почвы и улучшения ее структуры не могут быть одинаковыми. Агротехника в каждой природной зоне должна быть построена так, чтобы почвенная структура и ее водопрочность возрастали, лишь тогда и будут создаваться благоприятные физические условия в почве для прогрессивного роста урожаев сельскохозяйственных культур.

Для почв, богатых органическим веществом и по своей природе структурных, зависимость водопрочности структуры от содержания в почве гуминовых кислот можно проверить экспериментально в лабораторных условиях. Для этой цели была разработана специальная методика, так как методы выделения гуминовых кислот из почвы, существующие в настоящее время в почвенной химии, требуют такой подготовки почвы к анализу, при которой полностью разрушается почвенная макроструктура, что заранее исключает возможность установления связи между почвенной структурой и формами органического вещества.

И. Н. Антипов-Каратаев (Антипов-Каратаев, Келлерман и Хан, 1948) выдвинул принцип капиллярного насыщения почвенного агрегата растворами химических реагентов, применяемых при фракционированном извлечении гумуса из почвы. Это указывает на возможность выявления роли тех или иных фракций органического вещества в формировании водопропрочного почвенного комка. Мы попытались методом И. Н. Антипова-Каратаева сделать количественным, связав его с агрегатным анализом почв, как это будет видно из излагаемого ниже материала.

Исследованию был подвергнут обыкновенный суглинистый чернозем из Каменной степи. Образец для исследования взят с заповедника под названием «некосимая степь среди лесных полос». Травостой на участке в момент взятия полевого образца (конец июня) достигал 1.5 м и состоял из густой злаково-бобовой смеси. На глубину взятия образца (20 см) почва была интенсивно-черного цвета

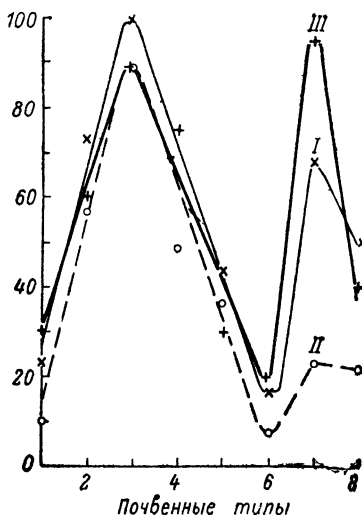


Рис. 35. Связь между водопропрочностью структуры, общим запасом гумуса и гуминовых кислот в нем в различных почвенных типах.

I — содержание гумуса в почвах разных типов по отношению к мощным черноземам, принятым за 100, II — содержание гуминовых кислот (в тоннах с гектара) на глубине 20 см; III — количество водопропрочных агрегатов, % 1 — подзолистые почвы, 2 — деградированные черноземы, 3 — мощные черноземы, 4 — обыкновенные черноземы, 5 — каштановые почвы, 6 — сероземы, 7 — красноезем, 8 — подзолистые почвы субтропиков.

с прекрасно выраженной зернистой структурой, с массой корней и корешков, на которых присохшие к ним почвенные агрегаты образовали причудливые гроздья.

По характеристике органического вещества, сделанной А. В. Барановской (по И. В. Тюрину), почва содержала: общего гумуса 11.85%, в нем различных гумино-

вых кислот 33.95%, растворимых в воде фульвокислот 33.05 и нерастворимого остатка 33.0%.

Из взятого в поле образца отбиралась в воздушно-сухом состоянии проба весом 400 г с таким соотношением структурных фракций, какое имелось в полевом образце. Проба обрабатывалась в большом приборе Сокслета спирто-бензольной смесью (1 : 1) до прекращения окрашивания вытяжки. После этого образец раскладывался в один слой на фильтровальную бумагу и высушивался до исчезновения запаха. В воздушно-сухом состоянии образец взвешивался и определялась потеря в весе. В спирто-бензольной вытяжке определялась смесь битумов, смол, восков и пр.

Высушенный на воздухе образец рассеивался на ситах. Определялось распределение фракций агрегатного анализа в процентах от навески и сравнивалось с таковым же распределением фракций в исходном образце. Далее, из общего образца бралась проба весом 25 г (при двойной повторности) для исследования водопрочности агрегатов на нашем приборе. Остаток из образца подвергался дальнейшей обработке, которая заключалась в декальцинировании его 2%-й HCl, причем во избежание механического разрушения агрегатов декальцинирование начиналось с капиллярной пропитки почвенных агрегатов, разложенных на плоской посуде в один слой. После капиллярного насыщения агрегаты заливались указанным раствором HCl, настаивались и промывались декантацией до исчезновения реакции на Ca. Затем образец промывался дистиллированной водой до исчезновения реакции на хлор. Затем почвенный образец высушивался на воздухе, рассеивался (с установлением соотношения фракций) на ситах и из него вновь брались две навески по 25 г для испытания на водопрочность. Остаток же воздушно-сухого образца обрабатывался 0.1 н NaOH, сначала капиллярно, а в дальнейшем декантацией до исчезновения окрашивания декантата органическим веществом почвы. Когда это положение достигалось (окончательного прекращения окрашивания получить не удавалось), почва подвергалась диализу для удаления щелочных ионов, высушивалась и испытывалась на водопрочность. Если при этом структура разрушалась и почвенные частицы сливались в об-

щую глыбу, то для взятия пробы на водопрочность почва дробилась на агрегаты и из них брались навески по 25 г. Остаток же повторно декальцинировался и повторно обрабатывался 0.1 н NaOH, диализировался, высушивался и испытывался на водопрочность. Результаты агрегатных анализов, полученные по удалении из почвы различных фракций органического вещества и декальцинирования приводятся в табл. 29.

Рассматривая данные табл. 29, мы видим, что удаление из почвы спирто-бензольных фракций мало сказалось на макроструктуре почвы. Водопрочность и комковатость ее остались те же. При декальцинировании макроагрегаты также полностью сохранились, водопрочность их не ухудшилась, но они потеряли механическую прочность, стали рыхлыми, крупнопористыми и раздавливались в пыль при незначительных усилиях. Это обстоятельство с несомненностью доказывает, что кальций в таких количествах, в каких он имеется в обыкновенном черноземе, играет значительную роль в укреплении механической прочности агрегатов. Лишь продолжительная обработка децинормальным едким натром, растворяющим гуминовые кислоты, превратила почву из рассыпчатой, с водопрочной структурой, в вязкую, бесструктурную, неводопрочную, тягучую массу, обладающую изумительной механической прочностью при высыхании. Продолжительный электродиализ этой почвы не улучшил ее строения. Количество органического вещества, удаленное из почвы при продолжительной обработке ее едким натром с последующим промыванием водой, в нашем опыте составляло 2.6% от веса почвы. В почве оставалось еще 9.2% органического вещества. Иначе говоря, даже не вся гуминовая кислота, заключающаяся в гумусе, была удалена при этой обработке, но тем не менее водопрочность почвенной структуры нарушилась.

Таким образом, не всякое органическое вещество, входящее в состав почвенного гумуса, может придать почвенным агрегатам водопрочность, а лишь то, которое растворяется в щелочах и не растворяется в кислотах и которое еще исследователями XIX в. отнесено к типу гуминовых кислот.

Роль различных фракций органического вещества почвы в водопрочности почвенной структуры

Вариант опыта	Агрегатные анализы	Количество агрегатов, %					
		более 5 мм	5—3 мм	3—2 мм	2—1 мм	1—0.5 мм	0.5—0.25 мм
Неизменная почва	Сухой рассев	7.5	24.2	18.9	29.2	9.8	6.3
	Водный агрегатный анализ						4.1
Почва обработана спирто-бензолом	Сухой рассев	2.0	4.3	31.6	20.6	21.0	3.9
	Водный агрегатный анализ	1.6	19.8	16.7	33.2	13.9	8.9
Почва после спирто-бензола обработана 20%-й HCl	Сухой рассев	6.7	1.4	34.1	16.0	15.6	12.2
	Водный агрегатный анализ	7.5	24.9	14.0	29.5	13.4	6.6
Почва после HCl обработана 0.1 н NaOH	Сухой рассев	4.4	6.8	29.5	28.9	16.4	4.6
	Водный агрегатный анализ	9.7	19.7	10.4	20.5	16.0	15.4
Почва обработана 0.1 н NaOH вторично	Сухой рассев	—	—	—	0.6	4.6	11.6
	Водный агрегатный анализ	3.8	—	—	—	0.4	0.7
Почва слиплась в глыбу и дробилась на агрегаты							
							95.1

О физико-химической сущности явления водопрочности структуры

Как указывалось ранее, физико-химическую сущность явления водопрочности почвенного комка В. Р. Вильямс связывает с явлениями денатурации гуминовых и ульминовых кислот и значимостью поглощенных катионов почвы. Перегнойные кислоты, пропитывая почву, денатурируются, т. е. переходят из растворимого в нерастворимое состояние, и клей из них, как говорит В. Р. Вильямс, переходит в цемент. Склеенные перегнойными кислотами комки после денатурации клея и перехода его в цемент приобретают свойства водопрочности. Поглощенные почвою катионы в этом процессе будут играть значительную роль. Если в поглощенном состоянии находятся двухвалентные катионы, то явление водопрочности обеспечено. Если же в поглощенном состоянии находятся одновалентные катионы, то перехода клея в цемент не происходит, перегнойные кислоты в этом случае, пропитывая почвенные комки, не придают им свойства водопрочности.

Явления денатурации по Вильямсу необратимы. Иначе говоря, если водопрочный почвенный агрегат разрушить, то его водопрочные свойства уже не восстанавливаются. Для восстановления водопрочности комков потребуются новые порции свежееобразованных перегнойных кислот, которые вновь пропитали бы почвенные комки, денатурировались при наличии в поглощенном состоянии двухвалентных катионов и перешли бы из клея в цемент.

Выше приводились примеры, показывающие, что удаление кальция из поглощенного состояния в ряде почв не приводит к разрушению водопрочности агрегатов, что роль поглощенных катионов не является главной. Главным является молекулярное строение органических веществ.

П. А. Костычев (1905) писал, что разрушенная структура на черноземных почвах может восстанавливаться и что это восстановление происходит через «согнивание растительных остатков». В. Р. Вильямс, по существу, продолжил это утверждение, дав ему физико-химическое

толкование. Каких-либо опытов в обоснование указанного утверждения не производилось.

Излагаемые ниже лабораторные опыты вносят новые, дополнительные сведения в вопрос восстановления водопрочности механически разрушенных комков. Для опыта сначала были взяты природные почвенные агрегаты глинистого чернозема из Каменной степи. Агрегаты в перемоченном состоянии тщательно растирались руками. В результате получалась сплошная однородная паста. Паста слегка подсыхала, и из нее вручную изготавливались гранулы размером 1—3 мм с плотностью, близкой к плотности природных агрегатов. Гранулы высушивались на воздухе и испытывались на водопрочность на нашем приборе при 16 колебаниях в минуту. Опыты проведены с агрегатами, взятыми с разных полей экспериментального хозяйства Института земледелия им. В. В. Докучаева ЦЧП. Результаты опытов приводятся на рис. 36.

Из данных рис. 36 следует, что водопрочность гранул, образованных из механически растертых природных комков почвы, после их высыхания полностью восстанавливалась, а в некоторых случаях даже улучшалась по сравнению с природными агрегатами. Порядок следования полей по водопрочности структуры сохранился тот же, что и у природных комков. На первом месте по водопрочности оказались целинные участки, за ними — поля из-под многолетних трав в кормовом и полевом севооборотах, на последнем — паровые поля. При этом гранулы из образцов с полей, не проходивших ротацию травопольного севооборота, оказались по водопрочности ниже, чем гранулы с одноименных полей, прошедших один раз ротацию травопольного севооборота.

Аналогичные данные получены и на дерново-подзолистых тяжелосуглинистых почвах из совхоза «Восход» Сестрорецкого района Ленинградской области. Результаты этих опытов приводятся в табл. 30.

Обработка почвы перекисью водорода, произведенная не до полного окисления органического вещества, ухудшила способность почвы восстанавливать водопрочность структуры. Это еще раз говорит о том, что восстановление водопрочности связано со свойствами органического вещества почвы.

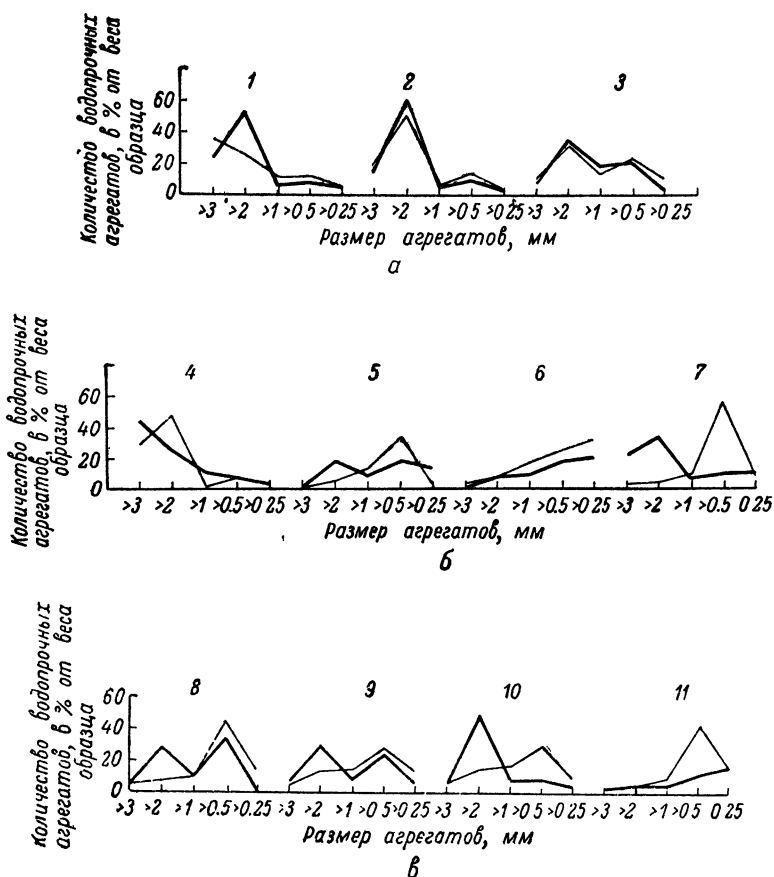


Рис. 36. Водопрочность природной структуры обыкновенного глинистого чернозема и гранул, полученных из него же.

Жирной линией обозначена водопрочность гранул, тонкой линией — водопрочность природных агрегатов 1 — целина косая среди лесных полос; 2 — целина некосая в открытой степи, 3 — целина косая в открытой степи, 4 — полевая лесная полоса, 5 — паровое поле севопольного севооборота среди лесных полос, 6 — поле, занятое подсолнухом того же севооборота, 7 — травяное поле севопольного севооборота в степи; 8 — яровая пшеница по пласту трав севопольного севооборота; 9 — травы третьего года пользования нормового севооборота в степи, 10 — травы четвертого года пользования нормового севооборота в степи, 11 — колхозное поле смежного землепользования — паровое поле паропропашного севооборота.

**Восстановление водопрочности агрегатов механически
разрушенной почвенной структуры**

Размер агрегатов	Количество агрегатов, %						
	многолетняя залежь		клевер 1-го года пользования		старопашота—овес		гранулы из той же почвы, обработанной H ₂ O ₂
	природные агрегаты	гранулы	природные агрегаты	гранулы	природные агрегаты	гранулы	
Больше 3 мм . .	47.8	74.1	14.6	19.5	23.5	13.9	9.6
3—2 мм	41.8	20.0	32.0	27.5	22.4	18.3	8.0
2—1 мм	7.1	0.9	9.9	20.7	15.6	13.6	9.0
1—0.5 мм	1.2	0.8	13.1	15.5	9.8	25.1	15.0
0.5—0.25 мм . . .	0.7	—	7.2	5.8	8.0	15.9	18.4
Меньше 0.25 мм	1.4	4.2	23.2	11.0	20.7	13.2	40.0

Быстро проводимые опыты с восстановлением водопрочности структуры исключали возможность существенных микробиологических изменений в почве и накопления по этой причине каких-либо новых клеящих веществ. Для подтверждения этого опыты были повторены; причем паста из почвенных агрегатов дерново-подзолистой почвы все время поддерживалась в течение 75 дней во влажном состоянии. При каждом прибавлении воды почва тщательно перемешивалась.¹ Изготовленные через 75 дней гранулы показали более высокую водопрочность, чем изготовленные сразу. Перемешивание улучшило контактные условия между частицами, и водопрочность агрегатов почти полностью восстановилась.

Итак, приведенные примеры с восстановлением водопрочности механически разрушенной (растертой) структуры указывают на принципиальную возможность восстановления ее у вновь образованных комков. Эти свой-

¹ Можно было ожидать, что частое перемешивание создает аэробные условия для разложения органического вещества и водопрочность почвенной структуры должна ухудшиться. Но этого не произошло.

ства обратимости водопрочного склеивания должны быть исследованы со всей тщательностью. Они имеют как теоретическое, так и практическое значение. Теоретическое значение их заключается в том, что они дают материал для распознавания механизма водопрочности, который нельзя назвать денатурацией, необратимой по своей природе.

Глава V

МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ. ПОЧВЕННОЙ СТРУКТУРЫ

Выше указывалось, что клеящих веществ в почве (безразлично какой) суглинистого и глинистого механического состава уже достаточно для слипания отдельных частиц в комки. Но эти комки далеко не всегда обладают водопрочностью. Экспериментальное исследование явлений водопрочности почвенных комков приводит к выводу о связи водопрочной структуры в почве с наличием в ней особых клеящих веществ органического происхождения. На образование этих особых органических веществ из разлагающихся растительных и животных остатков при непосредственном участии почвенных микроорганизмов указывали еще классики почвоведения. В. Р. Вильямс развил теорию формирования водопрочной структуры при непосредственном участии микроорганизмов почвы, о чем нами уже упоминалось выше.

Начиная с 30-х годов интерес к выяснению роли микроорганизмов в почве в явлениях структурообразования стал возрастать, в особенности в Советском Союзе. Приведем конкретные результаты исследований.

Еще А. А. Ярилов (1933) отметил, что Ланг описал интересный организм *Actinomyces oligocarbohylyus*, который был в состоянии свертывать в комочки даже чистые илистые кварцевые частицы.

П. Фагелер (1938) на основании произведенных им микробиологических исследований почвенной массы указывал, что в почвах, богатых микроорганизмами, в особен-

ности актиномицетами, происходит соединение между собой при помощи бактериальной слизи не только первичных, но и вторичных частиц, вследствие чего образуются агрегаты более высокого порядка.

И. И. Канивец, Н. П. Корнеев, Н. Г. Радзиевский (1939) и др. выделили из почвы микроорганизм — гриб *Trichoderma lignorum* и предложили препарат с этим микроорганизмом, улучшающий водопрочность почвенной структуры.

Е. Н. Мишустин (1938, 1945; Мишустин и Пушкинская, 1942), изучая образование почвенной структуры под влиянием микроорганизмов, пришел к выводу о существовании лабильной и стабильной водопрочной структуры. Первая вызывается клеящими веществами белкового типа и легко разрушается биологически. Вторая создается веществами гуминового типа и биологически более устойчива. В зависимости от климатических условий, физико-химических свойств почв и их биогенности определяется тип той или иной структуры, например лабильной в сероземах и стабильной в черноземах.

Ряд интересных высказываний о роли микроорганизмов в формировании почвенной структуры сделали Н. М. Лазарев (1939, 1949), Ф. Ю. Гельцер (1940 — 1949; Гельцер и Белякова, 1936), М. А. Дорохова (1942), Р. Иодер (Ioder, 1936). Последний отмечал, что «маленькие корни, корневые волоски и мицеллы грибов часто предохраняют почвенный комок от совершенного разрушения. В данном случае роль микроорганизмов сводится к роли аналогичной корневой системы». О значимости этого фактора мы уже имели суждение. Кроме того, живые микроорганизмы — бактерии и грибы — могут служить и непосредственным клеящим материалом, соединяющим одни частицы с другими. Многие из них, имея нитевидную форму наподобие высокомолекулярных соединений, могут представлять собой хороший клеящий материал.

Т. Пил (Peele, 1940) разделяет органические вещества, играющие роль в структурообразовании почвы, на две группы: 1) лиофильные органические коллоиды, представляющие продукты распада растительных остатков; 2) лиофильные коллоиды и гели, входящие в состав клеток микроорганизмов или продуктов их распада,

Предварительно выделенные из почвы палочкообразные аэробные структурообразующие бактерии выращивались автором на агаровой питательной среде в течение одного дня. Образовавшаяся слизь смешивалась с почвой. Из смеси готовились комки диаметром 1/4 дюйма. Контролем служили комки, полученные путем смешения почвы с дистиллированной водой. Смоченные слизью комки не распадались в воде в течение 24 часов, контрольные же распадались в течение 1 минуты. Связывающее действие, по мнению автора, зависит от необратимой дегидратации коллоидов, входящих в состав слизи, при высушивании. Внесение сахарозы усиливает микробиологическую деятельность и тем самым увеличивает водопрочность почвенных комков. Заражение грибной флорой стерилизованных почв дает лучший эффект, чем бактериальной.

К. И. Рудаков (1949 а, 1949б, 1951) указывает, что образование «активного перегноя», обуславливающего повышение процента прочноструктурных элементов, происходит за счет не только корневых остатков, но и живых корней развивающегося растения. Отрицая усиленное развитие ризосферных бактерий за счет корневых выделений, он утверждает, что отмыть живые корни от микроорганизмов вообще невозможно. Тщательная отмывка корней клевера от почвы привела его к заключению о наличии на корнях факультативно-анаэробных бактерий, продуцирующих протеопектиназу, причем это не вызывает какого-либо заболевания корней. Под влиянием ферментного комплекса — пектиназы пектин распадается на составляющие его компоненты: уксусную кислоту, галактозу, арабинозу, ксилозу, глюкозу, метанол и галактуроновую (или другую уроновую¹) кислоту. Все остальные продукты, кроме галактуроновой кислоты, легко усваиваются микроорганизмами и превращаются в CO_2 и H_2O . Галактуроновая кислота, как и другие уроновые кислоты, труднее осваивается микроорганизмами и, проникая в микробные клетки, сохраняется в них. Галактуроновая кислота при взаимодействии с протеинами может давать коллоидные сгустки, способные не

¹ Уроновая кислота $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_7$ или $\text{CONH}-\text{CHON}-\text{CHON}-\text{CHON}-\text{CHON}-\text{COOH}$.

только склеивать отдельные минеральные частицы, но при обработке солями кальция и промораживании придавать им водопрочность. В природной обстановке это может происходить при изменении условий существования микробной клетки в начальной стадии ее автолиза.

Опыты, поставленные К. И. Рудаковым, привели его к выводам, что заметный эффект повышения водопрочности структуры дает только клевер. Ни овес, ни пшеница, ни лен, ни картофель и капуста, ни даже тимофеевка не дали почти никакого результата. Продуцирование галактуроновой кислоты в основном осуществляется за счет межклеточного вещества в живых и в особенности в отмерших корнях клевера. Однако наблюдения почвоведов (Тюрин, 1935) показывают, что накопление уроновых кислот наблюдается под лесом больше, чем под лугом, а водопрочность агрегатов в почвах, как известно, наоборот, под лугом больше, чем под лесом. Эти природные факты заставляют осторожно относиться к утверждениям проф. Рудакова о роли уроновых кислот в водопрочном структурообразовании.

В настоящее время вряд ли кто-либо подвергает сомнению участие микробов в создании в почве водопрочной структуры. Микроорганизмы накаплиют в почве клеящие вещества, являющиеся непременным условием формирования структуры. Процесс накопления водопрочных клеев в почве совершается в динамике, в соответствии с жизненным циклом микроорганизмов. На рис. 37 показана динамика водопрочной структуры дерново-слабоподзолистой тяжелосуглинистой почвы экспериментального хозяйства Всесоюзного научно-исследовательского института растениеводства «Красный пахарь» Павловского района Ленинградской области. Образцы почвы взяты с разных удобрительных фонов из-под овса, в который подсеяны многолетние травосмеси. Опыт проводился в лабораторных условиях аспирантом нашей лаборатории З. В. Труниной. Образцы почв при влажности 20, 40 и 60% (абсолютных) помещались в термокомнату с автоматически регулируемой температурой, равной $26^{\circ} (\pm 1^{\circ})$. Указанные влажности все время поддерживались путем регулярного увлажнения образцов. Через определенные промежутки времени из образцов брались пробы и испытывались на водопрочность размыванием

на ситах во влажном состоянии (образцы для анализа не высушивались до воздушно-сухого состояния).

Из данных рис. 37 следует, что в пределах взятых влажностей и удобрительных фонов водопрочность структуры имеет явно выраженную динамику во времени. На сороковой или шестидесятый день водопрочность структуры резко падает. Далее она повышается или колеблется, но независимо от этого к концу опыта, т. е. на 120-й день, на всех фонах водопрочных агрегатов остается значи-

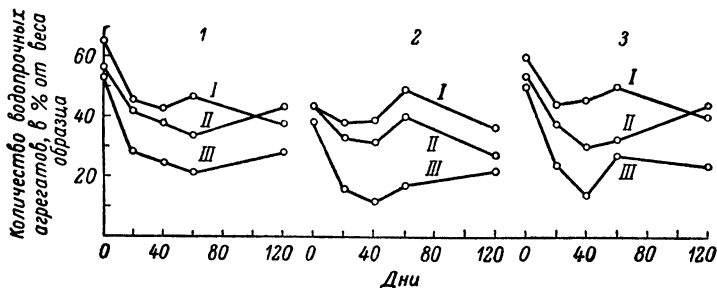


Рис. 37. Динамика водопрочной структуры в образцах дерново-слабоподзолистой тяжелосуглинистой почвы в зависимости от влажности почвы.

1 — фон навозного удобрения; 2 — фон минеральных удобрений; 3 — неудобренный фон. Влажность почвы. I — 20%; II — 40%; III — 60%.

тельно меньше, чем в начале опыта. Очевидно, что если в почву не вводить энергетических и пищевых веществ, то существующая в ней микробиологическая деятельность будет осуществляться за счет разрушения органического вещества самой почвы, что поведет к ухудшению водопрочности почвенной структуры.

В настоящее время на основании работ Всесоюзного научно-исследовательского института сельскохозяйственной микробиологии (Н. М. Лазарев, З. Н. Ляпшина и др.) можно сделать следующие выводы:

1. В отсутствие деятельности почвенной микрофлоры и при наличии оптимальных условий влажности и температуры необрабатываемые почвы сохраняют неопределенно долгое время имеющуюся структуру. Заражение простерилизованной почвы почвенной микрофлорой при-

водит в тех же условиях к значительному изменению структурного состояния почвы.

2. Создание водопрочной почвенной структуры связано с образованием синтезируемых перегнойных веществ в результате деятельности микроорганизмов, осваивающих растительные остатки в почве и состоящих в основном из плесневых грибов и бактерий — маслянокислых, аммонифицирующих, денитрифицирующих и целлюлозо-разрушающих.

3. Разрушение почвенной структуры связано с минерализацией перегнойных веществ, происходящей в результате развития микроорганизмов, состоящих в основном из бактерий — нитрифицирующих, аэробных, целлюлозо-разрушающих, аммонифицирующих и азотобактера.

4. Образование водопрочной структуры связано с синтезом и минерализацией перегнойной почвы и протекает одновременно с этими процессами. Вначале в связи с освоением растительных остатков в почве получают преимущественное развитие микроорганизмы, накапливающие перегной; в это время возникают в почвенной структуре свойства водопрочности. Деятельность бактерий, разлагающих перегной, подавлена. По мере освоения растительных остатков деятельность микроорганизмов, накапливающих перегной, ослабевает и начинает усиливаться деятельность микроорганизмов, минерализующих перегнойные вещества. Длительность существования водопрочной структуры определяется соотношениями этих экологических группировок микроорганизмов.

Приводимые на рис. 37 данные о динамике водопрочности почвенных агрегатов до некоторой степени подтверждают это. Результаты полевых наблюдений, полученные Т. В. Тюлиной при изучении динамики водопрочной структуры на средних тяжелосуглинистых черноземах Кокчетавской обл. Каз. ССР, приводятся на рис. 38.

На рис. 38 даются суммы водопрочных агрегатов размером более 0.25 мм (в процентах к воздушно-сухой исходной навеске). Образцы почвы брались с глубины 0—10 см и анализировались по методу Н. И. Саввинова, видоизмененному нами: устранена операция купанья агрегатов в цилиндре и введено намачивание в течение 1 часа.

Эти данные ясно указывают на цикличность в явлениях водопрочности структуры. Сходные явления наблю-

даются и на других почвах, например дерново-подзолистых. Цикличность связана с циклами развития микроорганизмов, осваивающих органическое вещество почвы. Водопрочность настолько «чувствительна», что ее изменения отражают применяемые приемы агротехники.

Мейерс (Meyers, 1941) и Мак-Кола (McCalla, 1945) отмечали, что им не удалось наблюдать совпадения мак-

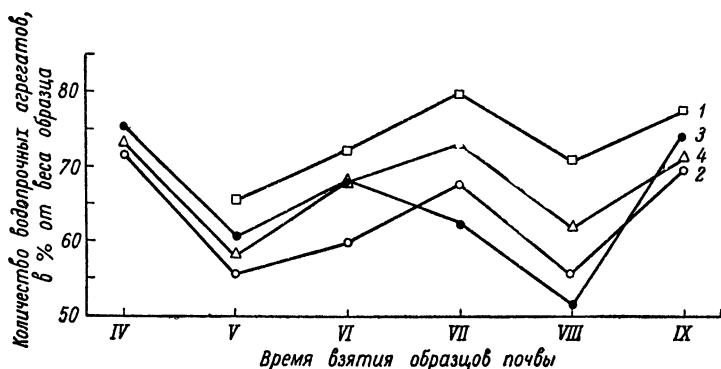


Рис. 38. Динамика водопрочной структуры (диам. больше 0.25 мм) в образцах средних тяжелосуглинистых черноземов Казахской ССР в 1955 г.

1 — целина; 2 — целина, поднятая по методу культурной вспашки; 3 — культурная вспашка целины с предварительным дискованием, 4 — культурная вспашка целины с последующим прикатыванием тяжелым катком. Пробы для анализа брались в конце каждого месяца.

симумов агрегации и числа бактерий. Максимум агрегации следовал на 5 дней позже максимума числа бактерий. Мак-Генри и Рассел (McHenry a. Russel, 1944) показали, что максимум агрегации следует за максимумом выделения углекислоты при разложении люцерны в почве. Авторы дают такое объяснение этому явлению: при разложении и синтезе органического вещества бактериями накапливаются продукты их метаболизма, которые действуют как цементирующий материал и способствуют структурообразованию.

Как показано на рис. 38, колебания в количестве водопрочных агрегатов составляют 15—25% и характеризуют лабильную почвенную структуру. Остальная же часть водопрочных агрегатов является более устойчивой,

так как их водопрочность связана с наличием в почве органических соединений типа гуминовых кислот.

Одних живых микроорганизмов и их плазмы, несмотря на то, что число их в грамме почвы достигает нескольких миллиардов, не хватает для водопрочного склеивания почвенных частиц, даже если считать, что и живые бактерии могут, несмотря на свою подвижность, склеивать почвенные частицы. Так, по данным С. П. Костычева и О. Шульгиной (1927), в почве, богатой микроорганизмами, вес сухого вещества в живой плазме и ее выделениях не превышает 0.1 % от веса почвы. В новых же работах Красильникова, Наумова, Степанова, Захарова этих веществ указывается раз в пять больше, а И. В. Тюрин снижает их количество, примерно, до 0,02% (Тюрин, 1946).

Из приведенных нами ранее данных по склеиванию почвы следует, что указанного количества клеящих веществ микроорганизмов, даже при полной их активности, недостаточно для получения серьезных изменений водопрочности. Эти расчеты свидетельствуют о том, что в гумусе почв с водопрочной структурой из года в год должны накапливаться какие-то биологически стойкие органические соединения, которые, достигнув количества 0.5—1.0% от веса почвы, переводят почвенную структуру из неводопрочной в водопрочную.

В связи с деятельностью микроорганизмов, червей и других более крупных организмов, населяющих почву, под действием ферментов, явлений автолиза микробных клеток органические остатки, накапливающиеся в почве, претерпевают биохимические изменения. Изменения идут как в направлении упрощения химического строения, так и в направлении усложнения, т. е. возникновения под влиянием синтеза новых органических образований.

В процессах биохимических изменений могут возникать высокомолекулярные, растворимые в воде или коллоидно-дисперсные клеящие вещества. Явления водопрочного структурообразования эффективно протекают лишь тогда, когда клеящие вещества пропитывают почву, образуют органические пленки, полимеризующиеся при подсыхании. Эти процессы и переводят склеивание из неводопрочного в водопрочное, о чем уже упоминалось выше.

Возникновение таких веществ возможно как среди углеводов, так и среди протеиновых, гуминовых соединений, как это будет указано ниже. При сходности действия на процессы структурообразования практически не так уж существенно, как называются эти перегнойные вещества — гуминовые, ульминовые, уроновые или другие органические кислоты. Более важно знать их клеящие свойства в связи с химическим строением, условиями их образования и продолжительностью их действия на почвенную структуру.

В. Р. Вильямс указал на закономерность образования органических веществ от усиления анаэробных условий в почве. Но как определить аэробные и анаэробные условия в почве? Имеется методика определения анаэробных условий в почве путем измерения содержания в ней углекислоты и кислорода, методом газового анализа прямо в поле (Вершинин и Поясов, 1952). Эта методика в некоторых случаях (например, на многолетних травосмесях в луго-пастбищных севооборотах) позволяет установить недостаток кислорода в отдельные фазы развития растений. Но она не всегда точно отражает условия микробиологических процессов в микроразонах почвы. В межагрегатной капиллярной системе соотношения кислорода и углекислоты могут быть благоприятными для растений, внутри же почвенных комков при этом могут существовать анаэробные условия, не учитываемые этой методикой. Ее дополняет методика, разработанная Сердобольским, в которой суждение о процессах в комке дается по окислительно-восстановительному потенциалу. Эти методы, применяемые одновременно, могут осветить неясные стороны анаэробных и аэробных процессов в почве, улучшение же методики позволит более строго обосновать вопросы регулирования и накопления в почве водопропрочной структуры и указать пути к изысканию новых приемов обработки почв. Практика настойчиво этого добивается. Достаточно в этом случае указать на работы Т. С. Мальцева, который полагает, что путем частого рыхления поверхностного слоя почвы можно создать аэробный экран, ниже которого будут преобладать анаэробные условия, благоприятствующие образованию в этих горизонтах водопропрочной структуры.

Глава VI

ВОССТАНОВЛЕНИЕ И НАКОПЛЕНИЕ ВОДОПРОЧНОЙ СТРУКТУРЫ ПОД ТРАВАМИ

До сих пор мы рассматривали факторы формирования почвенной структуры. В некоторых почвенных зонах в связи с природными условиями водопрочной почвенной структуры накапливается недостаточно и для повышения урожайности сельскохозяйственных культур структуру необходимо создавать заново. В других почвенных зонах водопрочная почвенная структура образуется в достаточной степени, но в процессе сельскохозяйственных работ она разрушается; возникает задача ее восстановить. Не имея возможности осветить все пути восстановления и создания водопрочной почвенной структуры, остановимся на наиболее важных.

Изучая смену растительности при зарастании старопашоты, П. А. Костычев открыл влияние корней травянистой растительности на водопрочность почвенной структуры. Его работы продолжил В. Р. Вильямс. В курсе лекций по почвоведению в 1895 г. он писал: «. . . при внесении навоза мы не в состоянии распределить его равномерно по всей массе почвы. . . корни же растений распределяются в почве очень равномерно и при своем отмирании оставляют перегной на всем пути своего распространения, пронизывая охваченные ими комочки со всех сторон. Это пропитывание не распространяется глубоко в каждый комочек, пропитывается только наружная оболочка его, но она защищает от размывания внутреннюю, непропитанную часть комочка и таким обра-

зом как бы маскирует отсутствие прочности в средней части комков». Как известно, это положение В. Р. Вильямса о роли трав в придании прочности (водопрочности) почвенной структуре легло в основание разработанного им учения о травопольной системе земледелия, получившей широкое распространение. Структурообразующая роль трав подтверждается и целым рядом зарубежных ученых (Э. Д. Рассел, Л. Д. Бейвер и др.).

Развитие учения о влиянии трав на формирование водопрочной структуры в основном принадлежит русским и советским ученым. В последнее десятилетие, в особенности в послевоенное время, количество работ по изучению влияния многолетних трав на структуру почвы резко увеличилось. Можно сказать с полной уверенностью, что до последнего времени нет такой области в Советском Союзе, где бы в той или иной мере этот вопрос не изучался. В связи с этим как в трудах опытных станций, так и в трудах отдельных исследователей по вопросу о влиянии многолетних трав на почвенную структуру накопилось много материалов. Но материалы по влиянию трав на структуру почвы сплошь и рядом получены не путем многолетних наблюдений на одном и том же поле, а сразу в один год по ряду полей севооборота. При этом методе в полученных материалах отражается пестрота полей по плодородию, истинный же эффект по влиянию трав на почвенную структуру в местных условиях затушевывается. В силу этого данные о роли многолетних трав в восстановлении и накоплении свойств водопрочности почвенной структуры получаются или необоснованно увеличенными или заниженными. Поэтому, не ставя себе задачу дать полную сводку о влиянии многолетних трав на почвенную структуру, мы остановимся лишь на некоторых работах, которые помогли в той или иной мере установить эффективность структурообразования под травосмесями по отдельным почвенным зонам.

В табл. 31 приводятся данные А. А. Плотникова (1956) по влиянию многолетних трав на количество водопрочных агрегатов в среднеподзолистой пылевато-суглинистой почве Ивановской области. Агрегатный анализ проводился на приборе Бакшеева с предварительным капиллярным насыщением агрегатов в течение 30 минут. Из табл. 31 следует, что культура травосмесей увеличивает количество

Влияние травосмесей на водопрочность почвенной структуры

Сроки взятия проб	Поля севооборота	Урожай в пересчете на 1 га, ц	Количество водопрочных агрегатов больше 0 25 мм, %	
			всего	в том числе агрегатов больше 1 мм
2 X 1949	Пар черный	—	33.6	17.2
5 X 1950	Озимая пшеница с подсевом трав	Зерна 29.6	36.2	15.8
5 X 1951	Клевер с тимофеевкой . . .	Сена 39.6	46.8	30.6
	Клевер с овсяницей	Сена 36.3	48.5	31.3
	Клевер с тимофеевкой и овсяницей	Сена 38.9	48.7	33.0
	Клевер с тимофеевкой . . .	Сена 57.8	68.4	32.7
11 X 1952	Клевер с овсяницей	Сена 60.3	70.3	34.3
	Клевер с тимофеевкой и овсяницей	Сена 76.6	75.0	34.5

водопрочных агрегатов в почве. Увеличение водопрочных агрегатов идет в соответствии с увеличением урожая трав.

Высокое действие трав на структуру почв отмечается С. И. Ильменевым (1937) на подзолистой суглинистой почве опытного поля Тимирязевской сельскохозяйственной академии в опытах с бессменными культурами. Этот опыт заложен по инициативе акад. Д. Н. Прянишникова в 1912 г. Севооборот на опытных делянках разбит одновременно, и хотя начальное состояние структурности не отмечено, но почва была одна и та же и тенденцию той или иной культуры в отношении оструктурирования почвы выявить можно. В качестве характеристики взяты: суммы фракций агрегатного анализа больше 0.25 мм, или, иначе, структурные фракции, сумма фракций меньше 0.25 мм, или пылеватые бесструктурные фракции, а также отношение их как показатель оструктурированности почвы. Анализ водопрочности производился по Саввинову. Полу-

ченные результаты приводятся в табл. 32. Из таблицы видно, что бессменное парование не благоприятствует накоплению водопрочных агрегатов. Структурообразующей способностью обладают не только клевер, но и другие сельскохозяйственные растения. По структурообразующей роли они располагаются так: картофель, овес, рожь, клевер, причем последний дает наивысший эффект. Порядок расположения по структурообразующей способности сохраняется как без удобрений, так и по фону NPK и навозу. Наивысший эффект получается по фону навоза. В этом случае структурообразующая роль клевера настолько значительна, что подзолистая почва по своей водопрочности приближается к черноземным почвам.

Т а б л и ц а 32

Влияние различных сельскохозяйственных растений на водопрочность почвенной структуры

Опытные делянки	NPK			Навоз			Контроль		
	больше 0 25 мм (а)	меньше 0.25 мм (б)	отношение $\frac{а}{б}$	больше 0.25 мм (а)	меньше 0 25 мм (б)	отношение $\frac{а}{б}$	больше 0.25 мм (а)	меньше 0.25 мм (б)	отношение $\frac{а}{б}$
Бессменный пар . .	38.82	61.18	0.63	43.88	56.12	0.80	40.06	59.94	0.67
Бессменная рожь . .	67.02	32.98	2.03	72.90	27.10	4.30	66.48	33.52	2.00
Бессменный карто- фель	53.10	46.90	1.13	57.68	42.32	1.38	53.28	46.72	1.14
Бессменный овес . .	65.12	34.88	1.85	66.68	33.32	2.00	63.80	36.20	1.76
Бессменный клевер	72.35	27.65	2.98	86.69	13.31	6.51	79.73	20.17	3.95

Аналогичные тенденции к накоплению водопрочных агрегатов при бессменном паровании и под различными сельскохозяйственными структурами приводятся Н. И. Савиновым (1936а) для Ротамстедской опытной станции (Англия), где опыт с бессменными культурами ведется с 1843 г. Непрерывное парование привело к полной потере водопрочных агрегатов. Этого не произошло под пшеницей. Наиболее высокая водопрочность обнаруживается под естественными сенокосами.

• Из материалов по действию трав на водопрочность структуры, характерных для области, переходной к черноземам (серые лесные земли), приведем данные И. Коданева (1946), полученные на Горьковской опытной станции:

	Количество агрегатов размером более 0.25 мм, %
Рожь	19.0
Клевер 1-го года пользования	25.9
Клевер+тимофеевка 1-го года пользования	32.5
Клевер 2-го года пользования	27.5
Клевер+тимофеевка 2-го года пользования	41.7

Влияние многолетней травянистой растительности на водопрочность почвенной структуры на черноземных почвах было изучено еще П. А. Костычевым. Из более новых опытных материалов в табл. 33 и 34 приводятся данные О. С. Ростовцевой и М. И. Аваевой.

Т а б л и ц а 33

Влияние многолетних трав на водопрочность почвенной структуры (почва — деградированный чернозем)

Угодие	Количество агрегатов, %							Отно- шение ≥ 0.25 / < 0.25
	больше 3 мм	3—2 мм	2—1 мм	1—0.5 мм	0.5—0.25 мм	сумма		
						больше 0.25 мм	меньше 0.25 мм	
Старопахота . . .	3.0	3.2	9.8	19.5	11.1	46.6	53.4	0.87
Травы 1-го года .	9.4	3.7	10.1	17.0	15.8	56.0	44.0	1.30
Травы 2-го года .	9.9	4.1	14.9	21.2	13.5	63.6	36.4	1.80
Пустошь	20.3	3.0	7.1	14.5	16.4	61.3	38.7	1.60

Из сравнения данных, приведенных в табл. 31—33, следует, что действие трав на структурность деградированных черноземов мало чем отличается от действия их на структурность подзолистых и серых лесных почв, во всяком случае порядок структурности тот же.

В табл. 34 показано влияние естественного дернового процесса на структурообразование мощного суглинистого чернозема. Из данных таблицы следует, что целинные

**Влияние многолетней травянистой растительности на водопро-
чность почвенной структуры**

Угодие	Количество агрегатов, %							Отно- шение ≥ 0.25 / < 0.25
	больше 3 мм	3—2 мм	2—1 мм	1—0.5 мм	0.5—0.25 мм	сумма		
						больше 0.25 мм	меньше 0.25 мм	
Старопахота . .	9.3	4.7	12.6	19.9	11.1	57.6	42.4	1.4
Залежь	45.0	7.6	18.0	6.4	6.1	83.1	16.9	5.0
Целина	59.5	10.4	10.2	5.4	3.2	88.7	11.3	8.0

черноземные почвы показывают высокую степень оструктуренности. Распахивание в значительной степени разрушает природную структуру, а залежь постепенно ее восстанавливает.

Чем ближе к юго-востоку, т. е. к засушливым районам с малыми количествами дождей, тем больше снижается эффект действия многолетних трав на восстановление структуры почвы, что видно из табл. 35, приводимой Н. И. Саввиновым для почв каштановой зоны.

Таблица 35

**Зависимость водопрочности структуры от характера многолетних
трав и травосмесей (почва — темно-каштановая, тяжелосуглипи-
стая, Краснокутская опытная станция)**

Угодие	Количество агрегатов, %						Отно- шение $\frac{V_{> 0.25}}{V_{< 0.25}}$ мм
	10—3 мм	3—1 мм	1—0.5 мм	0.5—0.25 мм	сумма		
					больше 0.25 мм	меньше 0.25 мм	
Черный пар 4-летний .	—	2.6	4.1	13.0	19.7	80.3	0.25
Житняк 4-летний . . .	0.2	2.7	4.3	12.8	20.0	80.0	0.25
Желтая люцерна 4-лет- няя	0.9	6.4	5.7	14.0	27.0	73.0	0.33
Желтая люцерна с жит- няком 4-летним . . .	0.5	5.3	5.9	16.4	28.1	71.9	0.39
Целинная степь	2.5	8.0	5.8	13.0	29.3	70.7	0.41

Из табл. 35 следует, что наибольшая водопрочность структуры наблюдается под целинной степью, далее идет смесь многолетних злаковых и бобовых трав, на последнем месте стоит пар. Но количественное значение влияния многолетних трав на прочность структуры в данной зоне настолько мало, что требует для этой области специально разработанных мероприятий для улучшения почвенной структуры.

Т. С. Мальцев (1954) для условий засушливого Зауралья считает, что однолетние травы дают больший урожай, чем многолетние. Поэтому структурообразующее действие многолетних трав не отличается от структурообразующего действия однолетних культур, как это видно из табл. 36.

Сводку о действии трав на повышение водопрочной структуры на сероземах дает И. А. Дорман (1949). Эти данные приводятся в табл. 37.

При рассмотрении влияния многолетних трав на структуру почв в различных почвенных зонах невольно возникает вопрос о механизме действия трав на формирование почвенной структуры. Совершенно очевидно, что этот механизм сложен и достаточно достоверных объяснений его до настоящего времени пока еще не имеется. Одно несомненно, что многолетние травы накапливают в почве органические клеящие вещества, придающие почвенным агрегатам водопрочность. В связи с этим можно сказать, что чем больше травы оставляют в почве растительных корневых остатков, тем выше их структурообразующая роль. В общем виде можно утверждать, что корневых остатков в почве после трав будет больше там, где урожай трав выше. Существовавшее ранее утверждение, что многолетние травы создают водопрочную почвенную структуру, а однолетние ее разрушают, неправильно. Все сельскохозяйственные культуры в той или иной степени создают водопрочную структуру. При благоприятных условиях увлажнения и соответствующей микробиологической деятельности многолетние травы и травосмеси резко выделяются по структурообразующему эффекту. Лишь бессменный пар может привести к полному разрушению водопрочной почвенной структуры.

По современным микробиологическим представлениям, как об этом было сказано ранее, в почве развиваются

Зависимость водопрочности почвенной структуры от характера сельскохозяйственных культур (срок взятия образцов — сентябрь)

Культура	Глубина взятия образцов, см	Количество водопрочных агрегатов крупнее 0.25 мм, %
Горох	0—7	40.0
	7—14	44.8
	14—21	50.8
	21—28	63.9
Чина	0—7	38.5
	7—14	47.1
	14—21	44.7
	21—28	56.6
Клевер 1-го года пользования	0—7	35.9
	7—14	35.6
	14—21	45.1
	21—28	71.8
Клевер 2-го года пользования	0—7	33.0
	7—14	44.2
	14—21	60.4
	21—28	53.7
Тимофеевка 2-го года пользования	0—7	38.3
	7—14	38.9
	14—21	50.2
	21—28	65.7

микроорганизмы двух типов. Одни осваивают растительные остатки и накапливают в ней гумус, другие минерализуют этот почвенный гумус, а вместе с ним и клеящие вещества, придающие водопрочность почвенным агрегатам. Общие условия развития микроорганизмов в почве, связанные с развитием почвообразовательных процессов в различных климатических условиях, более благоприятствуют накоплению органических клеящих веществ в подзолистой и северной половине черноземной зоны и менее благоприятствуют в зоне каштановых почв и сероземов. В засушливых зонах вопрос создания и восстановления структуры введением в севооборот полей с много-

Содержание водопрочных агрегатов более 0.25 мм (в %) на старопашке, люцерне и травосмеси

Опытные станции	На старопашоте (а)	После люцерны (б)	После травосмеси (в)	Отношение в б	Отношение в а
Таджикская . . .	13.0	25.2	33.0	131	254
Хорезмская . . .	4.3	10.6	13.7	129	319
Казахская . . .	16.2	19.8	29.2	147	180
Ак-Кавакская {	—	34.0	37.5	110	—
	12.6	—	37.0	—	293

летними травами требует тщательного изучения и разработки дополнительных специальных мероприятий. Это относится также и к поливному земледелию в засушливых зонах. Наличие влаги в этих условиях позволяет резко повысить урожайность трав, но не следует забывать, что достаточная влажность и высокая температура активизируют и развитие микроорганизмов, разлагающих органическое вещество почвы. Лишь создание условий господства микробиологических процессов, ведущих к накоплению в почве органических клеящих веществ, над процессами их минерализации позволит правильно решить в этих зонах вопрос улучшения почвенной структуры.

Глава VII

ОБ ИСКУССТВЕННОМ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИИ

Достижения в изучении явления водопрочности структуры и в целом всего процесса структурообразования, экспериментальное подтверждение решающей роли перегнойных кислот в явлениях водопрочности структуры породили естественное желание воспроизвести эти явления как в лабораторных, так и в полевых условиях. Степень воспроизводимости наблюдаемого явления есть прямое доказательство глубины его понимания.

Фадеев и Вильямс пытались воспроизвести в лаборатории явления водопрочности почвенной структуры, вводя в почву полученные лабораторным путем гуминовые вещества.

Идея улучшения водопрочности почвенной структуры с особенной силой возродилась в 1932 г. во вновь образованном Агрофизическом институте. Член-корр. АН СССР Д. Л. Талмуд в 1932 г. писал: «Перегнойные кислоты связывают почвенный скелет, образуя на поверхности отдельных частиц и капелек воды адсорбционные слои, связанные друг с другом в сетку, подобно тому, как это имеет место в моделях лиофильных систем. Ясно при этом, что структурообразующими будут любые поверхностно активные вещества, а не только перегнойные кислоты».¹

¹ Это высказывание применимо к клеящим веществам, а не ко всем поверхностно активным соединениям.

Акад. А. Ф. Иоффе, выступая в 1933 г. на Всесоюзном совещании дорожников, говорил, что люди очень долго не могли постичь принципы арочных мостов. Римляне строили сплошные мосты. Лишь потом человечество научилось строить ажурные мосты, пользуясь достижениями математики и физики. Такая же примерно картина наблюдается и в вопросе введения клеящих веществ в почву. По современным физическим и химическим представлениям нет необходимости заполнять все поры почвы клеящим веществом. Достаточно ввести его столько, чтобы обеспечить склеивание между частицами в отдельных точках. Мономолекулярный или близкий к нему слой этих веществ обеспечит это явление.

Физико-химические требования к клеящим веществам, вводимым в почву

Вещества, вводимые в почву с целью вызвать в ней водонепроницаемое склеивание, должны обладать, наряду с другими, следующими свойствами: 1) растворяться в воде и пропитывать почву; 2) в почве образовывать нерастворимую в воде пленку, покрывающую почвенные частицы. Пленка должна быть проницаема для воды и ионов и склеивать почвенные частицы. Если же почва имеет достаточное количество клеящих веществ, но эти вещества неводонепроницаемы, то пленка, покрывая эти вещества, защищает их от размывания в воде.

Учение о пленкообразующих веществах в настоящее время, применительно к промышленности, сильно развилось и выросло. Пленкообразующие вещества в большинстве случаев относятся к высокомолекулярным органическим соединениям (но имеются и минеральные пленкообразующие вещества). Переход этих веществ из растворимого в нерастворимое состояние с образованием пленок совершается путем полимеризации с потерей растворителя или путем изменения физического строения молекул под влиянием отнятия тепла или нагревания под давлением.

Для почвенных условий важное значение имеет переход из растворимого в нерастворимое пленкообразное состояние под влиянием обменных реакций между рас-

творенными веществами и поглощенными почвенными катионами и потери растворителя (воды) испарением.

Почва обрабатывается раствором клеящих водопрочных веществ, подсушивается до влажности структурообразования, при которой рыхлится безотвальными орудиями (боронами, культиваторами) до преобладания агрономически ценных (по размерам) агрегатов. Водопрочность агрегатов появляется обычно после их подсыхания, при этом чем лучше просыхают агрегаты, тем больше они противостоят в дальнейшем размывающему действию воды.

Возможно внесение клеящих водопрочных веществ и в сухом виде. В этом случае почва перемешивается с порошком из соответствующего вещества. Если почва сухая, то она увлажняется до полевой влагоемкости. Клеящие вещества растворяются в почвенной влаге и пропитывают почву, которая далее обрабатывается так же, как указано выше.

Количество вносимых клеящих веществ зависит от почвы, ее механического состава, от характера клеящих веществ, их способности растворяться в воде. Если клеящие вещества вносятся не только в целях придания почве свойств водопрочности, но и в целях улучшения явлений склеивания, то количество клеящих веществ в этом случае определяется экспериментально, как это указано в главе о склеивании, путем пропитывания почвенного образца различными дозами клеящих веществ и испытания проклеенных образцов на разрыв по приведенной ранее методике.

Если же вещества вносятся в почвы, обладающие достаточным количеством клеящих веществ (суглинистые и глинистые), и стоит задача повысить лишь водопрочность почвенных агрегатов, то количество клеящих веществ, дающих лучший эффект, может быть вычислено с принятием во внимание удельной поверхности почвы.

Удельная поверхность определяется обычными методами (геометрическим — по механическому составу, адсорбционным — по адсорбции тех или иных красителей или воды, рентгенографическим и др.). Количество клеящих веществ в этом случае может быть получено и экспериментально, как это будет указано ниже.

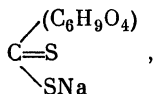
Изменение водопрочности почвенной структуры под влиянием клеящих веществ

Все излагаемые ниже типы веществ, наряду с другими, могут получаться в почве при разложении растительных или животных остатков и входить в состав почвенного гумуса. Иначе говоря, они не являются соединениями, химически чуждыми для природных процессов почвы. В то же время опыты с этими веществами, химическая природа которых в большинстве случаев ясна, позволяют делать обоснованные выводы, а не ограничиваться только предположениями, которые могут доказать лишь потомки.

Влияние целлюлоз и гемицеллюлоз на водопрочность почвенной структуры

Опыты с вискозой. Вискоза представляет собой технический продукт, применяющийся для получения искусственного шелка. В волокнах целлюлозы длинные нитевидные молекулы стабилизированы расположением в кристаллической решетке. Обработка 17—18%-м едким натром и в особенности сероуглеродом способствует сильному расщеплению молекул целлюлозы, благодаря чему она приобретает способность давать в воде высокодисперсный коллоидный раствор. Целлюлоза представляет высокополимерное соединение $(C_6H_{10}O_5)_x$, где x — степень полимеризации. На основании различных измерений (Хейзер, 1933) x равен 400—500.

Строение целлюлозы объясняет физические свойства ее растворов и, в частности, вискозы. Высокая вязкость и тягучесть вискозы тесно связаны с нитевидными формами мицелл. Длина мицелл целлюлозы равна $500\text{ \AA}$, ширина около $50\text{ \AA}$. Вискоза,



оставленная на воздухе, начинает разрушаться. Под действием углекислоты воздуха идет отщепление ксантогеновых радикалов, что ведет к изменению отношения

между Na, S и целлюлозой. Содержание целлюлозы возрастает до тех пор, пока она не перейдет в чистую целлюлозу. Вместе с отщеплением ксантогената натрия исчезает и гидрофильность мицелл; появляются гидрофобные участки, которыми мицеллы и соединяются в длинные цепи. Если вискоза лежит в сосуде, то эти цепи переплетаются и образуют роговидноподобное тело. Если же вискозу заставить протекать через отверстия, то мицеллы ориентируются в длинные нити, которые применяются для приготовления искусственного шелка.

Чистые кварцевые пески различной дисперсности, а также подзолистые почвы обрабатывались различными концентрациями вискозы, высушивались, агрегировались и испытывались на водоустойчивость. Было показано (Вершинин, 1935), что как пески, так и почвы, обработанные вискозой, обнаруживают высокие свойства водопропрочности. Цепи из нитевидных мицелл вискозы, прилипая к поверхности почвенных частиц, при высыхании удерживают их в комке, а так как вискоза, переходя в целлюлозу, приобретает свойства нерастворимости, то и сцементированный ею комок оказывается водопропрочным. Это относится как к пескам, так и к почве.

Опыт с ксиланом. Из гемицеллюлоз испытывался в нашей лаборатории Н. Я. Солечником ксилан. Ксилан получался по методу Сальковского.¹ Опыт проводился так же, как и с вискозой. Почва в воздушно-сухом состоянии растиралась в ступке, просеивалась через сито с отверстиями 0.25 мм и агрегировалась.

Ксилан не придает почве свойств водопропрочности, несмотря на то, что он хорошо желатинируется и обладает неплохими механическими свойствами. Это, видимо, находится в связи с его высокой растворимостью. Вве-

¹ 100 г измельченной соломы кипятят в 2.5 л 5%-го NaOH в течение 45 минут. По охлаждении фильтруют через полотно. Отжимают осадок и дают стоять фильтрату в высоком цилиндре несколько дней. Затем жидкость сверху декантируют, смешивают с 1 л Фелингова раствора и осторожно нагревают. Осадок фильтруют через полотно, промывают и растирают с 12%-й серной кислотой (для удаления меди) до тех пор, пока не исчезает голубое окрашивание. Затем осадок смешивают с 2—3 объемами 95%-го спирта, фильтруют и снова промывают абсолютным спиртом. Дают стоять в абсолютном спирте, после чего растирают с эфиром и удаляют эфир осторожным нагреванием.

дение больших доз извести уменьшает растворимость ксилана, что приводит к повышению водопрочности почвенных комочков.

Два рассмотренные вещества типа углеводов по-разному влияют на свойства водопрочности почвы. Основную роль в этом явлении играет растворимость клеящих веществ в воде после их внесения в почву.

Влияние лигнина на водопрочность почвенных агрегатов

Для испытания применялся лигнин, полученный по мягкому способу Бекмана и Лише (Солечник, 1937), так как предполагалось, что лигнин, выделенный сильными кислотами, существенно изменяется и мало походит на природный. По этому способу лигнин получается экстрагированием соломы 2%-м спиртовым раствором едкого натра или 1.5%-м водным едким натром с последующим удалением углеводов кипячением с 2—2.5%-й соляной кислотой или путем осаждения метиловым или этиловым спиртом.

Лигнин, высушенный на воздухе, нерастворим в воде и комков не образует, имеет малую механическую прочность, рассыпаясь в порошок. В почву лигнин вводился в пептизированном в щелочи (1 %-й КОН) виде.

Влияние гуминовой кислоты на водопрочность почвенных агрегатов

Препарат гуминовой кислоты получался из торфа по методу С. Одена. Сравнительные данные, полученные Н. Я. Солечником для гуминовой кислоты, вискозы, ксилана и лигнина, введенных в подзолистую суглинистую почву в количестве 0.5% от веса почвы, приведены в табл. 38. Как видно из таблицы, гуминовая кислота, введенная в почву в таком же количестве, как ксилан и лигнин, дает более высокие показатели водопрочности. Подобно лигнину, увеличение количества внесенной извести ухудшает результаты. Сходные показания по водопрочности дает и гиматомелановая кислота. Считая, что в вопросах формирования водопрочной структуры в природных условиях гуминовым веществам принадлежит решающая роль, попытаемся уяснить себе механизм

Сравнительные данные о структурообразующей способности различных клеящих веществ

Размер агрегатов	Исходная почва, оструктуренная в воде	Исходная почва + 0.1% вискозы	Исходная почва, проклеенная 0.5%				Исходная почва +0.1% СаО, проклеенная 0.5%				Исходная почва +0.5% СаО, проклеенная 0.5%				Исходная почва +2% СаО, проклеенная 0.5%			
			лигнинная	гуминовой кислоты	гуминовой кислоты + 1% уксус- ной кислоты	лигнинная	гуминовой кислоты	лигнинная	гуминовой кислоты	лигнинная	гуминовой кислоты	лигнинная	гуминовой кислоты	лигнинная	гуминовой кислоты	лигнинная	гуминовой кислоты	
3—2 мм	—	—	66.6	60.0	0.30	—	35.7	49.1	35.0	—	22.6	26.0	59.7	31.6	17.8	79.5		
2—1 »	—	81.0	10.4	19.7	2.20	0.2	18.2	14.9	0.8	0.3	18.5	11.5	21.0	14.8	17.2	4.1		
1—0.5 »	2.2	—	1.6	1.6	13.1	10.9	2.6	4.5	0.2	5.5	19.5	9.9	14.2	3.2	18.0	1.7		
0.5—0.25 »	49.0	19.0	4.2	8.5	38.0	27.2	11.6	7.0	0.6	36.0	18.7	16.3	14.7	9.6	16.7	2.7		
Меньше 0.25 мм	48.8	—	17.2	10.2	46.4	61.7	31.9	24.2	3.4	58.2	43.3	32.7	33.5	40.8	50.3	12.0		

возникающей при этом водопрочности почвенного комка. Тщательно отдиализированная гуминовая кислота, выделенная нами из Шуваловского торфа, показала pH 3.6 (измерено стеклянным электродом).

Чем лучше отдиализирована гуминовая кислота, тем лучше она коллоидно растворяется в воде. Дисперсность золя увеличивается по мере разведения гуминовой кислоты водой, и обратно — по мере увеличения концентрации гуминовой кислоты увеличивается способность ее частиц к слипанию. При концентрации в воде, равной 37%, гуминовая кислота представляет уже твердое тело, нерастворимое в воде. Это обстоятельство имеет чрезвычайно важное значение в формировании водопрочного почвенного комка под влиянием гуминовой кислоты.

Такое простое явление, как подсушивание золя гуминовой кислоты в почве, уже может обеспечить водопрочность ее агрегатов. Сильного высушивания даже

и не требуется. При концентрации до 35—40% гуминовая кислота уже может необратимо склеивать почвенные частицы, как это указывалось ранее, при изучении клеящих веществ. В этом и заключается особо важная и специфическая особенность гуминовой кислоты и близких к ней веществ в явлении формирования водопрочности почвенного комка. Замораживание не дает такого явления, оно вызывает лишь свертывание частиц, причем эти явления обратимы, т. е. при оттаивании слипшиеся частицы опять разъединяются.

Данные о строении гуминовой кислоты противоречивы. И. Д. Седлецкий (Седлецкий и Бруновский, 1936) считает, что гуминовая кислота имеет мелкокристаллическое строение. Кристаллит гуминовой кислоты по своим размерам и является мицеллой золя гуминовой кислоты. Он обладает дипольным моментом с асимметрично расположенными зарядами. Н. И. Горбунов (1947) оспаривает выводы Седлецкого и доказывает, что гуминовая кислота имеет не кристаллическое, а аморфное строение. По мере высыхания частицы гуминовой кислоты начинают поворачиваться вдоль линии дипольных сил и слипаться с образованием длинных цепей. Это подтверждается и современными исследованиями. По данным Э. Ю. Золотаревой, при рассматривании гуминовых кислот в электронном микроскопе с увеличением в 12 тысяч раз видно, что они состоят из мельчайших частичек, размером около 0.1 мк. Эти частички соединены в цепочки, вся масса которых образует сплошную сетку.

По мнению Т. А. Кухаренко (1953), образование гуминовых кислот происходит в результате постепенного окисления и бактериального изменения при ограниченном доступе воздуха всех органических веществ, входящих в состав растений, а не только лигнина или клетчатки.

Ряд исследователей — Фукс, Фишер, Шрадер и их последователи — считает, что углеводы, белки и другие вещества расщепляются при бактериальном распаде до простых соединений, которые удаляются из сферы реакции и в гумусообразовании не участвуют. Это утверждение не соответствует фактам. При бактериальном разложении многие соединения дают продукты неполного распада, которые вступают во взаимодействие с продуктами изменений и образуют специфическую форму угле-

родистых соединений, более устойчивую к изменениям, — гуминовые кислоты.

По исследованиям Оствальда и Редигера (Ostwald u. Röediger, 1929), при действии раствора щелочей на свободную гуминовую кислоту идет в основном солеобразование, осложненное явлениями пептизации. Средние концентрации щелочи вызывают пептизацию, более высокие и более низкие — имеют характер солеобразования. По Одену, степень дисперсности гуматов зависит от количества связанного щелочного основания. Четверть количества, потребного для полного замещения всех четырех карбоксильных групп, уже достаточна для перевода гуминовой кислоты в раствор. При составе гумата, соответствующем однозамещенной соли, раствор имеет слабокислую реакцию (рН около 5.0). Раствор двухзамещенного гумата имеет рН около 7.0, трехзамещенного — около 9.0 и четырехзамещенного — около 11.0. При избытке щелочи, по С. Одену, образуется истинный раствор. Наши наблюдения над растворением высушенного комка из гуминовой кислоты показали, что заметная пептизация ее начинается лишь при рН выше 7.0. В кислом интервале гуминовая кислота после высыхания нерастворима в воде. Гуматы двухвалентных катионов нерастворимы в воде, обладают клеящими свойствами, хорошо согласующимися с их способностью образовывать комки только при высыхании. Явлений коагуляции, вызванных резким изменением заряда, как это уже указывалось, еще недостаточно, чтобы вызвать образование водопрочности у почвенного комка. В этом мы убедились, производя опыты с гуминовой кислотой, свернутой кальцием. Хлопья гумата кальция разбалтываются в воде и лишь под действием высыхания, дойдя до 40% концентрации, начинают слипаться и образовывать комок, нерастворимый в воде.

Не лишены интереса данные по влиянию гуминовой кислоты на водопрочность почвенных агрегатов вместе с другими низкомолекулярными органическими кислотами.

В табл. 38 приводятся результаты агрегатного анализа после размывания образцов подзолистой суглинистой почвы, обработанной чистой гуминовой кислотой, в количестве 0.5% от веса почвы, вместе с 1%-й ук-

сусной кислотой. Эти данные показывают, что водопрочность агрегатов резко ухудшается при введении вместе с гуминовой кислотой уксусной кислоты.

Влияние битумов на водопрочность почвы

Из других фракций органического вещества битумы также могут способствовать образованию водопрочных комков. В табл. 38 показано влияние битумов, выделенных из торфа, на водопрочность почвенной структуры. Как свидетельствуют эти данные, битумы дали наиболее высокие показатели по водопрочности по сравнению с другими клеящими веществами.

О количестве веществ, придающих водопрочность почвенным агрегатам

Образцы дерново-подзолистой суглинистой почвы обрабатывались перекисью водорода по методу К. К. Гедройца для удаления из них органического вещества, затем пропитывались разными количествами торфяного клея, состоящего в основном из гумата калия (метод приготовления торфяного клея приводится ниже, стр. 161). Далее пропитанные клеем образцы агрегировались, отбирались агрегаты от 1 до 3 мм и в воздушно-сухом состоянии размывались на ситах. Приводим полученные при этом данные агрегатного анализа:

Количество органических веществ от веса образца почвы	Количество неразмытых агрегатов крупнее 0.25 мм, %
0.0	3.0
0.6	5.8
1.2	39.3
3.6	95.0
6.0	89.4
12.0	74.1
24.0	85.7

Из полученных результатов видно, что при количестве органических веществ, равном 3—4% от веса почвы, наступает резкое увеличение водопрочности агрегатов.

Зависимость водопрочности почвенных агрегатов от количества вводимых гумифицированных органических

веществ указывалась исследователями и раньше. Шлезинг (Schloesing, 1874), составляя смеси из песка, извести, глины и органических веществ, установил, что при наличии 1% гуматов наблюдается устойчивость комков от размывания их водой. В. Р. Вильямсом (1949) отмечалось, что «согласно опытным данным, средняя по механическому составу почва приобретает максимальную прочность при содержании от 3 до 4% гуминовой кислоты, перешедшей в нерастворимое состояние и равномерно распределенной по всей массе почвы». Набоких (1914) писал, что «чернозем на песчаных грунтах обыкновенно лишен зернистости, однако и такие почвы приобретают характерную структуру, если только накопление перегноя достигает значительных количеств, например свыше 5—6% от веса почвы».

Определяя удельную поверхность почвы, на которой производились опыты, по кривой изотермы адсорбции водяных паров, мы нашли ее равной примерно $10^5 \text{ см}^2/\text{г}$. Иначе говоря, 1 г почвы имел удельную поверхность 10^5 см^2 . Ведекинд и Катц (Wedekind u. Katz, 1929), пользуясь методом растекания по поверхности воды, нашли для лигнина (по Вильштеттеру) толщину пленки мономолекулярного слоя равной порядка $10 \text{ \AA}$ (10^{-7} см). Вводимое нами органическое вещество состоит из $2/3$ гуминовой кислоты, и если допустить, что размеры первичных частиц гуминовой кислоты близки к таковым же лигнина, то для мономолекулярного покрытия поверхности 1 г нашей почвы потребуется гуминовой кислоты $10^{-7} \text{ см} \times 10^5 \text{ см}^2 = 10^{-2} \text{ см}^3$. Принимая во внимание, что удельный вес нашей гуминовой кислоты составляет 1.35, и пользуясь приведенной выше формулой, будем иметь $1.35 \cdot 10^{-2}$ г, или 1.35% от веса почвы. Полагая, что дисперсность вводимого нами органического вещества была мицеллярная, можно с уверенностью утверждать, что количество органических веществ 3—4%, необходимое для придания агрегатам полной водоустойчивости, соответствует близкому к однослойному покрытию поверхности почвенных частиц частицами органического вещества. Косвенно эти величины подтверждаются и другими исследователями.

Так, Турнером (Turner, 1932) установлено, что в тропических почвах при весовом соотношении между глиной

и гумусом, превышающем 20, гумусовые частицы покрывают глинистые частицы в виде поверхностных пленок.

Исходя из количества клеящих веществ, можно истолковать данные Майера (Myers, 1941) по изменению скорости катафореза глинистых частиц при добавлении к ним органического вещества. Максимум скорости катафореза наблюдался при прибавлении к глинистым частицам 4% органического вещества, при дальнейшем прибавлении органического вещества скорость уменьшалась.

Влияние белковых соединений на водопрочность почвенной структуры

В ту же дерново-подзолистую почву вводились соединения типа желатины. Приводим полученные результаты:

Количество желатины, % от веса образца почвы	Количество водопорных агрегатов крупнее 0.25 мм, %
0 05	14.5
0 1	17 1
0.5	58.4
1 0	85.8
3 0	85.0
5.0	95.0

Как видно из этих данных, введение желатины в количестве 1% улучшает водопрочность почвенных агрегатов. Еще меньше требуется для получения высокой водопрочности внесения смоляных клеев, представляющих собою по преимуществу абиеиновокислый натрий. Более подробные сведения о нем будут даны ниже. Приводим результаты опытов с этим веществом и с той же почвой:

Количество смоляного клея, % от веса образца почвы	Количество водопорных агрегатов крупнее 0.25 мм, %
0	3.8
0.001	3.4
0.005	9 7
0 01	7 9
0.05	49 7
0.1	88.0
0.2	95.0
0.3	98 2
0.5	98 3
1.0	99 0

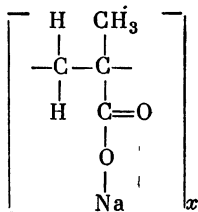
Эти данные говорят о том, что для получения эффекта водопрочности, аналогичного с действием желатины, смоляных клеев требуется в 10 раз меньше.

Сравнивая все приведенные данные, мы видим, что взаимодействие этих веществ с почвой носит сходный характер. Указанные вещества реагировали с одной и той же поверхностью. Количество потребного материала для мономолекулярного покрытия поверхности будет зависеть, с одной стороны, от размеров молекул клеящих веществ, с другой — от их дисперсности.

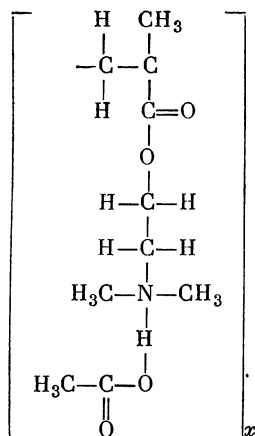
Для получения высоких показателей водопрочности почвенной структуры необходимо наличие в почве не менее 1% гуминовой кислоты; белковых веществ типа желатины требуется меньше. Для органических же веществ с меньшим молекулярным весом эта доза значительно снижается.

Крилиумы и их влияние на водопрочность структуры

Слово «крилиум» является собирательным названием многих клеящих полимеризующихся веществ, получаемых из метакриловой и акриловой кислот. Акриловая кислота найдена акад. Шмуком (1951) в составе почвенного гумуса. Некоторые исследователи находили в почвенном гумусе и абиетиновую кислоту. Американская фирма «Монсанто» первоначально выпустила две марки крилиумов — CRD 186 и CRD 189, — описанных в журнале «Soil Science» № 6 за 1952 г. CRD 189 назван натриевой солью полиакрилонитрила (HPAN), CRD 186 назван карбоксилированным полимером (VAMA). В качестве примера таких соединений приводим структурные формулы полиметакрилата как типичного полианиона:



и гидроацетат поли- β -деметиламиноэтилметакрилата как типичного катиона:



Ряд других фирм выпустил марки под различным названием: «полиак», «флуффиум», «локсар» и др. Наиболее изучен крилиум фирмы «Monsanto Chemical Co». Это воднорастворимые, гидрофильные полимерные электролиты с высоким молекулярным весом. CRD 186 содержит кальций, а CRD 189 — натрий; в сухом состоянии они представляют собою желтый и беловато-серый порошки, при увлажнении превращающиеся в желатинообразную массу. В табл. 39 приводятся физико-химические свойства крилиумов.

Зависимость водопрочности почвы от количества введенных крилиумов характеризуют следующие данные, полученные для пылевато-глинистой почвы Майми (Miami) (Hedrick a. Mowry, 1952):

Количество внесенных крилиумов, % к весу образца почвы		Количество водопрочных агрегатов крупнее 0.25 мм, %	
CRD186	{ 0.1	96.0	
	{ 0.05	84.0	
	{ 0.02	70.0	
	{ 0.01	50.0	
CRD189	{ 0.1	92.0	
	{ 0.05	72.0	
	{ 0.02	42.0	
	{ 0.01	16.0	

Физико-химические свойства крилиумов

	Название марки	
	CRD186	CRD189
Скорость растворения в воде . . .	Быстро	Быстро
Устойчивость к кислотам	Медленно желатинируется	Осаждается
В избытке ионов Ca^{++} , Al^{++}	Осаждается	Осаждается
Действие формальдегида	Нет	Желатинируется
Вязкость 1%-го водного раствора в пузах по Брутфильду	1.2	1.7
рН при концентрации { 0 1% . . .	5.4	10.4
	4.9	11.4
Средняя степень полимеризации . .	15000	—

Как видно из приводимых данных, структурообразующее действие крилиумов высокое и приближается по количественному эффекту к смоляным клеям. В последние годы фирма «Monsanto Chemical Co» выпустила эти препараты под другими марками: VAMA (винилацетат малеиновой кислоты) и HPAN (гидролизированный полиакрилонитрил), сходные с вышеуказанными по структурообразующему действию на почвы.

О типах водопрочного склеивания

Рассмотренные выше клеящие вещества по воздействию их на физические свойства почвы можно разделить на две группы: на вещества, не изменяющие гидрофильность почвы после ее проклеивания, и вещества, изменяющие ее, т. е. понижающие гидрофильность почвы. В первом случае в просвет почвенных капилляров обращены гидрофильные концы молекул, во втором случае — гидрофобные. Первые проявляют себя не только как пленкообразующие вещества, занимающие места на поверхности частицы, но и как клеящие вещества. Иначе говоря, введение их в почву увеличивает механическую

прочность почвы на разрыв и сжатие. Вторые вещества действуют на почву только как пленкообразователи. Они защищают места слипания частиц от размывания водой, образуя на них гидрофобную пленку. Но если частицы не слиплись, то эти вещества не будут способствовать их слипанию, а наоборот, образуя на частицах гидрофобную пленку, они их разъединяют. Поэтому почва, проклеенная этими веществами, уменьшает ме-

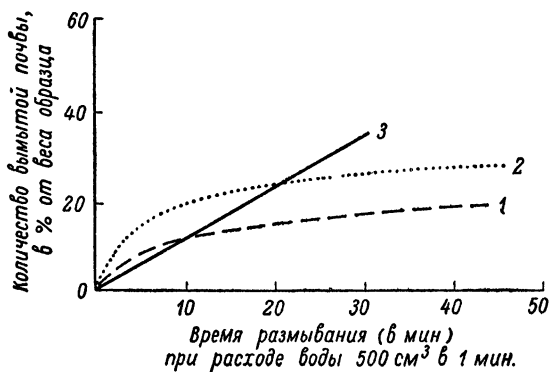


Рис. 39. Типы водопрочности.

1, 2 — гуматный, 3 — гидрофобный. 1 — обыкновенный глинистый чернозем; 2 — слабопозволистая тяжелолуглинистая почва; 3 — почва та же, что и 2, но проклеенная смоляным клеем.

ханическую прочность. Агрегаты, образованные при помощи этих веществ, не размываются в воде, так как вода не смачивает их поверхность. Однако в виду пестроты условий в почве защитить всю свободную поверхность от смачивания небольшими дозами вводимых веществ в достаточной мере трудно, поэтому почвенные агрегаты, полученные при помощи этих веществ, в конце концов «промокают», но медленно, по типу капиллярного смачивания.

К первой группе веществ относятся все рассмотренные выше вещества углеводного типа (вискоза, ксилан), лигнины и гуминовые кислоты, а по уверениям американской печати — и крилиумы. Ко второй группе веществ относятся жирные кислоты, абиетиновые кислоты

и отчасти битумы. Отчасти потому, что они могут действовать и как клеи, повышая механическую прочность почвы, причем их клеящие свойства связаны с пластическими свойствами, зависящими главным образом от температуры среды. Сами битумы гидрофобны, но если их наносить в виде водной эмульсии, то они образуют пленку, проницаемую для воды. Агрегаты, полученные при помощи таких пленок, не будут резко изменять свои гидрофильные свойства.

Первая группа веществ образует тип водопрочности, который нами назван гуматным или гидрофильным, вторая группа веществ образует смоляной или гидрофобный тип водопрочности. Рассмотрим характер размываемости агрегатов, полученных при помощи того или иного типа водопрочности.

На рис. 39 приводятся два типа размывания агрегатов из дерново-подзолистой суглинистой почвы и суглинистого чернозема и той же дерново-подзолистой почвы, растертой и проклеенной абиетиновокислым натрием (смоляным клеем).

О биологической стойкости клеящих веществ

Клеящие вещества, вводимые в почву, должны обладать определенной биологической устойчивостью. Если их существование мимолетно, то и эффект улучшения физических свойств почвы также мимолетен, а следовательно, и влияние клеящих веществ на урожай сельскохозяйственных растений также будет незначительным. Вопрос экономической целесообразности затрат на внесение клеящих веществ возникает в этом случае сам собой. Поэтому разработка лабораторной оценки биологической стойкости клеящих веществ необходима. Методика оценки биологической стойкости видна из следующего опыта. Подзолистая суглинистая почва пропитывалась различными клеящими веществами и ставилась при постоянной влажности 60—70% от полной влагоемкости в термостат, где держалась несколько недель при температуре 25—28° С. Водопрочность почвы, определенная до опыта и в течение опыта, служила показателем изменения биологической стойкости вносимых в почву органических клеящих веществ. Для испытания были взяты следую-

щие вещества: торфяной клей, битум, вискоза. Полученные результаты представлены на рис. 40. Из рисунка видно, что наиболее биологически устойчивыми являются торфяной клей и битум. Вискоза оказалась малоустойчивой. Уже через 12 дней после заложения опыта образованная ею водопрочная структура подзолистого почвы почти нацело разрушалась, причем внесение различных антисептиков в вискозу не улучшало ее стойкости. В полевых условиях, при меняющейся влажности и температуре, процесс распада будет протекать несколько медленнее, как это будет видно из дальнейшего изложения.

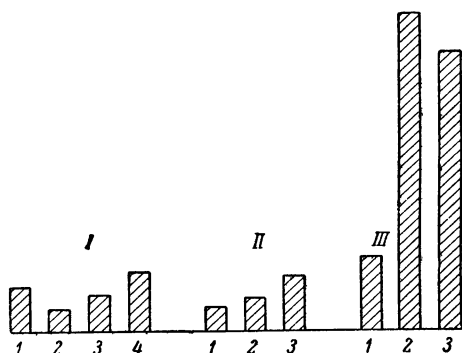


Рис. 40. Биологическая стойкость некоторых клеящих веществ. Количество пыли (% от веса образца).

I — торфяной клей 1%; II — нефтяной битум 0.5%; III — вискоза 0.1%. 1 — исходный образец; 2 — через 15 дней; 3 — через 30 дней, 4 — через 45 дней.

По американским данным, биологически устойчивыми являются и крилиумы. Лабораторные опыты с ними велись в течение тридцати двух месяцев при постоянном увлажнении и температуре 25° С. Биологическое разрушение в этом случае оказалось ничтожным.

Полевые опыты со структурообразующими веществами

Лабораторные опыты с клеящими веществами, придающими почвенным агрегатам водопрочность, начались в Агрофизическом институте в 1932 г. С этой целью

был испытан ряд клеящих веществ, как минеральных (силикат натрия), так и органических (вискоза, коллоид А и др.). Н. И. Саввиновым был предложен в качестве структурообразующего вещества гумат аммония, нами из гуматов был предложен гумат калия. Первые сообщения о лабораторных опытах со структурообразующими веществами были сделаны мною и Н. И. Саввиновым на Всесоюзной конференции по физике почв в 1934 г. Эти материалы были напечатаны Международным обществом почвоведов в трудах Международной ассоциации почвоведов (Физика почв в СССР, 1936). В дальнейшем первые сведения о полевых опытах с клеящими веществами опубликованы в монографии П. В. Вершинина и К. П. Константиновой «Физико-химические основы искусственной структуры почв» (Сельхозгиз, 1935). Полевые и лабораторные опыты публиковались в трудах Агрофизического института за 1935, 1936 гг. (вып. I и II), а также в виде отдельных статей Ф. Е. Колясева, П. В. Вершинина на английском языке, в качестве докладов на Версальской конференции по физике почв. Таким образом, о наших работах с искусственным структурообразованием было известно как в нашей научной литературе, так и в иностранной.

Полевые опыты, которые велись в Агрофизическом институте до Великой Отечественной войны, неизменно давали положительный эффект, т. е. во всех случаях урожайность сельскохозяйственных культур повышалась при внесении в почву структурообразующих веществ.

После окончания войны в США резко возрос интерес к структурообразующим веществам. Но, к сожалению, американские ученые, видимо, недостаточно знакомы с нашими печатными работами по искусственной структуре, изданными в СССР еще в 1936 г.

В опытах с искусственным структурообразованием, проводившихся двадцать с лишним лет тому назад в Агрофизическом институте, в качестве структурообразующих испытывались такие вещества:

1. **Заводской продукт вискозы.** Она вносилась в почву в жидком состоянии с разбавлением водой в 10 и 20 раз. Опытные делянки пропитывались вискозой до полной влагоемкости, по испарении избыточной влажности до влажности структурообразования обрабатыва-

лись граблями. Если на делянку необходимо было внести определенное количество вискозы в пересчете на сухое вещество, то почва на делянке пропитывалась несколько раз. После боронования производился посев той или иной сельскохозяйственной культуры. На следующий год определялось последствие этого вещества.

2. К о л л о и д А. Синтетический продукт, изготовленный в лаборатории структуры почв Агрофизического института. Представлял собой смесь белковых (коллагеновых) веществ (отходов клеевой промышленности) и сульфитных щелоков (отходов бумаго-целлюлозной промышленности). Эти вещества смешивались и нагревались до кипения, после чего высушивались, размалывались и вносились в почву в виде порошка. В этом клеящем веществе белковые молекулы стабилизировались лигносульфоновой кислотой и потому сухой продукт получался растворимым в воде. После пропитывания почвы и реакций обмена это клеящее лигно-белковое соединение переходило в нерастворимое состояние и придавало водопрочность почвенным агрегатам. Агрегирование почвы делянок с коллоидом А, так же как и с вискозой, производилось при влажности структурообразования граблями с длинными зубьями.

в) Т о р ф я н о й к л е й приготовлялся из торфа Шуваловского болота. Торф в воздушно-сухом состоянии измельчался и обрабатывался 1%-м раствором КОН при отношении сухого вещества торфа к воде, равном 1 : 10. Полученная масса кипятилась в течение часа. После охлаждения раствор сливался и применялся под названием торфяного клея. Данные по улучшению водопрочности структуры приводятся в табл. 40.

Как видно из данных этой таблицы, к концу вегетационного периода водопрочность на делянках, где были внесены клеящие вещества, уменьшилась так же, как и на контрольной делянке, но не сильно, и эффект от внесения клеящих веществ по-прежнему был ясно выражен.

В табл 41 показано содержание нитратов на делянках с клеящим веществом, причем в качестве контрольной делянки взята известкованная делянка с внесением полных (НРК) минеральных удобрений (Колясев, 1937). На делянках с клеящими веществами минеральные удо-

Таблица 40

Влияние различных структурообразующих веществ на водопрочность почвенной структуры

Вариант опыта	Количество агрегатов, %							Степень острук- турности, %
	больше 3 мм	3—2 мм	2—1 мм	1—0.5 мм	0.5—0.25 мм	сумма		
						больше 0.25 мм	меньше 0.25 мм	
3 VI 1934								
Контроль	11.6	5.8	13.5	12.7	3.8	47.4	52.6	0.9
Коллоид А 0.6 кг/м ² . .	31.4	6.2	10.5	10.8	2.9	61.8	38.2	1.6
Вискоза 0.4 кг/м ² . . .	45.7	4.6	8.5	6.3	2.6	67.7	32.3	2.1
Торфяной клей 0.4 кг/м ²	33.1	4.7	8.9	2.6	2.7	52.0	48.0	1.3
10 IX 1934								
Контроль	6.6	4.9	11.6	10.8	2.8	36.7	63.3	0.6
Коллоид А 0.6 кг/м ² . .	39.7	5.7	8.2	5.2	2.2	61.0	39.0	1.6
Вискоза 0.4 кг/м ² . . .	39.6	4.4	6.8	8.6	1.3	60.7	39.3	1.6
Торфяной клей 0.4 кг/м ²	26.9	4.1	9.3	6.3	3.1	49.7	50.3	1.0

Таблица 41

Содержание нитратов в нахотном слое (мг на 1 кг сухой почвы)

Вариант опыта	8 VI	20 VI	1 VII	13 VII	21 VII	2 VIII	10 VIII	20 VIII	4 IX	19 IX
Контроль — минеральные удобрения по известкованному фону	2.5	5.9	27.3	14.6	19.2	28.5	29.8	29.3	10.0	26.4
Коллоид А . . .	2.2	—	84.7	117.9	132.8	75.0	102.1	76.3	102.1	120.0
Вискоза 0.4 кг/м ²	Следы	—	33.2	16.9	22.1	21.6	26.8	35.9	28.2	50.6
Торфяной клей 0.4 кг/м ² . . .	6.1	16.4	32.7	69.1	54.2	43.3	54.2	56.5	62.4	47.5

брения не вносились. Из приведенных данных видно, что на фоне структурообразующих удобрений общее содержание нитратов значительно выше, чем на удобренном фоне, причем разница сохраняется до конца вегетационного периода.

В табл. 42 приводится общее содержание микроорганизмов в почвах опытных делянок. Количество микроорганизмов определялось прямым подсчетом, по методу Виноградского, микробиологом И. П. Ланге-Поздеевой. Из каждой пробы приготавливалось по два препарата и подсчитывалось количество микроорганизмов в 100 полях зрения в каждом препарате. Урожай овса в указанных опытах показаны в табл. 43. Величина делянок — 40 м², повторность двукратная (Колясев, 1937).

Из приведенных опытов видно, что структурообразующие вещества значительно увеличивают урожайность сельскохозяйственных культур. Такие вещества, как вискоза, не содержат совсем минеральных питательных веществ. Тем не менее их действие на урожай велико, в особенности же последствие.

Отмечается, что структурообразующие вещества обладают значительным последствием, т. е. их действие связано с изменением микробиологической деятельности в почве. Создавая благоприятный физический режим, они содействуют усилению деятельности микробов, что приводит к накоплению в почве питательных веществ, к повышению урожая сельскохозяйственных растений.

На дерново-подзолистых почвах опыты с торфяным клеем проводились и другими лицами, как это указывается в табл. 44.

В 1938 г. на Цюрупинской опытной станции на южных маломощных супесчаных почвах Нижнеднепровья проведены опыты с торфяным клеем, полученным из торфяных отложений днепровских плавней, и битумной эмульсией. Культурой служила суданская трава. Полученные данные приводятся в табл. 45. На рис. 41 показаны снопы с делянок опыта.

Обширные опыты в Агрофизическом институте были произведены с гидрофобными клеящими веществами. В качестве примера рассмотрим опыты с так называемыми смоляными клеями.

Количество микроорганизмов (в млн) в 1 г почвы (по расчету на сухую почву)

Вариант опыта	1-я проба				2-я проба				3-я проба			
	общее количество микробов	кожовые формы	палочки	прочие микроорганизмы	общее количество микробов	кожовые формы	палочки	прочие микроорганизмы	общее количество микробов	кожовые формы	палочки	прочие микроорганизмы
Контроль — пар	4225	1700	1725	800	1800	575	950	275	1175	575	475	125
Коллоид А 0.6 кг/м ² . . .	5850	2350	3100	400	1225	475	600	150	575	250	225	100
Вискоза 0.4 кг/м ²	4975	2700	207	205	1775	700	500	575	1400	725	525	150
Торфяной клей 0.4 кг/м ² .	—	—	—	—	—	—	—	—	1900	1175	600	125
Контроль — овес	3900	2120	1430	350	1550	450	875	225	1275	700	475	100
Коллоид А 0.6 кг/м ² . . .	4200	1875	2000	325	1275	425	625	225	950	375	500	75
Вискоза 0.4 кг/м ²	3950	1590	1590	770	1325	550	500	275	1425	375	350	700
Торфяной клей 0.4 кг/м ² .	—	—	—	—	—	—	—	—	1000	425	425	150

Таблица 43

Влияние различных структурообразующих веществ на урожай
овса (зерна)

Вариант опыта	1934 г. Действие			1935 г. Последствие		
	ц/га	прибавка		ц/га	прибавка	
		абсолютная	относительная		абсолютная	относительная
Контроль — без удобрения	14.42	0	0	9.03	0	0
Контроль — минеральные удобрения НРК по известкованному фону	20.03	5.64	39.1	16.80	7.77	86.0
Коллоид А	25.50	11.08	86.8	19.62	10.59	117.2
Торфяной клей	23.79	9.37	64.9	20.16	11.13	123.2
Вискоза 0.4 кг/м ²	19.74	5.32	36.9	20.60	11.57	128.1
Вискоза 0.2 кг/м ²	19.62	5.20	36.1	21.51	12.48	138.1

Таблица 44

Влияние торфяного клея на урожай различных сельскохозяйственных культур в 1936 г.

Почвы	Культура	Вариант опыта	Урожай		Кем и где проводились опыты
			ц/га	%	
Слабощелочные тяжелосуглинистые рендзины	Картофель	Контроль	221.0	100	П. А. Дроздецкий, на картофельной опытной станции Кикерино Ленинградской области К. Н. Роднов, в колхозе им 14 Октября Батецкого района Ленинградской области
		Торфяной клей 0.5% от веса пахотного слоя почвы	295.0	133.5	
Дерново-слабоподзолистые почвы на моренном суглинке	Пшеница	Контроль	8.8	100	
		Торфяной клей 0.5% от веса пахотного слоя почвы	10.6	120.4	
	Картофель	Контроль	208.0	100	
		Торфяной клей 0.5% от веса пахотного слоя почвы	249.8	120.1	

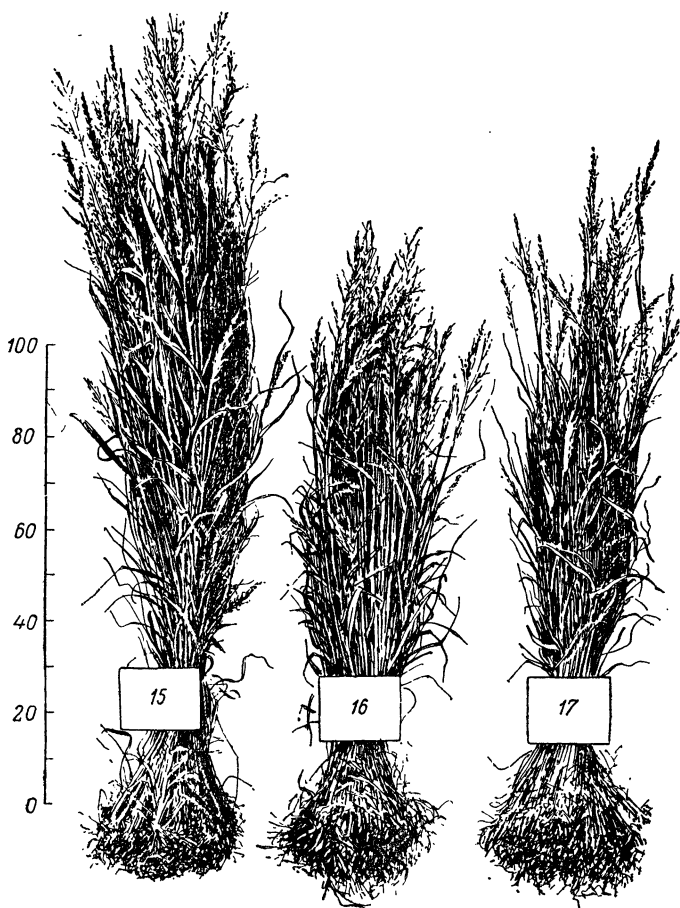


Рис. 41. Урожай суданской травы на делянках с торфяным клеем и битумной эмульсией.

15 — торфяной клей; 16 — контроль; 17 — битумная эмульсия.

Влияние торфяного клея и битумной эмульсии на урожай суданской травы

Наименование опыта	Собрано сена в пересчете на гектар, ц		Собрано за 2 укоса, ц/га	Прибавка сена, ц/га
	1-й укос	2-й укос		
Контроль	23.0	28.12	51.12	0
Торфяной клей 1.5 кг/м ² . . .	53.33	73.27	126.60	75.48
Битумная эмульсия 0.3 кг/м ²	42.74	45.47	88.21	37.09

Смоляной клей получается из технической канифоли, омыленной щелочью. Канифоль, как известно, состоит из комплекса смоляных кислот со значительным преобладанием среди них абиеиновой кислоты ($C_{20}H_{30}O_2$), влияние которой на водопрочность почвенной структуры показано на стр. 153.

Из этих данных следует, что от 0.1 до 0.2% смоляного клея от веса почвы переводит распыленную (растертую в ступке) дерново-подзолистую суглинистую почву из бесструктурного состояния в такое структурное состояние, какое мы наблюдаем у лучших целинных черноземных почв.

В силу своей гидрофобности смоляной клей влияет и на другие физические свойства почвы, например уменьшает ее влагоемкость. Так, при введении смоляного клея в дерново-подзолистую суглинистую почву в количествах 0.01, 0.1, 0.5% к весу почвы полная влагоемкость почвы снизилась с 76.5 до 71.9, 69.6, 60.7%.

Скорость капиллярного поднятия воды в почве в проклеенном слое также изменяется. Следовательно, смоляной клей в больших дозах увеличивает водопрочность почвы, уменьшает скорость капиллярного движения, обогащает почву воздухом (за счет уменьшения гидрофильности). Все это ведет к улучшению физического режима дерново-подзолистых суглинистых почв, накоплению на некоторой глубине от поверхности влаги в почве. Одновременно в связи с улучшением физического

Количество микроорганизмов (в млн) в 1 г почвы

Вариант опыта	1 VII				20 VII				9 VIII			
	общее количество микроорганизмов	конковидные формы	палочки	прочие	общее количество микроорганизмов	конковидные формы	палочки	прочие	общее количество микроорганизмов	конковидные формы	палочки	прочие
Фон НРК	1570	1170	356	44	1738	1260	412	66	1068	882	166	20
Фон + 0.005% смоляного клея	2736	2130	534	72	2292	1572	672	48	1548	1338	186	24
Фон + 0.25% смоляного клея	4002	3006	876	120	1698	1290	336	72	1152	900	228	24
Фон + компенсация щелочью за 0.25% смоляного клея	1266	880	336	50	2502	1938	492	72	1272	1092	126	54

режима в почве улучшается микробиологическая деятельность в ней, что видно из приводимых в табл. 46 данных Ланге-Поздеевой об общем содержании микроорганизмов на проклеенных делянках (прямой счет микроорганизмов по Виноградскому, на глубине 0—10 см). Данные получены из полевых опытов в 1938 г. в г. Пушкине на дерново-подзолистых суглинистых почвах. Рассмотрение этих данных показывает, что смоляной клей увеличивает в почве общее количество микроорганизмов. Помимо этого, он влияет на подвижность фосфорной кислоты в почве.

В табл. 47 приводятся результаты лабораторных исследований по влиянию доз смоляного клея на подвижность P_2O_5 . Смоляной клей в форме порошка перемешивался с удобрениями и в таком виде вносился в почву, которая увлажнялась до половинной влагоемкости. Удобрения вносились из расчета $N_{120} P_{120} K_{120}$ на 1 га.

Данные табл. 47 показывают, что внесенные в почву удобрения из расчета 15 мг P_2O_5 на 100 г почвы удерживаются различными почвами по-разному. Подзолистая почва № 1, с малым количеством P_2O_5 , удержала 33% внесенного фосфорнокислого удобрения, подзолистая почва № 2 — 37%, суглинистый краснозем — 60%, деградированный чернозем — 17%. Введение в почву смоляного клея увеличило количество подвижной фосфорной кислоты. Подзолистая почва № 1 и деградированный чернозем полностью отдали внесенный P_2O_5 . Подзолистая почва № 2 снизила количество связанного P_2O_5 с 37 до 20%. Краснозем — с 60 до 20%. В двух случаях из четырех наилучший эффект показали самые малые дозы смоляного клея.

В соответствии с полученными агрохимическими данными повышается и получаемый урожай. В табл. 48 показано влияние на урожай ячменя и овса смоляного клея, приготовленного с едким калием. Величина деланки 40 м². Повторность опыта 4-кратная. Почва дерново-подзолистая, суглинистая, на моренном суглинке. Опыты проводил Я. А. Ковалев в 1937 и 1938 гг. Действие изучалось на ячмене, последствие — на овсе. Обработка была одинаковая как на контроле, так и на проклеенных делянках.

Влияние смоляного клея на подвижность P_2O_5 в почве

Вариант опыта	Количество P_2O_5 , мг на 100 г почвы, по Кирсанову			
	дерново-подзолистая суглинистая почва из г. Пушкина		суглинистый краснозем из Озургет Груз. ССР	деградированный суглинистый чернозем из Воронежской области
	№ 1	№ 2		
Исходная почва	7.5	13.0	20.0	15.0
Та же почва + $N_{120}P_{120}K_{120}$ (фон) . .	17.5	22.5	26.0	27.5
Фон + 0.005% смоляного клея	22.5	23.0	26.0	30.0
Фон + 0.05% смоляного клея	22.5	24.0	26.0	—
Фон + 0.1% смоляного клея	20.0	25.0	27.5	—
Фон + 0.25% смоляного клея	21.0	25.0	32.0	—
Фон + 0.5% смоляного клея	19.0	25.0	32.0	—

Таблица 48

Влияние смоляного клея на урожай овса и ячменя

Вариант опыта		Средний вес из четырех повторностей с делянки, кг			Урожай в пересчете на 1 га, ц	
		сухая масса	зерно	солома	сухая масса	зерно
Контроль	{ д	9.03	3.31	8.72	22.6	8.3
	{ п	15.80	5.80	10.00	39.5	14.5
$N_{120}P_{120} + KOH_{320}$	{ д	24.50	7.43	17.08	61.2	18.6
	{ п	15.40	6.40	9.00	38.5	16.0
$N_{120}P_{120} + \text{клей}_{1930}$	{ д	29.90	12.03	17.90	74.7	30.0
	{ п	17.40	7.20	10.20	43.5	23.0

Примечание. Буквой «д» обозначено действие, буквой «п» — последствие.

Как видно из табл. 48, смоляной клей резко увеличил урожай ячменя в 1937 г. и изменил соотношение зерна к соломе в благоприятную сторону. В 1938 г., несмотря на значительный урожай по клеевым делянкам в предыдущем году, эффект, в особенности на зерне, еще заметен.

В табл. 49 приведены результаты аналогичных опытов с картофелем. Все условия опыта тождественны с указанными выше. Данные показывают, что смоляной клей существенно влияет и на урожай картофеля.

Т а б л и ц а 49

Влияние смоляного клея на урожай картофеля сорта Эпикур в 1937 г.

Вариант опыта	Средний вес клубней из четырех повторностей с делянки, кг	Урожай картофеля в пересчете на 1 га, ц	Прибавка, %
Контроль — без удобрения	53.9	135.0	0
N ₁₂₀ P ₁₂₀ + КОН ₃₂₀	80.0	200.0	46.0
N ₁₂₀ P ₁₂₀ + клей ₁₉₃₀	97.7	244.0	78.0

Т а б л и ц а 50

Влияние смоляного клея на урожай овса и помидор Чудо рынка

Вариант опыта		Средний вес плодов и зерна с делянки, кг	Средний вес плодов, г	Урожай плодов и зерна в пересчете на 1 га, ц	Прибавка, %
Контроль — без удобрения	{ д . .	21.6	27.5	108.0	0
	{ п . .	4.2	—	21.0	0
N ₁₂₀ P ₁₂₀ + КОН ₃₂₀	{ д . .	48.5	38.8	243.0	124.5
	{ п . .	4.85	—	24.25	15.0
N ₁₂₀ P ₁₂₀ + клей ₁₉₃₀	{ д . .	67.7	41.0	339.0	213.4
	{ п . .	5.8	—	29.0	38.0

П р и м е ч а н и е. Буквой «д» обозначено действие (помидоры), буквой «п» — последствие (овес).

В табл. 50 содержатся данные аналогичных опытов с помидорами в 1937 г. и характеризуется последствие на овес в 1938 г. Отличие от предыдущих опытов заключается только в величине делянки: здесь она взята 20 м². Повторность опыта 4-кратная. Сорт помидор Чудо рынка. Эти данные также говорят о положительном действии смоляного клея на величину и качество урожая помидор и о проявлении значительного эффекта последствия.

В 1938 г. опыты с смоляным клеем были продолжены с целью установить действие доз смоляного клея на урожай. Опыты производились там же, что и в 1937 г., т. е. на опытном участке сельскохозяйственного института. Для исследования был взят ячмень. Повторность опыта 4-кратная. Площадь делянки 40 м². Опыты проводились А. Я. Ковалевым. Результаты приведены в табл. 51. Они свидетельствуют о том, что наибольший урожай был получен при дозе смоляного клея, которую можно назвать малой. Она равняется 200 кг на 1 га, или 0.01 % от веса почвы на глубине 20 см, или 0.02 % на глубине 10 см.

Т а б л и ц а 51

Влияние различных доз смоляного клея на урожай ячменя

Вариант опыта	Средний вес из четырех повторностей с делянки, кг		Урожай в пересчете на 1 га, ц		Прибавка, %		Отношение веса зерна к весу соломы
	зерно	солома	зерно	солома	зерно	солома	
Контроль — без удобрения	10.8	10.7	27.0	26.8	0	0	1 : 1
Контроль — N ₇₅ P ₇₅ K ₇₅	12.8	14.6	32.0	38.5	18.7	36.4	1 : 1.1
N ₇₅ P ₇₅ K ₇₅ + клей ₁₀	13.3	15.8	34.3	39.5	23.1	47.6	1 : 1.2
N ₇₅ P ₇₅ K ₇₅ + клей ₅₀	14.1	17.1	35.3	42.8	31.8	60.0	1 : 1.2
N ₇₅ P ₇₅ K ₇₅ + клей ₂₀₀	14.8	16.0	37.0	40.0	37.0	48.1	1 : 1.1
N ₇₅ P ₇₅ K ₇₅ + клей ₁₀₀₀	14.8	19.1	37.0	47.8	37.0	76.8	1 : 1.3
N ₇₅ P ₇₅ K ₇₅ + клей ₂₅₀₀	14.2	17.6	35.5	44.0	31.5	61.5	1 : 1.2

Опыты со смоляными клеями в 1938 г. были значительно расширены. В табл. 52 приводятся данные по действию клея на урожай арахиса, полученные в 1938 г.

на Цюрупинской опытной станции. Почва — супесчаный чернозем. Культура — арахис, сорт Валенсия. Величина делянки 40 м². Повторность опыта 3-кратная. Опыты проведены агрохимиком Г. А. Чушенко.

Как видно из табл. 52, внесение смоляного клея в малых дозах существенно влияет на повышение урожая орехов арахиса.

Т а б л и ц а 52

Влияние различных доз смоляного клея на урожай арахиса

Вариант опыта	Средний вес орехов арахиса 1-го сорта с делянки, кг	Урожай орехов в пересчете на 1 га, ц	Прибавка	
			ц/га	%
N ₄₅ P ₉₀ K ₉₀ + клей ₅₀ . .	2.3	5.75	1.28	28.6
Контроль — N ₄₅ P ₉₀ K ₉₀ .	2.02	4.47	0	0
N ₄₅ P ₉₀ K ₉₀ + клей ₁₀₀ . .	3.6	9.00	2.50	38.5
Контроль — N ₄₅ P ₉₀ K ₉₀ .	2.6	6.50	0	0

Т а б л и ц а 53

Влияние смоляного клея на урожай овса в производственных условиях

Вариант опыта	Учетная площадь, га	Вес общей массы, ц/га	Урожай зерна, ц/га	Прибавка	
				ц/га	%
Урожай (средний) в колхозе	30.0	—	9.0	0	0
Контроль — удобренная NPK	0.5	50.90	20.88	11.88	132
Контроль + клей ₁₀₀	0.5	55.32	23.72	14.22	164

В табл. 53 приводятся данные по влиянию смоляного клея на урожай овса, полученные нами в колхозе Новое Косково Лужского района Ленинградской области на слабоподзолистой суглинистой почве. Размер делянок 0.5 га. Урожай определялся взвешиванием общей массы и зерна, полученных с учетных участков колхоза. Опыт проводил агроном Чебыкин.

Таким образом, полевые опыты, проведенные со смоляным клеем на разных культурах и на нескольких почвах в течение двух лет, полностью подтвердили положительное действие малых доз этого клея на урожай сельскохозяйственных растений.

В нескольких словах необходимо сказать о влиянии крилиумов на урожай сельскохозяйственных растений. Следует отметить, что обстоятельных данных по этому вопросу в литературе нет, но почти все авторы отмечают благоприятное влияние крилиумов на рост и развитие растений: отсутствие токсичности для животных и растений, более дружное появление всходов и повышение урожая сельскохозяйственных культур. Все это объясняется улучшением физических условий в почве в связи с оструктурированием. При этом наблюдается отсутствие корки, улучшенная аэрация, повышается влагоемкость и пр. Но не все растения одинаково отзываются на внесение крилиумов в почву. Такие растения, как кукуруза, овес, редис, морковь, дали повышение урожая после внесения крилиумов. Такие же, как репа, картофель, свекла и др., реагировали безразлично на крилиумы, не повышая и не уменьшая урожая от внесения их в почву. Многие фирмы США и других странах выпускают эти вещества, как уже указывалось, под разными названиями. Причем рекламы о них пестрят самыми заманчивыми обещаниями, например 1 фунт локсара (канадский крилиум) будто бы оказывает на структуру почвы такое же влияние, как 1000 фунтов любых гумусовых веществ; глыбистая глина якобы за 24 часа превращается в почву с мелкокомковатой структурой; от внесения локсара уменьшается эрозия, обновляются выпаханые почвы и пр.

Относя многое на счет рекламы, все же необходимо отметить, что получение структурообразующих веществ в США поставлено достаточно высоко. Структурообразующие вещества еще дороги (фирма «Monsanto Chemical Co» выпустила пятифунтовые коробки по 6.95 доллара за коробку), но тем не менее они раскупаются.

В Советском Союзе структурообразующие вещества могут найти применение в первую очередь на слабо-структурных и легко заплывающих дерново-подзолистых и сероземных почвах при использовании их под высоко-

ценные (овощные, технические) культуры. Необходимо ускорить проведение широких производственных опытов на этих почвах для изучения агротехнической эффективности и экономической оценки действия структурообразующих веществ.

До недавнего времени агрономические и почвоведческое общественное мнение, дезориентированное догматическими положениями об исключительно биологическом пути образования водопрочной почвенной структуры, во многих случаях отрицательно относилось к самой идее укрепления водопрочности почвенной структуры путем внесения в почву искусственных структурообразователей. Однако в последние годы намечаются изменения взглядов на искусственное структурообразование. Акад. И. В. Тюрин в своем докладе на Всесоюзном совещании почвоведов в апреле 1954 г. высказался за поддержку работ по искусственному структурообразованию. Указав, что использование для этих целей растворов гуматов из природных торфов еще не дало практически приемлемых результатов, он высказал надежду, что в дальнейшем успехи могут быть. «Если бы это случилось, т. е. был найден экономически выгодный способ искусственного структурообразования, значительно более совершенный, чем структурообразование под влиянием многолетних трав, — в нашей агротехнике произошел бы крупный переворот, последствия которого, вероятно, могли бы оказаться сравнимыми с переворотом, вызванным в свое время в Западной Европе широким применением минеральных удобрений».

В решениях того же совещания записано: «Совещание считает целесообразным развитие научно-исследовательской работы по разработке методов создания искусственной агрономически ценной структуры».

Приводимые выше примеры говорят лишь о благотворном влиянии структурообразующих веществ на почвенные микроорганизмы. Структурообразующие вещества, изменяющие физические свойства почвы, ее водный, тепловой и воздушный режим, с полным основанием можно назвать физическими удобрениями, так как они во многих случаях не содержат пищи для растений и повышение урожая сельскохозяйственных растений идет путем комплексного воздействия на почву в отно-

шении улучшения физического режима, повышения микробиологической деятельности, накопления доступных питательных веществ для растений.

Из рассмотренных структурообразующих веществ по простоте изготовления и обширности для этого сырьевой базы первое место надо отвести торфяному клею. Производство его можно организовать на базе местных запасов торфа и на неиспользуемых остатках промышленных торфоразработок. При промышленных методах производства торфяного клея его возможно будет изготавливать и в виде порошка или мелких гранул в смеси с суперфосфатом. В соединении с травопольными севооборотами на подзолистых почвах торфяной клей позволит в короткое время перевести эти почвы из бесструктурных в структурные.

Абиетиновые структурообразующие клеи при изготовлении их из отходов соответствующих производств с успехом могут быть применены в различных условиях и под разные сельскохозяйственные культуры. Они в состоянии значительно повышать их урожайность даже при высоком удобрительном фоне, в особенности на подзолистых почвах.

В дальнейшем по мере выяснения экономической целесообразности в практике искусственного структурообразования могут найти себе применение и другие оструктурирующие почву вещества, производство которых в этом случае должно быть налажено в промышленном масштабе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В предыдущих главах мы рассмотрели понятие о почвенной структуре, законы слипания почвенных частиц, крошение слитной почвенной массы на макроструктурные отдельности, образование в почве микроструктуры, возникновение у почвенных агрегатов водопрочных свойств, а также приемы восстановления и накопления почвенной структуры в полевых условиях. В заключение подведем краткие итоги сказанному.

Почвенная макроструктура образуется иначе, чем микроструктура, и пути ее регулирования в почве тоже иные. Если для улучшения микроструктуры во многих случаях достаточно внесения в почву извести или гипса, то для регулирования почвенной макроструктуры этого недостаточно.

Пути изучения почвенной структуры, проложенные классиками в прошлом веке, были продолжены В. Р. Вильямсом в учении о травопольной системе земледелия и К. К. Гедройцем в учении о почвенном поглощающем комплексе. Для создания и улучшения агрономически ценной структуры на больших площадях была предложена культура многолетних травосмесей на полях. Это пока единственный и правильный прием при достаточно высоких урожаях многолетних трав.

Во второй четверти XX в. накопились научные материалы, позволяющие расширить пути улучшения почвенной структуры. Так, было уточнено представление о структурообразующем действии травянистых растений, в том числе и однолетних. Ряд исследователей показал, что и однолетние полевые культуры, хотя и в меньшей

степени, но тоже улучшают почвенную структуру. Лишь непрерывная обработка в условиях парования приводит к полному распылению почвы. Эти выводы уже дают возможность улучшать структуру почвы на полях и культурой однолетних трав, как это показал Т. С. Мальцев, если по местным условиям эти травы дают более высокие урожаи, чем многолетние травосмеси.

Далее, на основании уже накопившихся исследований представляется возможным более правильно трактовать физическую сущность процесса образования почвенной микро- и макроструктуры.

Почвенные частицы или микроагрегаты из них, прежде чем образовать комки, должны слипнуться в общую массу. В почвах суглинистых и глинистых для этого имеются все необходимые условия, требуется лишь наличие некоторой плотности и благоприятной влажности. На почвах песчаных и супесчаных для осуществления постоянного слипания требуется дополнительное внесение клеящих веществ.

Слипнувшиеся в общую массу частицы почвы должны быть раздроблены на агрегаты. Это происходит при целом ряде явлений в почве: попеременном высушивании и намачивании почвы, неоднократном замерзании и оттаивании, под влиянием деятельности животных, населяющих почву, под действием корневых систем растений, в особенности травянистых, и при воздействии на почву почвообрабатывающих орудий. В настоящее время уже доказано, что при благоприятной влажности зубowymi орудиями можно крошить почву на агрономически ценные по размерам агрегаты с той водопрочностью, какой обладает в данное время почва.

Более трудной является задача создания в почве свойств водопрочности, когда они в ней отсутствуют. При культуре многолетних трав крошение почвы на агрегаты и возникновение в них свойств водопрочности протекает почти одновременно. Разлагающиеся в условиях недостатка кислорода корневые остатки дают материал для пропитывания комков органическими веществами, придающими им водопрочность. Но этот процесс можно и расчленить, если это необходимо, и производить раздельно внесение органических веществ, придающих почве водопрочность, и крошение почвы на отдельные.

В качестве органических веществ, придающих почвенным комкам водопрочность, можно использовать навоз, торф и различные органические компосты, если создавать в почве такие условия, при которых образуются вещества, повышающие водопрочность почвенной структуры. Возможно, что в недалеком будущем это будет достигнуто.

Нам кажется, что утверждения некоторых микробиологов о том, что урожайность сельскохозяйственных растений повышается лишь при условии разрушения водопрочной почвенной структуры, не совсем правильны. Сложность строения органического вещества в почве и многообразие его форм позволяют накапливать питательные вещества растений и при сохранении клеящих водопрочных веществ, так как последние в очень малой степени подвергаются микробиологическому распаду. В настоящее время уже доказана принципиальная возможность внесения в почву органических веществ, прямо вызывающих в почве явления водопрочности. Соединением внесения структурообразующих веществ с условиями благоприятной влажности крошения почвы на агрегаты можно структурообразование почвы сделать более управляемым приемом агротехники. Но для этого вопросам искусственного структурообразования должно быть оказано больше внимания, чем это делалось до сих пор. Изготовление искусственных структурообразующих веществ может развиваться в двух направлениях. По пути изготовления «чистых» структурообразующих веществ и по пути изготовления комбинированных физико-химических органо-минеральных удобрений, содержащих пищу для растений и одновременно улучшающих почвенную структуру.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- А д е р и х и н П. Г. 1949. Влияние высушивания почвы на ее состав и свойства. Тр. юбилейной сессии, посвященной столетию со дня рождения В. В. Докучаева, Изд. АН СССР.
- А н д р и а н о в П. И. 1936. Температура замерзания грунтов. Комиссия по изучению вечной мерзлоты, вып. 1, Изд. АН СССР.

- А н д р и а н о в П. И. 1937. Коэффициент расширения грунтов при замерзании. Комиссия по изучению вечной мерзлоты, вып. 1, Изд. АН СССР.
- А н д р и а н о в П. И. 1946. Связанная вода почв и грунтов. Тр. Инст. мерзлотовед. АН СССР, т. III.
- А н т и п о в - К а р а т а е в И. Н. 1930. Опыты применения фильтрационного метода к изучению факторов дисперсности почв. Тр. Ленингр. лабор. Инст. агропочвовед., нов. серия, вып. II.
- А н т и п о в - К а р а т а е в И. Н. 1932. Пермитоидный характер гуминовых кислот. Тр. Почв. инст. АН СССР, т. XIV.
- А н т и п о в - К а р а т а е в И. Н. 1949. Учение В. Р. Вильямса о структуре почвы и современное состояние этой проблемы в науке. Сб. «Памяти акад. В. Р. Вильямса», Изд. АН СССР.
- А н т и п о в - К а р а т а е в И. Н., В. В. К е л л е р м а н и Я. В. Х а н. 1948. О почвенном агрегате и методах его исследования. Изд. АН СССР.
- А с т а п о в С. В. 1947. Практикум по мелиоративному почвоведению. Сельхозгиз.
- Б а р а к о в П. Ф. 1903. Курс общего земледелия, ч. I. СПб.
- Б а р с у к о в Л. Н. и З. Н. Б а х а р е в а. 1950. Роль мороза в годичном цикле структурного состояния почвы. Почвоведение, № 1.
- Б е л ь ч и к о в а Н. П. 1951. Некоторые закономерности содержания, состава гумуса и свойств гумусовых веществ в важнейших группах почв Союза ССР. Тр. Почв. инст. АН СССР, т. XXXVIII.
- Б о р о в и к - Р о м а н о в а Т. Ф. 1937. Переохлаждение водяных капель. Тр. Ленингр. инст. эксперим. метеор., вып. I.
- В е р ш и н и н П. В. 1938. Метод определения размываемости почв при помощи объективного нефелометра. Докл. ВАСХНИЛ, № 8.
- В е р ш и н и н П. В. 1948а. Механизм формирования макроструктуры почвы. Сб. трудов по агроном. физике, вып. 4.
- В е р ш и н и н П. В. 1948б. О некоторых природных законах, важных при обработке почв. Докл. ВАСХНИЛ, № 4.
- В е р ш и н и н П. В., Б. В. Д е р я г и н и Н. В. К и р и л е н к о. 1949. О незамерзающей воде в почве. Докл. АН СССР, Серия геол.-географ., т. XIII, № 2.
- В е р ш и н и н П. В. и В. П. К о н с т а н т и н о в а. 1935. Физико-химические основы искусственной структуры почв. Сельхозгиз.
- В е р ш и н и н П. В. и В. П. К о н с т а н т и н о в а. 1937. Явления водоустойчивости и сопротивления сжатию почвенных образцов в зависимости от влажности затворения. Почвоведение, № 2.
- В е р ш и н и н П. В., В. П. К о н с т а н т и н о в а, Н. В. К и р и л е н к о. 1941. Изучение явлений склеивания в процессах структурообразования в почве. Вестн. с.-х. науки, удобр., агротехн. и агропочвовед., вып. 1.
- В е р ш и н и н П. В., Н. П. П о я с о в. 1952. Метод исследования почвенного воздуха. Сб. трудов по агроном. физике, вып. 5.

- Вершинин П. В., И. Б. Ревут. 1953. Структура и физические условия в почвах Каменной степи. Сб. трудов по агроном. физике, вып. 6.
- Виленский Д. Г. 1945. Агрегация почв, ее теория и практическое приложение. Изд. АН СССР.
- Вильямс В. Р. 1935. Прочность и связность структуры почв. Почвоведение, № 5/6 (или: Собрание сочинений, т. VII, стр. 160).
- Вильямс В. Р. 1945. Почвоведение. Сельхозгиз.
- Вильямс В. Р. 1949. Общее земледелие. Собрание сочинений, т. III, Сельхозгиз.
- Вольни Э. 1896. Физические свойства почвы. Пер. А. А. Бычихина (с франц.). Одесса.
- Высоцкий Г. Н. 1899. Структура почвы и грунтов. Почвоведение, № 2.
- Высоцкий Г. Н. 1900. Дождевой червь. Полн. энциклоп. русск. сельск. хоз., т. II, изд. Девриена.
- Высоцкий Г. Н. 1933. Общие положения об агрономическом значении почвенной структуры. Матер. по выяснению вопроса о структуре почв. Тр. Международной ассоциации почвоведов, т. I.
- Гедройц К. К. 1926. К вопросу о почвенной структуре и ее сельскохозяйственном значении. Изв. Инст. опытной агрономии, т. IV, № 3.
- Гедройц К. К. 1929. Учение о поглотительной способности почв. Изд. «Новая Деревня».
- Гедройц К. К. 1932. Исследования потребности почв в известп. Химический анализ почвы. Сельхозгиз.
- Гедройц К. К. 1933. Положение вопроса о структуре почв. Тр. Международной ассоциации почвоведов, т. I.
- Гедройц К. К. 1940. Действие перекиси водорода на почву. Почвенный поглощающий комплекс, растение и урожай. Сельхозгиз.
- Гельцер Ф. Ю. 1940. Значение микроорганизмов в образовании перегноя и прочности структуры почвы. Сельхозгиз.
- Гельцер Ф. Ю. 1943. Образование прочной структуры почвы. Докл. ВАСХНИЛ, № 3.
- Гельцер Ф. Ю. 1949. Значение деятельного перегноя и пути его образования в почве. Тр. Всесоюзн. инст. удобр., агро-техн. и агропочвовед. им. Гедройца, вып. 29.
- Гельцер Ф. Ю., Е. А. Белякова. 1936. Биологическое значение органического вещества в деле создания прочной макроструктуры в почве. Сб. авторефератов и н.-и. работ за 1932—1934 гг.
- Горбунов Н. И. 1947. Рентгенографическое и электронографическое исследование гуминовой кислоты, гумусовых веществ и гуматов. Почвоведение, № 4.
- Гребенщиков И. В. акад. 1937. Химические реакции на поверхности силикатов и их значение для техники. Изв. АН СССР, Отдел техн. наук, № 1.
- Дарвин Ч. 1882. Образование растительного слоя деятельностью дождевых червей и наблюдения над образом жизни последних. Перев. с английского Лидерман. М.

- Д е р я г и н Б. В. 1946. Определение удельной поверхности пористых тел по скорости капиллярной пропитки. Коллоидный журнал, т. VIII, вып. 1—2.
- Д е р я г и н Б. В., Н. А. К р о т о в а. 1949. Адгезия. Исследования в области прилипания и клеящего действия. Изд. Инст. физич. химии АН СССР.
- Д о л г о в С. И. 1937. Влияние строения почвы на испарение из нее воды. В кн.: Физика почв. Тр. Всесоюзн. инст. удобр., агротехн. и агропочвовед. им. Гедройца, вып. 18.
- Д о л г о в С. И. 1949. Травопольная система земледелия и водный режим почв и ландшафта. Сб., посв. памяти акад. В. Р. Вильямса, Изд. АН СССР.
- Д о р м а н И. А. 1949. Структура почвы после люцерны и травосмесей. Гос. издат. УзССР.
- Д о р о х о в а М. А. 1942. Влияние грибов ризосферы на образование прочных агрегатов почвы. Сб. «Памяти В. Р. Вильямса».
- Д о я р е н к о А. Г. 1924. К изучению структуры почвы как соотношения некапиллярной и капиллярной скважности. Научно-агроном. журнал, № 7—8.
- Д р а г у н о в С. С. 1951. Методы исследования гумусовых веществ. Тр. Почв. инст. АН СССР, т. XXXVIII.
- Д у б и н и н М. М. 1932. Физико-химические основы сорбционной техники. Госхимтехиздат.
- З а х а р о в С. А. 1931. Курс почвоведения. Сельхозгиз, стр. 39—50.
- И л ь м е н е в С. И. 1937. Об однолетнем использовании клевера в севообороте. Химизация соц. земледелия, № 12.
- К а н и в е ц И. И., Н. П. К о р н е е в а и С. Ф. М о р о ч к о в с к и й. 1937. Биохимические способы структурообразования почвы. В кн.: Основные выводы научно-исследовательских работ Всесоюзного научно-исследовательского института сахарной промышленности за 1936 г. Киев.
- К а н и в е ц И. И., А. В. О м е л ь ч у к, Е. Г. Х а р и т о н. 1940. Почвенный гриб Триходерма лигнорум. Киев.
- К а ч и н с к и й Н. А. 1947. О структуре почвы, некоторых водных ее свойствах и дифференциальной порозности. Почвоведение, № 6.
- К в а с н и к о в В. В. 1927. Влияние структуры на ее физические и биологические свойства. Тр. Самарск. с.-х. инст., т. IV.
- К в а с н и к о в В. В. 1928. Структура почвы как фактор урожайности культурных растений. Научно-агроном. журнал, № 7—8.
- К о д а н е в И. 1946. Создание и использование травяного пласта. Сов. агрономия, № 1.
- К о л я с е в Ф. Е. 1937. Структурообразующие вещества и растения. Тр. Лабор. физики почв Физ. агроном. инст., вып. 2, стр. 233.
- К о н о н о в а М. М. 1951. Проблема почвенного гумуса и современные задачи его изучения. Изд. АН СССР.
- К о п о с о в И. П. 1937. О возможности искусственного структурообразования в черноземных почвах. Почвоведение, № 2.
- К о с т ы ч е в П. А. 1905. Почва, ее обработка и удобрение. М.

- К о с т ы ч е в П. А. 1934. Образование чернозема. Почвы черноземной области России, их происхождение, состав и свойства. 1886. ОГИЗ, Сельхозгиз.
- К о с т ы ч е в П. А. 1940. Почвоведение. Курс лекций, читанный в 1886—1887 гг. Классики естествознания. Сельхозгиз.
- К о с т ы ч е в С. П. и О. Ш у л ь г и н а. 1927. Весовое содержание микроорганизмов в почве. Тр. Отд. с.-х. микробиол. Гос. инст. опытн. агроном., II.
- К р ы л о в А. В. 1950. Преобразованная степь. Сельхозгиз.
- К у р т е н е р А. и М. Р о м а н о в а. 1935. К вопросу о влиянии искусственного структурообразования на скорость испарения почвенной влаги. Тр. Лабор. физики почв Физ.-агроном. инст., вып. 1.
- К у х а р е н к о Т. А. 1953. Гуминовые кислоты ископаемых углей. Природа, № 5.
- Л а з а р е в Н. М. 1939. К познанию почвенных масс как биоорганоминеральных систем. Сов. агрономия, № 7.
- Л а з а р е в Н. М. 1949. Типы биоорганоминеральных систем различных почв. Тр. Всесоюзн. н.-и. инст. с.-х. микробиол. за 1944—1945 гг., вып. 1.
- М а л ь ц е в Г. С. 1954. О методах обработки почвы и посева, способствующих получению высоких и устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур. Сельхозгиз.
- М и ш у с т и н Е. Н. 1938. Образование гумусоподобных веществ при процессах автолиза. Микробиология, т. VII, вып. 2.
- М и ш у с т и н Е. Н. 1941. Роль микробиологического фактора в образовании почвенной структуры. Микробиология, т. X, вып. 3.
- М и ш у с т и н Е. Н. 1945. Лабильная часть почвенной макроструктуры. Почвоведение, № 2.
- М и ш у с т и н Е. Н. и О. И. П у ш к и н с к а я. 1942. Роль микробиологического фактора в образовании почвенной структуры. Микробиология, т. XI, вып. 3.
- Н а б о к и х А. И. 1914. К методике полевого и лабораторного исследования почво-грунтов. Одесса.
- П а в л о в Г. И. 1930. Метод агрегатного анализа и агрегатный состав почвы. Тр. Ак-Кавакской опытно-оросит. станц., вып. 6.
- П е т р о в Е. Г. 1927. К вопросу об изучении водопроницаемости почв. Научно-агроном. журнал, № 4.
- П и г у л е в с к и й М. Х. 1925. Доклад на съезде агрономов в Ленинграде (Детское Село).
- П и г у л е в с к и й М. Х. 1936. Основы и методы изучения физико-механических свойств почвы. Изд. Лен. отд. Всесоюзн. инст. удобр. агротехн. и агропочвовед.
- П л о т н и к о в А. А. 1956. Урожай травосмесей и их влияние на структуру и плодородие почвы в полевом травопольном севообороте. Сб. тр. Ивановск. с.-х. инст., вып. 14.
- П о л ы н о в Б. Б. 1947. Основные идеи учения о генезисе элювиальных почв в современном освещении. Юбилейный сб., посвященный тридцатилетию Великой Октябрьской социалистической революции, ч. II, Изд. АН СССР.

- Пономарева С. И. 1949. Влияние деятельности дождевых червей на создание устойчивой в эрозионном отношении структуры почв. Тр. юбилейной сессии, посвященной столетию со дня рождения В. В. Докучаева, Изд. АН СССР.
- Радзиевский Г. Г. 1939. Роль почвенных грибов в образовании прочной структуры почв. Итоги работ ВНИИСС. Пищепромиздат.
- Рассел Э. Д. (Рэссел). 1935. Академик В. Р. Вильямс. 50 лет научной деятельности акад. Вильямса. Сельхозгиз.
- Ревут И. Б. и Н. П. Поясов. 1953. О некоторых физических условиях в структурных почвах в связи с содержанием пылеватых фракций. Сб. тр. по агроном. физике, вып. 6, стр. 228—242.
- Ремезов Н. П. и О. П. Измайлович. 1932. Влияние известкования на структуру почв. Тр. Научн. инст. удобр., вып. 77, стр. 64.
- Ростовцева О. С. и М. И. Аваева. 1935. Роль многолетних трав в создании прочной структуры почв. Почвоведение, № 5/6.
- Рудаков К. И. 1949а. Микроорганизмы и образование гумуса. Микробиология, т. XVIII, вып. 6.
- Рудаков К. И. 1949б. Образование гумуса в процессе развития растений. Тр. юбилейной сессии, посвященной столетию со дня рождения В. В. Докучаева, Изд. АН СССР.
- Рудаков К. И. 1951. Микроорганизмы и структура почвы. Сельхозгиз.
- Рыжов С. Н. 1949. Направленная переделка природы почв в условиях орошаемого земледелия. Почвоведение, № 2.
- Рыжов С. Н. и З. С. Байбекова. 1938. К вопросу о приемах создания прочной структуры почв. Соц. сельск. хоз. Узбекистана, № 11.
- Сабанин А. И. 1909. Краткий курс почвоведения. М.
- Саввинов Н. И. 1931. Структура почвы и ее прочность. Сельхозгиз.
- Саввинов Н. И. 1936а. Влияние многолетних трав и некоторых агрономических приемов на прочность структуры в разных зонах. Тр. Международной ассоциации почвоведов, Физика почв в СССР. Сельхозгиз.
- Саввинов Н. И. 1936б. О физических (структурообразующих) удобрениях для почв СССР. Тр. Международной ассоциации почвоведов, Физика почв в СССР, Сельхозгиз.
- Седлецкий И. Д. и Б. К. Бруновский. 1936. Строение гуминовой кислоты и структурная связь ее с лигнинами и углями. Тр. Инст. геохимии, кристаллографии и минералогии АН СССР, вып. 8.
- Соболев Ф. С. и М. В. Чапек. 1930. Роль поглощенного воздуха в явлениях почвенной структурности и новый метод его определения. Научно-агроном. журнал, № 1.
- Сokolовский А. Н. 1921. Из области явлений, связанных с коллоидной частью почвы. Изв. Петровск. с.-х. акад., вып. 1—4.

- Соколовский А. Н. 1956. Сельскохозяйственное почвоведение. Сельхозгиз.
- Солечник Н. Я. 1937. О структурообразующих клеях. (Собщение 2). Тр. Лабор. физики почв ФАН, вып. 2.
- Талмуд Д. Л. 1932. Поверхностные явления и их приложения в технике. Соц реконструкция и наука, вып. 3, стр. 188.
- Терцаги К. 1932. Основания механики грунтов. Геолразведиздат.
- Тюлин А. Ф. 1928. Результаты работ агрохим. отд. Пермской с.-х. оп. станц., вып. 2.
- Тюлин А. Ф. 1954. Вопросы почвенной структуры в лесу. Почвоведение, № 1.
- Тюлин А. Ф. и Е. В. Бирюкова. 1938. Структура почвы и удобрения. Химизация соц земледелия, № 2.
- Тюри И. В. 1935. К характеристике дернового процесса почвообразования. Сб., посвященный 50-летию научной, педагогической и общественной деятельности акад. В. Р. Вильямса, Сельхозгиз.
- Тюри И. В. 1937. Органическое вещество почв. Сельхозгиз.
- Тюри И. В. 1946. Участие живого вещества в органической части почвы. Почвоведение, № 1.
- Тюри И. В. 1949. Географические закономерности гумусообразования. Тр. юбилейной сессии, посвященной столетию со дня рождения В. В. Докучаева, Изд АН СССР.
- Тюри И. В. 1951. Некоторые результаты работ по сравнительному изучению состава гумуса в почвах СССР. Работы по органическому веществу почвы. Тр. Почв. инст АН СССР, т. XXXVIII.
- Фатгелер П. 1938. Режим катионов и воды в минеральных почвах Сельхозгиз.
- Физика почв в СССР. 1936. Сельхозгиз.
- Хейзер Э. (E. Heuser). 1933. Руководство по химии целлюлозы. Госхимтехиздат.
- Цыганов М. С. 1935. Сравнительное изучение методов мокрого агрегатного анализа почв Почвоведение, № 2.
- Чижевский М. Г. и И. М. Бакшеев. 1947. Макроагрегатный анализ методом качания сит. Сов. агрономия, № 2.
- Шмук А. А. 1951. Гуминовая кислота почв. Пищепромиздат.
- Ярилов А. А. 1933. На фронте физики почв. Материалы к выяснению вопроса структуры почв. Тр. Международной ассоциации почвоведов, т. I.
- Baver L. D. 1942. Soil physics. New York, pp. 126—197.
- Ehrenberg P. 1931. Neue Frage der Bodenkultur. Zeitschr. f. Pflanzenernährung, Düngung u. Bodenkunde, Bd 19, H. 1/2, Teil A.
- Fischer F. u. H. Schrader. 1933. Über die Entstehung und die chemische Struktur der Kohle. Brenstoffchemie, Bd 14, S. 147.
- Fuchs W. u. W. Stengel. 1929. Zur Kenntnis der Hydroxyl- und Karboxylgruppen der Huminsäuren. Brenstoffchemie, Bd. 10, S. 303.

- Hedrick R. M. 1954. Soil conditioners laboratory evaluation of polyelectrolytes as soil conditioners. *Agricultural and Food Chemistry*, v. 2, № 4, p. 182.
- Hedrick R. M. a. D. T. Mowry. 1952. Effect of synthetic Polyelectrolytes on Aggregation, Aeration and Water Relationships of Soil Science, v. 73, № 6, p. 427.
- Joder R. 1936. A direct method of aggregate analysis of soil a study of the physical nature of erosion losses. *Journ. of the Amer. Soc. of Agron.*, v. 28, № 5.
- Jung E. 1932. Weitere Beitrag zur aggregierenden Einwirkung des Frostes auf den Erdlofen. *Zeitschr. f. Pflanzen., Düngung u. Bodenkunde*, Bd. 24, H. 1—6, p. 51.
- Low A. I. 1954. The study of soil structure in the field and the laboratory. *Journ. of Soil. Sci.*, v. 5, № 1.
- McCalla T. 1945. Influence microorganisms and some organic substances on soil structure. *Soil Sci.*, v. 59, № 4, pp. 281—297.
- McHenry I. R. a. M. B. Russell. 1944. Microbial activity and aggregation mixtures of bentonite and sand. *Soil Sci.*, v. 57, pp. 351—357.
- Meyer L. u. U. Rennenkampff. 1936. Neuer Apparat und Methode zur automatischen Durchführung der Krümelanalyse nach Tjulin und Vorschläge zur Bestimmung des Krümelanteils der Krümelgrößen und der Krümelbarkeit des Bodens. *Zeitschr. f. Pflanzenernährung, Düngung u. Bodenkunde*, Bd. 43, H. 5—6.
- Meyers H. E. 1941. Some physicochemical aspects of soil aggregates. *Soil Sci.*, v. 52, № 6.
- Oden S. 1919. Die Huminsäuren. *Kol. Beich*, Bd. 11, S. 75.
- Ostwald W. u. W. Röediger. 1929. Studien zur Bodenkörperregel, 1, Bd. 49, SS. 314—321.
- Peele T. C. 1940. Microbial activity in relation to soil aggregation. *Journ. Amer. Soc. of Agron.*, v. 32, p. 204.
- Schloesing Th. 1874. Etudes sur la troov végétales. *Ann. de Chem. et physiq. Paris*, p. 514.
- Turner P. E. 1932. An analysis of factors contributing to the determination of saturation capacity in some tropical soil types. *Journ. Agric. Sci.*, v. 22, pp. 72—91.
- Wedekind E. u. J. Katz. 1929. Zur Erkenntnis der Lignins I. Mitteil; Chemische und physikalische Untersuchungen der Phenol-Lignin. *Ber. der Deutschen Chem. Gesellschaft*, Bd. 1, Jahrg. 62, SS. 1172—1177.
- Wollny E. 1897. Untersuchungen über den Einfluss mechanischen Bearbeitung auf die Fruchtbarkeit des Bodens. *Forschungen auf dem Gebiet der Agrikulturphysik*, Bd. 20, SS. 187—212.

О Г Л А В Л Е Н И Е

ВВЕДЕНИЕ	3
<i>Глава I. Понятие о почвенной структуре, ее агрономической ценности и методах определения</i>	5
Понятие о структурном строении почвы	5
Почвенная макроструктура и ее агрономическая ценность	7
Водопрочность почвенной структуры и методы ее определения	17
О плотности и пористости агрегатов	27
О биологической устойчивости почвенных агрегатов	29
Почвенная микроструктура, ее значение и методы определения	31
О классификации почвенной макроструктуры	36
<i>Глава II. Слипание почвенных частиц</i>	38
Капиллярная теория слипания частиц	38
Теория склеивания почвенных частиц	42
<i>Глава III. Крошение почвенной массы на структурные отдельныености</i>	56
Крошение почвы на агрегаты под влиянием высушивания	57
Крошение почвы при замораживании и оттаивании	62
Крошение почвы под действием корневых систем многолетней травянистой растительности	73
Крошение почвы под действием почвообрабатывающих орудий	80
О крошащей деятельности землероев и червей	91
Образование почвенной микроструктуры	94
<i>Глава IV. Возникновение водопрочности в почвенном комке</i>	101
Понятие водопрочности	101
О появлении в почвенном комке свойств водопрочности	105
Органическое вещество, придающее водопрочность почвенным агрегатам	110
О физико-химической сущности явления водопрочности структуры	119
<i>Глава V. Микробиологические факторы формирования почвенной структуры</i>	124

<i>Глава VI. Восстановление и накопление водопрочной структуры под травами</i>	133
<i>Глава VII. Об искусственном структурообразовании . . .</i>	142
Физико-химические требования к клеящим веществам, вводимым в почву	143
Изменение водопрочности почвенной структуры под влиянием клеящих веществ	145
Влияние целлюлоз и гемицеллюлоз на водопрочность почвенной структуры (145). Влияние лигнина на водопрочность почвенных агрегатов (147). Влияние гуминовой кислоты на водопрочность почвенных агрегатов (147). Влияние битумов на водопрочность почвы (151). О количестве веществ, придающих водопрочность почвенным агрегатам (151). Влияние белковых соединений на водопрочность почвенной структуры (153). Крилиумы и их влияние на водопрочность структуры (154).	
О типах водопрочного склеивания	156
О биологической стойкости клеящих веществ . . .	158
Полевые опыты со структурообразующими веществами	159
Заключение	177
Литература	179

Петр Васильевич Вершинин

ПОЧВЕННАЯ СТРУКТУРА И УСЛОВИЯ ЕЕ ФОРМИРОВАНИЯ

*Утверждено к печати
Редколлегией научно-популярной литературы
Академии наук СССР*

Редактор издательства **М. И. Головнин**
Технический редактор **Н. А. Кругликова**
Корректор **Р. Р. Гершицкая**

Сдано в набор 5/VIII 1958 г. Подписано к печати 10/XII 1958 г.
РИСО АН СССР № 27—116В. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бум. л. 2¹⁵/₁₆.
Печ. л. 5⁷/₈ = 9 6 усл. печ. л. Уч.-изд. л. 10.11.
Изд. № 482. Тип. зак № 753. М-02047. Тираж 4000.
Цена 3 руб.

Ленинградское отделение Издательства Академии наук СССР
Ленинград, В-164, Менделеевская лин., д. 1

1-я тип. Издательства Академии наук СССР
Ленинград, В-34, 9 линия, д. 12