

КАЧИНСКИЙ Н. А.

ФИЗИКА ПОЧВЫ

Д о п у щ е н о
Министерством высшего и среднего
специального образования СССР
в качестве учебника
для студентов университетов

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ВЫСШАЯ ШКОЛА»
Москва — 1965

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящем учебнике автор излагает содержание курса «Физика почвы», теоретические основы учения о физических свойствах и процессах, протекающих в почве, и принципы методов, применяемых для их изучения в сельскохозяйственных, лесохозяйственных и других народнохозяйственных целях.

В основу книги положен опыт автора по чтению курса «Физика почвы» на почвенном отделении Московского государственного университета с 1930 года и по настоящее время. Учтен также опыт работы коллектива сотрудников кафедры физики и мелиорации почв биолого-почвенного факультета МГУ и широкого круга работников по этой специальности как в Советском Союзе, так и за рубежом: в Польше, Румынии, Чехословакии, Дании, во Франции, в США, где в последние годы автору представилась возможность лично познакомиться с постановкой работ по физике почвы в научных, производственных и учебных целях. Наконец, использованы научные литературные материалы других стран.

Курс «Физика почвы» согласован с учебными планами почвенных отделений Университетов. Он может быть использован в качестве учебного пособия и другими вузами СССР, готовящими специалистов по профилю сельского, лесного хозяйства и мелиорации земель.

При подготовке учебника к печати существенную помощь автору оказали сотрудники кафедры физики и мелиорации почв биолого-почвенного факультета МГУ: доцент А. Ф. Вадюнина, ассистент В. А. Корчагина, младшие научные сотрудники — А. И. Мосолова, А. Д. Воронин, Л. Б. Боровинская и Е. А. Дмитриев, старший лаборант Т. Н. Красильникова и лаборант М. А. Гусаковская. Всем им приношу искреннюю благодарность.

Благодарю также за просмотр рукописи и ценные замечания доцента Казанского университета А. Б. Колоскову и заведующего лабораторией эрозии почв Среднеазиатского института Почвоведения профессора доктора В. Б. Гуссака.

Н. А. Качинский

ВВЕДЕНИЕ

Физика почвы — *специализированный раздел почвоведения*, изучающий физические свойства, физические процессы в почве и направленное их изменение.

Почвоведение как самостоятельная естественноисторическая наука оформилось в конце XIX века. Творцом научного почвоведения по праву считается выдающийся русский ученый профессор Петербургского университета Василий Васильевич Докучаев (1846—1903). Сооснователями этой науки были: талантливый ученик Докучаева заведующий первой кафедрой почвоведения в России (в Ново-Александровском сельскохозяйственном институте) профессор Н. М. Сибирцев (1860—1900) и профессор П. А. Костычев (1845—1895), развивший агрономическое направление в почвоведении.

В период деятельности В. В. Докучаева, Н. М. Сибирцева и П. А. Костычева почвоведение развивалось как единая наука о генезисе и географии почв, опиравшаяся в основном на морфологический метод исследования. В дальнейшем, в связи с запросами сельскохозяйственного производства, значительное развитие получили химия и агрохимия почв, физика и физико-механика почв, биология и минералогия почв. Выявились и несколько точек зрения о дальнейших путях развития почвоведения как науки.

В. Р. Вильямс, развивая учение В. В. Докучаева о факторах почвообразования (преимущественно о значении биологического фактора), считал, что почвоведение должно быть единым, что разделение его на физику, химию, географию почв и т. д. — это диалектически недопустимый разрыв науки на части. Не только почвоведение внутри себя не следует дифференцировать, но его нельзя резко отграничивать даже от общего земледелия, так как между этими двумя науками трудно провести границу. Вот почему учебник В. Р. Вильямса носил название то «Почвоведение с основами общего земледелия», то «Общее земледелие с основами почвоведения».

Диаметрально противоположную точку зрения на пути развития почвоведения как науки высказывали профессор В. А. Михельсон и А. Ф. Лебедев, академик А. Ф. Иоффе. Они считали, что почвоведение

ние, учитывая необходимость быстрого его развития, нельзя удерживать в общих рамках одной науки. Оно должно дифференцироваться на части так, как это произошло в области биологических наук — в ботанике, в зоологии, в медицине и др. В этих науках успешно оформились самостоятельные дисциплины: морфология, физиология, география и систематика растений; физиология животных, зоология позвоночных и беспозвоночных; терапия, невропатология и др. Следуя такому пути развития наук, и почвоведение целесообразно разделить на агрофизику, агрохимию, географию почв и др. и по этому принципу строить исследовательскую работу и подготовку специалистов в вузах. Высказывалось соображение, что физика почвы, химия почвы, география почвы, как и другие разделы почвоведения, быстрее и глубже разовьются, если они организационно будут сближены с физикой, химией, минералогией, географией, биологией. Именно по этому принципу был в 1932 г. организован по инициативе академика А. Ф. Иоффе физико-агрономический институт в Ленинграде, в котором сочетаются работы агрономов и физиков-теоретиков.

Оригинальную точку зрения на пути дифференциации почвоведения развил в 1943 г. профессор И. Н. Антипов-Каратаев*. Он считает, что деление почвоведения на физику, химию, физико-химию и т. д. — деление, как он думает, по методам работы устарело. Оно как «прокрустово ложе» затрудняет дальнейшее развитие почвоведения. И. Н. Антипов-Каратаев предлагал выделить как самостоятельную научную дисциплину дисперсоидологию почв, в которую должны войти все разделы почвоведения кроме картографии, географии и биологии почв.

Эта точка зрения на дальнейшие пути развития почвоведения, как явно не обоснованная, не нашла сторонников и не получила признания в науке.

Организационные и научные формы развития современного почвоведения как в Советском Союзе, так и за рубежом представляют собою как бы результат критического анализа и синтеза выше отмеченных и подобных им точек зрения. Признается, что для глубокого развития почвоведения необходимо, чтобы оно базировалось на широком комплексе естественноисторических дисциплин, как математика, физика, химия, геоморфология, геология, гидрогеология, биологический комплекс наук — прежде всего ботаника и зоология. Еще А. Н. Сабанин писал: «В ряду естественноисторических наук почвоведение занимает центральное положение, является как бы узлом, в который вплетаются явления живой и мертвой природы, а потому оно (почвоведение) более чем какая-либо иная естественноисторическая дисциплина прибегает к помощи других, близко с ней соприкасающихся наук о природе**».

* «Почвоведение», 1943, № 6 и 7.

** А. Н. С а б а н и н. Краткий курс почвоведения. 1909, стр. 2.

Базируясь на таком научном комплексе, почвоведение должно оставаться *единой наукой*, но вместе с тем, как и в других научных дисциплинах, оно должно дифференцироваться внутри себя на отдельные разделы или отрасли: физику почв, химию почв, агрохимию, минералогию почв, биологию почв, географию и систематику почв. Это устраняет опасность дилетантизма в науке и вместе с тем исключает возможность разрыва почвоведения на разрозненные части. В соответствии с этим строится учебный план на почвенных отделениях в университетах. Три первые года все почвоведы проходят обучение по единому плану, и лишь с четвертого года студенты начинают глубоко изучать (при кафедрах) отдельные разделы почвоведения: генезис и географию почв, физику и мелиорацию почв, химию и агрохимию почв, биологию почв. Специализация по названным разделам почвоведения углубляется в процессе выполнения производственной практики, курсовых работ и прохождения спецкурсов. Завершением специализации является дипломная работа по данному разделу почвоведения.

Специалист почвовед, подготовленный по указанному плану, в случае необходимости может работать в любой области почвоведения. В то же время, владея новейшими методами исследования, он способен глубоко решать научные проблемы в избранном разделе почвоведения и содействовать дальнейшему развитию науки о почве.

Физика почвы в составе почвоведения наибольшее развитие получила в последние десятилетия. Этому в сильной степени способствовало расширение в сельскохозяйственном производстве СССР проблем: по механизации обработки почв, по орошению засушливых территорий и осушению заболоченных, по борьбе с эрозией и др. Все эти проблемы не могут быть научно разрешены без углубленного знания физических и физико-механических свойств почвы.

Современная физика почвы изучает комплекс физических и физико-механических свойств почвы, совокупность физических процессов и режимов, протекающих в ней, и основные пути направленного их регулирования в целях сельского и лесного хозяйства, дорожного строительства, санитарии почв, курортного строительства и др.

В курсе «Физика почвы» две части: 1— основные физические свойства почвы; 2— функциональные, или производные, физические свойства почвы.



КРАТКАЯ ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ УЧЕНИЯ О ФИЗИКЕ ПОЧВЫ

Первые попытки обобщения эмпирических сведений о почве и физических ее свойствах, особенно о механическом составе почвы, уходят к истокам земледелия. Письменные документы по этому вопросу находим у писателей Греции и Рима — Аристотеля и Теофраста (IV в. до н. э.), у писателей Рима — Катона, Варрона, Колумеллы, Плиния старшего, в «Георгиках» поэта Вергилия (I в. до н. э.).

В древней Руси еще в княжение Ивана III (XV в.) были заведены так называемые «Писцовые книги». В них описывались рельеф местности, земельные угодья — пашни, луга, леса, болота, качество почв с разделением их по механическому составу, урожайность растений. В книгах выделялись земли: «добрые», «средние», «худые» и «добре худые»; «некошь», «тростник», «земля камениста» и «песчата», «лес пашенный», «лес не пашенный», «луг по кустарю» и др.* В зависимости от количества и качества земли бояре, окольные и думные дворяне, стольники и другие землевладельцы платили подати государству и поставляли ратников и лошадей для войска**.

Значительные сведения о почвах и об агротехнике огородных и садовых культур находим также в известном историческом памятнике «Домострое» XV—XVI вв., в котором есть специальная глава — «Огород и сад как водить». В ней указано, как сдобривать почву: «...как гряды копати и навоз класти... И посадив или посеев всякие семена и всякое обилие, в пору поливати и укрывати, и от мороза всегда беречи...»***.

Следующий крупный этап в развитии почвоведения и почвенной физики связан с известным трудом М. В. Ломоносова «О слоях

* Писцовые книги Московского Государства. Под редакцией Н. В. Качалова. Ч. I. Изд. императорского русского географического общ-ва, СПб., 1877.

** См.: В. Ключевский. Курс русской истории. Ч. II. 2-е изд. Гос. изд-во М.—Л., 1923, стр. 275.

*** Домострой Сильвестровского извода. СПб., 1902, стр. 44 и 45.

земных»*. Почву Ломоносов рассматривает в динамике, в развитии. Она зарождается на материнских породах под воздействием живых существ и развивается вместе с ними. «Каменные голые горы часто показывают на себе зелень мху молодого, которая после чернеет и становится землею; земля, накопясь долгою времени, служит после к произведению крупного мху и др. растений» (§ 124). «Чернозем», по мнению Ломоносова, «не первообразная и не первозданная материя, но произошел от согнития животных и растущих тел со временем» (§ 125). Эти мысли М. В. Ломоносова созвучны взглядам современного почвоведения.

Наряду с описанием различных почв, в труде «О слоях земных» делается первая попытка классификации почв, причем в основу ее полагается механический состав и обогащенность почв солями. Выделяются: «чернозем», «песок», «глина разных родов», «ил или тина», «каменные голые горы», «самосадка и солончаки». Описывая различные почвы, Ломоносов излагает свои глубоко проницательные догадки об их генезисе, свойствах и плодородии**.

В Московский университет впервые агрономия, почвоведение, а вместе с ними и физика почвы вступили в 1770 г. Вторая половина XVIII в. ознаменовалась промышленной революцией в Англии и некоторых других западноевропейских странах: развитием промышленности, захватом колоний, обезземеливанием крестьян, образованием пролетариата. Рост городского населения и сокращение площадей, занятых под зерновые культуры внутри этих стран, вызвали возрастающий спрос на иноземный хлеб, цены на который росли. Русский экспорт в Европу, представленный в предшествующие 50 лет пенькой и льном, теперь все более характеризовался вывозом пшеницы.

В России возрастает повсеместный интерес к почвам, на которых возделывалась пшеница, и в первую очередь к самой плодородной почве — чернозему.

В такой международной и внутренней экономической обстановке и открылись двери Московского университета для агрономии, причем в первую очередь для земледелия и почвоведения.

Курс агрономии читался на кафедре зоологии и ботаники. Он именовался «Сельскохозяйственным домоводством». Первым читавшим этот курс (1770—1777) был профессор натуральной истории Матвей Иванович Афонин.

Уже через год после занятия кафедры (в 1771 г.) М. И. Афонин выступает с торжественным словом на публичном собрании Московского университета. Тема его выступления знаменательна для стен

* М. В. Ломоносов. Первые основания металлургии или рудных дел. Прибавление второе: О слоях земных. Полное собрание сочинений. Т. 5. Труды по минералогии, металлургии и горному делу, 1741—1763 гг. М.—Л., Изд. АН СССР, 1954.

** Н. А. Качинский. Идеи М. В. Ломоносова в науке о почве. Вестн. Моск. ун-та, 1961, № 5, стр. 26—33.

университета: «Слово о пользе, знании, собирании и расположении чернозему, особливо в хлебопашестве». Чернозем в понимании М. И. Афонина — верхний гумусированный (растительный) слой земли. «Он состоит по большей части из согнивших трав и растений, которые части в самом воздухе, как говорят, под непокрытым небом, а части в живущих телах перемену сию претерпели»*. Земля образована из мелких частиц. Они «не твердо между собой соединяются и от воды рыхлее и мельче становятся»**.

Наиболее интересным из теоретических высказываний М. И. Афонина и для нас современным является представление его о происхождении гумуса из органических тел под влиянием микронаселения почвы и атмосферных агентов (воды, воздуха, тепла).

Все наиболее ценное в труде Афонина позаимствовано им из отечественной сельскохозяйственной практики. К этому ценному прежде всего должна быть отнесена предложенная Афоным классификация «черноземов». Он выделяет 8 разных по свойствам черноземов: 1) «глинистый чернозем», 2) «каменистой и песчаной или с хрящем смешанной», 3) «лесной на смолу похожей чернозем, которой также и легкую землю сльвет и кой всегда масляным кажется, и при том рыхл, почему и растения на нем скоро всходят», 4) «болотной чернозем, которой также называется и мерзлую землю или тиною. Он кислотоват и при том много холоден», 5) «березовой чернозем, кой всегда сух и холоден», 6) «можжевеловой и сосновой чернозем, которой натурою не только тепл, но и горяч», 7) «еловой чернозем, которой также жирен, но несколько холоднее нежели сосновой», 8) «ореховой чернозем, которой также и лесным черноземом называется. Он по большей части состоит из хорошей и плодородной земли, потому что он в себе имеет как жирность, так и теплоту, помощью которой растения скоро всходят и имеют хорошие соки к своему питанию. Он по большей части почитается полезным для ржи и весеннего сева, и при том можно на нем без всякой приправки, или особого удобрения многие годы с выгодой сеять». К черноземам М. И. Афонин относит и «болотной торф».

Принцип классификации почв, примененный М. И. Афоным, в основе которого лежит биологический фактор, сохраняет свое значение и в наши дни.

Деятельность М. И. Афонина в Московском университете продолжалась 7 лет, после чего по болезни он вышел в отставку. Переселившись в Крым, М. И. Афонин продолжал вести опыты по земледелию на своих собственных участках.

Наиболее талантливым продолжателем развития идей почвоведения и особенно физики почвы в конце XVIII века после М. И. Афонина был Иван Михайлович Комов, создавший капитальный труд —

* М. И. А ф о н и н. Слово о пользе, знании, собирании и расположении чернозему, особливо в хлебопашестве, 1771, стр. 16.

** Там же, стр. 14.

«О земледелии», изданный отдельной книгой в Петербурге в 1788 г. В этом классическом произведении с изумительной широтой и глубиной для своего времени, как в энциклопедии, поставлены все вопросы сельского хозяйства, в том числе почвоведения и земледелия. Автор различает почвы от природы бедные и богатые, плодородные и неплодородные и намечает пути наиболее эффективного использования их под культурные растения. «Хлеб,— пишет он, — не может терпеть ни горячей земли, ни студеной, ни мокрой, ни сухой. Трещины зной солнца в землю пропускают». «Хорошо, пишет он, когда в почве воды — одна четверть ее веса, а питательные вещества в растворе составляют по весу одну четырехсотую долю». Лучшей почвой Комов считает чернозем, так как он богат питательными веществами и с т р у к т у р е н.

«Древние чернозем гнилою землею называли. Он произошел от согнития животных и растений. Частицы его составляющие не излишне крепко, ни чрезмерно слабо дружка со дружкой сцепляются. Вода и воздух свободно в него проходят. Земля эта хлеба родит много, а навозу и работы мало требует».

По Комову, поднять плодородие почв призвана наука земледелия, в которой агрофизика играет первейшую роль. «Земледелие,— пишет он,— с высокими науками тесный союз имеет, каковы суть: история естествознания, наука лечебная, химия, механика и почти вся физика; и само оно ничто иное есть, как часть физики опытной, только всех полезнейшая». В труде Комова обстоятельно описываются почти все физические свойства почвы: водные, воздушные и тепловые, механический и структурный ее состав и зависимость свойств почвы от ее структуры. Огромное значение автор придает обработке полей, так как «от пахоты земля пушнее и сочнее становится и вредных растениям вещей избегается. Нижние слои, выпавшие наверх, пока воздухом не будут удобрены, неплодородны бывают». Вспашка рекомендуется зяблевая, в том числе и под парянину (пар).

Значительно позже трудов Комова мы находим аналогичную с его учением постановку вопросов о значимости в плодородии почвы физических свойств и ее структуры в работах Тэера (Thaer, 1806), Деви (Davy, 1814), Шюблера (Schübler, 1838), Шумахера (Schumacher, 1864), Е. Вольни (Wollny, 1878—1898).

Центром сельскохозяйственной науки за рубежом в конце XVIII и в первой четверти XIX вв. были Германия и Англия, а крупнейшим представителем научного мира являлся немецкий ученый Альфред Тэер. В 1806 году вышел в свет его капитальный труд — «Рациональные основы сельского хозяйства», в котором охватывались все разделы земледелия, в том числе почвоведения, и вопросы физики почвы. Тэер, как никто до него, оценил роль органического вещества в плодородии почвы, в создании ее структуры и оптимальных физических свойств. Правда, Тэер переоценил роль гумуса в питании растений. Он считал, что гумус не только

улучшает физические свойства почвы, но является и пищей для растений. Позже теория гумусового питания растений была отвергнута; особенно жесткой критике она подверглась в трудах другого крупного немецкого ученого Юстуса Либиха. Но поучительно узнать, что в настоящее время этот вопрос снова привлекает внимание почвоведов. Например, в работах профессора Л. А. Христовой доказывалось, что хотя растения и не питаются перегноем, однако часть его из почвы через корневую систему усваивают. Перегной, поступивший в корни растений, активизирует оксидационные (окислительные) процессы в клетках, повышает тонус жизни растения, а вместе с тем — развитие растения и его урожай.

В России выдающимся учеником Тэера, развивавшим его учение и много сделавшим в области земледелия, мелиорации и физики почв, был заведующий кафедрой физики, минералогии и сельского хозяйства в Московском университете М. Г. Павлов (читал курс с 1820 по 1828 гг. и с 1834 по 1839 гг.). Первоначально, как и Тээр, он стоял на позиции гумусового питания растений, но позже отошел от этой теории. Он утверждал, что «растения возникают не всегда из чернозема», что многие, особенно низшие, «возникают и там, где только при благоприятном воздухе и теплоте достаточно влажности. Здесь, следовательно, силою произрастания органическое вещество превращается неорганическое. Растения, возникшие не из чернозема, разрушаясь, превращаются в чернозем. Растущие на черноземе также не одним им питаются, но, особенно широколиственные, много пищи поглощают и из атмосферы; следовательно, разрушаясь, земле возвращают чернозема (гумуса— Н. К.) более, нежели сколько из нея поглощают его; таким образом тучность земли усиливают»*.

Природу, почву М. Г. Павлов понимает в развитии. «Теории механические на каждом шагу противоречат природе; динамические, напротив, оправдываются явлениями более и более»**.

Изложенные концепции М. Г. Павлова о питании растений, о взаимовлиянии растения и почвы, о динамичности почвенного процесса — образны и близки нашим современным представлениям.

М. Г. Павлов развивал свои научные концепции, учитывая запросы производства. Почву он понимал как объект использования в сельском хозяйстве, причем плодородие ее, по мнению Павлова, должно поддерживаться и непрерывно повышаться человеком. Большая часть работ М. Г. Павлова посвящена агротехнике возделывания сельскохозяйственных культур.

В 1821 г. М. Г. Павлов издает работу «О главных системах сельского хозяйства, с принаровлением к России». Уже в этой работе он решительно восстает против трехполья как изжившей

* М. Г. Павлов. Курс сельского хозяйства. Т. II. М., 1837, стр. 192.

** М. Г. Павлов. Русский земледелец. Кн. I. 1838, стр. 11—23.

себя, отсталой системы земледелия и рекомендует заменить ее плодосменом с введением в сельскохозяйственное производство пропашных культур и трав. Характер плодосмена необходимо варьировать, приспособлявая его к местным природным условиям. «Современные выгоды трехполевой системы, — пишет Павлов, — ничтожны в сравнении с вредными от нее последствиями. И естественно-ли, что в России, где находится столько различия в почве и климате, господствует один порядок в нивоводстве?». Плодопеременная система «как надежнейшая к поддержанию оного (плодонося земли), должна трехполевую заменить безусловно». Об этом же он пишет и через 17 лет: «Плодопеременение, т. е. смена одних пород другими в растительном царстве, есть коренной закон; действия искусства, противные сему закону, при всех условиях остаются или вовсе безуспешными или слабо награжденными»*.

Борясь против трехполья, М. Г. Павлов тем более считал недопустимым монокультуры, которые приводят к «порче» почвы или к явлению, которое в современном земледелии известно как «почвоутомление». Он оттеняет, что порча почвы — это не то, что истощение ее. Истощение вредно для всех растений вообще, «порча» же вредит только тем, от которых произошла, и близким к ним «по природе».

М. Г. Павлов ратовал за культурную обработку почв и для этой цели сконструировал плуг («плужок Павлова»). Для обогащения почвы «черноземом» он наряду с унавоживанием рекомендовал применять сидераты.

Предложенные им агротехнические мероприятия М. Г. Павлов в полной мере применял на опытном Бутырском хуторе под Москвой, которым он заведовал. Этот хутор можно считать первым сельскохозяйственным опытным учреждением России, а М. Г. Павлова — первым организатором сельскохозяйственного опытного дела. Он же, руководя земледельческой школой Московского общества сельского хозяйства, был новатором сельскохозяйственного образования в России.

Свои передовые взгляды в области сельского хозяйства М. Г. Павлов неутомимо проповедовал на официальных лекциях и в публичных чтениях, которые привлекали массу слушателей и пользовались неизменным успехом.

«Увлекателен был Павлов, — говорит Шевырев, — озаривший новым блеском область естествоведения»**. Не менее лестный отзыв о лекциях М. Г. Павлова дает и Герцен, бывший в числе его слушателей. Он отмечает особое умение М. Г. Павлова будить у слушателя философскую мысль***.

Владея передовой агротехникой, М. Г. Павлов понимал и видел, что при рациональном ведении хозяйства, согласно девизу «с о в-

* М. Г. Павлов. Русский земледелец. Кн. I. 1838, стр. 11—23.

** Русский биографический словарь. Т. «Павел — Петр». СПб., 1902.

*** Там же.

ременность с печатью местности»*, можно добиваться непрерывного повышения урожая сельскохозяйственных культур. Отсюда проистекал оптимизм в его трудах, вера в будущее. Молодо и современно звучат его слова: «Какая утешительная истина! Источник способов физической жизни с распространением рода человеческого не только не иссякает, но, напротив, с течением времени может делаться обильнейшим»**. Это утверждение М. Г. Павлова — лучший ответ всем сторонникам псевдозакона «убывающего плодородия почв», всем человеконенавистникам типа мальтузианцев и неомальтузианцев.

В период научной деятельности Павлова исключительная значимость агрофизики в плодородии почв пользовалась в агрономических кругах всеобщим признанием. В Англии этому способствовали труды Дэви, в Германии — Шюблера. Дэви — агрохимик, но трактовку всех агрохимических процессов в почве он тесно увязывает с агрофизикой***. Еще большее внимание агрофизике уделяется в труде Шюблера****. В нем описываются все физические свойства почвы (кроме механического состава) и предлагаются методы их определения. Один из приборов Шюблера — весы для определения липкости почв — в измененном и усовершенствованном виде используется в почвоведении и в настоящее время.

Труд Шюблера как бы венчал развитие агрофизики в первой четверти XIX века. В дальнейшем наблюдается спад внимания к этому разделу почвоведения. Этот период совпадает с периодом выдающихся научных достижений в области химии и физиологии растений (работы А. Л. Лавуазье, Ж. Б. Буссенго, Н. Т. Соссюра, Ю. Либиха и др.). Развитие химии способствовало невиданным ранее успехам в области промышленности и сельского хозяйства. Впервые на полях стали применять химические удобрения, резко повысившие урожайность сельскохозяйственных культур. У физиологов и химиков, как говорится, от успехов закружилась голова. Химию стали считать всенаукой. Полагали, что одна она призвана разрешить вопрос плодородия почвы. В это время в Московском университете кафедру сельского хозяйства возглавлял преемник М. Г. Павлова выдающийся молодой профессор Я. А. Линовский (1844—1846).

* М. Г. Павлов. Курс сельского хозяйства. Т. I (Предисловие). М., 1837, стр. 11.

** М. Г. Павлов. Речь о побудительных причинах совершенствовать сельское хозяйство в России преимущественно перед другими отраслями народной промышленности и о местах, существенно к тому относящихся, произнесенная в торжественном собрании Императорского Московского Университета июля 4 дня 1823 года.

*** См.: Гумфри Дэви. Основания земледельческой химии. Изд. Имп. ВЭК, общ. СПб., 1832.

**** G. Schübler. Grundsätze der Agrik.-Chemie. Leipzig, 1830, В. II.

Будучи еще молодым ученым, Линовский возвысил свой голос против одностороннего увлечения в сельском хозяйстве химией. Он писал: «Вся теория, все учение Либиха относительно производительности земли состоит в том, что она зависит от количества и качества находящихся в ней разных растворимых неорганических солей». Либих «перешел к последней крайности и стал утверждать, что земля и навозы вовсе почти не содействуют к умножению органической материи, находящейся в растениях, а это совершенно противоречит всем известнейшим физиологическим наблюдениям, и еще более — вековой опытности хозяев». Я. А. Линовский справедливо замечает: «Хотя соли и другие минеральные вещества, разбрасываемые по полям, могут значительно содействовать к возвышению производительности почв, но они недостаточны для того, чтобы пропитать собою растения, чтобы вполне условить их развитие; нужно чтобы сверх того почва содержала известную примесь органических материй, чтобы она находилась под соответствующим влиянием внешних деятелей природы, а именно: воздуха, воды и теплоты». И далее: «Как ни силилась химия, но она не могла проникнуть в тайну плодородия почв, не успела еще разорвать всех тех завес, за которыми далеко от нас скрывается истина». Он рекомендует: «Подвергнуть землю соответствующему действию воздуха, воды, теплоты и навозов, т. е. уметь разрыхлить ее, удерживать в ней нужную для развития растений влажность, нагреть и удобрить ее — вот предмет занятий земледельца, вот в чем состоит весь секрет хозяйства»*.

Критика Я. А. Линовского, направленная против одностороннего увлечения химией была глубоко научна и справедлива. Это понял впоследствии и Ю. Либих. Когда он впервые применил минеральные удобрения, урожай сельскохозяйственных культур в Германии возросли в несколько раз. Казалось, что найдено средство непрерывного их повышения — стоит лишь увеличивать нормы удобрений. Однако скоро пришло разочарование. Нормы удобрений увеличивали, а урожай дальше не поднимался или даже падал. Причина этого — забвение почвенной физики и микробиологии.

И как ни странно, возрождению интереса к физике почвы способствовали микробиологи. В микробиологических исследованиях была показана исключительная роль для развития микроорганизмов водного, воздушного и теплового режимов почв, а значимость микробиологических процессов для плодородия почв четко обозначилась уже тогда.

В Московском университете специальную работу по физике почвы в связи с ее обработкой выполнил профессор сельского хозяйства, доктор естественных наук, адъюнкт Академии наук Н. И. Же-

* Я. А. Л и н о в с к и й. Критический разбор мнений ученых об условиях плодородия земли, с применением общего вывода к земледелию. СПб., 1846, стр. 25, 84, 94, 104, 109, 113, 114.

лезнов. В его работе «Испытание вязкости почв динамометрическим ломом» впервые предлагается прибор для определения сопротивления почв сдавливанию и расклиниванию. «Лом» Железнова в последующем был повторен во многих приборах и в усовершенствованном виде применяется в физико-механике почвы до настоящего времени.

Существенным этапом в развитии агрофизики стали работы двух немецких ученых. В 1864 г. Шумахер (W. Schumacher) выпустил первую книгу, посвященную специально физике почвы, — «Die Physik des Bodens». В 1878—1898 гг. Вольни (E. Wollny), занимавшийся углубленными исследованиями по агрофизике, издавал сборник трудов по физике почвы — «Forschungen auf dem Gebiete der Agricultur — Physik».

Роль физики в плодородии почвы отмечает в это время Карл Маркс. В письме к Энгельсу от 25/III 1868 года он писал по поводу книги Фрааза: «Важно хорошенько изучить новое и новейшее о земледелии. *Физическая школа противостоит химической*»*.

В трудах Шумахера и Вольни описываются уже почти все физические свойства, которые мы изучаем и теперь. Особенно подробно они анализируются в «Forschungen auf dem Gebiete der Agricultur — Physik». Эти сборники стали международными. В них публиковали свои работы и многие русские исследователи, в том числе В. Р. Вильямс (о механическом анализе почв и др.).

Е. Вольни и его ученики пользовались в основном аналитическим методом. Детально изучались водные, воздушные, тепловые и другие свойства различных компонентов почвы. Для познания целого (в данном случае почвы) нужно знать свойства его составляющих. Большая заслуга Вольни и его учеников и состоит в том, что они провели обширные аналитические работы по познанию компонентов почвы.

Однако школа Вольни проповедывала и принципиально ошибочные положения. Вольни полагал, что свойства суммы частей и целого аддитивны. Почву он рассматривал не как естественноисторическое тело природы, а как смесь различных соединений. По Вольни, если перемешать 50% глины, 35% песка, 10% перегноя и 5% извести, то получим чернозем. Вольни смешивал сумму и комплекс. Он не понял, что с у м м а — э т о с л о ж е н и е, а к о м п л е к с — в з а и м о п р о н и к н о в е н и е с о б р а з о в а н и е м н о в о г о.

Вторая принципиальная ошибка в работах Вольни и его учеников — это изучение физических свойств почвы в образцах с разрушенной структурой, отсеянных сквозь сито. Если это в известной мере допустимо для сыпучих материалов, как, например, для переваемых песков, то нельзя оправдать этот метод для почв структурных, обладающих в естественном их сложении совсем другими физическими свойствами, нежели в распыленном состоянии. Поч-

* К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, том XXIV, 1931, стр. 35.

венный порошок не больше напоминает природную почву, чем древесные опилки живое дерево. Поэтому прав был В. Р. Вильямс, когда направление школы Вольни он назвал порошковедением. И мы, отмечая положительное в обширных работах Вольни и его последователей, не должны забывать, что это направление сильно грешит механицизмом.

Идеи школы Вольни получили мировое распространение. Они проникли и в Россию. Методами Вольни при изучении физических свойств почв пользовался и творец нашей науки В. В. Докучаев и его ученики. Но работая на просторах Украины, изыскивая пути борьбы с засухой, они не могли не видеть несовершенство метода «порошковедения». В. В. Докучаев всемерное внимание обращает на свойства почв в их естественном залегании. Он резко отличает природную структуру чернозема от распыленной почвы. Он указывает: «В черноземной полосе России прежде всего нужно заботиться о восстановлении первоначальной физики почв вообще и зернистой структуры их в особенности»*.

«Разумнее сберегать ту воду, которую дают нам атмосферные осадки, а для этого нужно реставрировать, возобновить природу почв, коль она испорчена неумелыми руками, и теперь хлеба страдают от засухи»**.

Еще ближе подошел к вопросам агрофизики сооснователь почвоведения проф. П. А. Костычев. Особенно много сделано им в области структуры и обработки почвы в целях сохранения влаги в почве и обеспечения в ней благоприятных физических свойств.

П. А. Костычев, используя работы современников (Шлезинга и Вольни) и свои собственные исследования, впервые строго научно обосновал роль органического вещества и катиона кальция в структурообразовании почв и качестве структуры. Он писал: «В почвах, частицы которых связаны перегнойными солями, комки не разрушаются и от действия чистой воды». Он указывал, что гумус может только раз активно цементировать структуру почвы: «...гумусовые соли после высыхания и распыления в значительной степени теряют способность цементации»***.

Из всех форм структуры, как агрономически ценную, Костычев выделяет комковато-зернистую структуру, каковую и следует создавать в пахотном слое, ибо «... в комковатую почву с большой легкостью проходит воздух и вода, а для жизни растений не безразлична легкость обмена почвенного воздуха на новый и легкость промокания почвы до большой глубины»****.

* В. В. Докучаев. О почвенных зонах вообще и вертикальных зонах в особенности. В кн. «К учению о зонах природы». СПб., 1899, стр. 18.

** В. В. Докучаев. Лекции о почвоведении. Полтава. Экономическое бюро Полтавского Губернского земства. 1901, стр. 45.

*** П. А. Костычев. Почвоведение. М.—Л., 1946, стр. 103, переизданное по оригиналу учебника, изд. 1886—1887 гг., СПб.

**** П. А. Костычев. Почвоведение. М.—Л., 1946, стр. 101.

Среди методов воссоздания структуры почвы, наряду с известкованием и фосфоритованием кислых почв, Костычев особую роль отводит многолетним травам и потому настойчиво рекомендует травопольные севообороты, что в конце XIX в. было весьма прогрессивным для сельского хозяйства России.

Таким образом, в конце XIX в. физика почвы из лабораторий переходит в поле. Этому способствовали и бедствия — засухи, периодически постигавшие юг России. Особенно жестокая засуха, а вслед за ней и голод охватили степные районы России в 1891 году. Передовые люди из среды русской научной интеллигенции живо откликнулись на это бедствие и, помимо всяких благотворительных сборов в пользу голодающих, стали задумываться над сущностью засухи и о мерах борьбы с ней. Одними из первых в числе таких людей были В. В. Докучаев, П. А. Костычев, А. А. Измаильский, Н. М. Сибирцев. В это время под общим руководством Докучаева организуются опытные участки: «Каменная степь», «Велико-Анадольский» и «Старобельский».

Выходит в свет классический труд В. В. Докучаева «Наши степи прежде и теперь» (1892 г.). Начинаются углубленные исследования водного режима почв юга России. Особую известность приобрели работы П. А. Костычева, Г. Н. Высоцкого в Велико-Анадольском лесничестве и А. А. Измаильского в Полтавской губернии*.

Н. М. Сибирцевым предложена классификация почв по механическому составу, базирующаяся на соотношении в почве «физической» глины и «физического» песка **. Эта классификация на десятилетия вошла в почвенную практику и учебники почвоведения.

П. А. Костычевым разработана система культурной обработки почв: лущение стерни в целях борьбы с сорной растительностью и сохранения влаги в почве, глубокая зяблевая вспашка, чистые пары для местностей, страдающих от засухи (особенно черный пар) и другие приемы.

А. А. Измаильским и Г. Н. Высоцким впервые проведены наблюдения над динамикой влажности в глубоком профиле почво-грунта и выяснены основные закономерности непромывного и потускулярного водного режима почв в степи. Г. Н. Высоцким и П. В. Отоцким освещена гидрологическая роль лесов ***.

* П. А. Костычев. О борьбе с засухами в черноземной области посредством обработки полей и накопления на них снега. СПб., Изд. А. Ф. Девриена, 1893, стр. 1—80.

Г. Н. Высоцкий. Гидрологические и геобиологические наблюдения в Велико-Анадоле. Почвоведение, 1899, № 3, стр. 165—182; Почвоведение, 1900, № 1, стр. 22—39.

А. А. Измаильский. Как высохла наша степь. 1893.

А. А. Измаильский. Влажность почвы и грунтовая вода. Полтава, 1894.

** Н. М. Сибирцев. Почвоведение. Вып. III, отд. IV, СПб., 1901, стр. 30.

*** П. В. Отоцкий. Грунтовые воды, их происхождение, жизнь и распределение. СПб., 1905.

Применение агрофизических методов в полевых работах особенно ясно показало недостатки «порошковедения» школы Вольни. Делаются первые попытки изучения физических свойств почвы в образцах с ненарушенной структурой. Для этого конструируются специальные приборы — буры Н. Бурмачевского (1888), А. А. Измайльского (1894), П. Баракова (1903), И. Копецкого (1914) и др.

Изучение физических свойств почвы, преимущественно водного и теплового режимов, прочно вошло в программу работ существовавших и вновь открывавшихся опытных станций — Полтавской, Одесской, Ставропольской, Шатиловской, а позже Московской, Безенчукской, Саратовской и др., опытных полей — Херсонского, Донского, Темирского, Краснокутского и др., а также в программы кафедр земледелия и сельского хозяйства сельскохозяйственных институтов и университетов.

В предоктябрьский период наиболее крупные работы по химии и физике почвы были выполнены проф. Петербургского университета П. С. Коссовичем * и по физике почвы проф. А. Ф. Лебедевым **.

После Великой Октябрьской социалистической революции центрами развития агрофизики стали кафедра общего земледелия Петровской (ныне Тимирязевской) сельскохозяйственной академии (под руководством проф. А. Г. Дояренко) и отдел почвоведения Московской областной сельскохозяйственной опытной станции (под руководством проф. В. В. Геммерлинга и Н. А. Качинского).

А. Г. Дояренко и его ученики в динамическом разрезе изучали комплекс основных физических свойств и режимов почвы — водных, воздушных, тепловых, ее структуры и др. Для изучения этих свойств и режимов в поле и в лаборатории была предложена серия оригинальных приборов ***.

Н. А. Качинским впервые была показана и доказана необходимость изучения всех физических свойств и режимов почв со строгим учетом свойств генетических горизонтов почв и геологических напластований. Им же предложен ряд методов для изучения физических и физико-механических свойств почвы.

В период строительства совхозов и коллективизации сельского хозяйства резко возрастает спрос на почвенные исследования. Программа исследований расширяется. Наряду с картографическими работами требуется углубленная химическая и физическая характеристика почв.

В процессе выполнения крупных производственных работ выявились слабые места как в программе агрофизических исследований, так и в методах. Изучение физических свойств в так называемых

* П. С. Коссович. Краткий курс общего почвоведения. 2-е изд. СПб., 1916, стр. 220—242.

** А. Ф. Лебедев. Передвижение воды в почвах и грунтах, 1917.

*** См.: А. Г. Дояренко. Избранные работы и статьи. М. Моск. зем. отд., 1925—1926. Т. I и II. М., 1927.

образцах почв с ненарушенной структурой во многих случаях не удовлетворяло производство. Если ранее мы говорили, что почвенные порошки не больше соответствуют полевой почве, чем опилки живому дереву, то и вырезаемые для исследования из почвы куски ее объемом в 100—200—500 см³, конечно, не передавали всех свойств «живой» почвы. Поэтому было выдвинуто требование изучать физические свойства, а тем более физические режимы почвы не только в образцах с ненарушенной структурой, но и в естественном залегании почв, в производственной обстановке.

В период Великой Отечественной войны физика почвы, как и почвоведение в целом, переключались на оборонную тематику. Новый расцвет почвоведения, а в его составе и физики почвы относится к периоду восстановления народного хозяйства, разрушенного войной, и к современному периоду перехода от социализма к коммунизму в нашей стране.

Организируются многочисленные экспедиции с обязательным участием агрофизиков в целях осушения заболоченных пространств и освоения болот, орошения засушливых территорий, выработки наиболее совершенной агротехники сельскохозяйственных культур, мер борьбы с эрозией почв, продвижения земледелия на север и др. Для осуществления этих работ нужны многочисленные кадры почвоведов-агрофизиков, поэтому в университетах, сельскохозяйственных, лесных и мелиоративных вузах вводятся курсы агрофизики. В Московском университете организуется специальная кафедра физики и мелиорации почв (1943). В крупнейших институтах — Почвенном им. В. В. Докучаева, Агрофизическом им. А. Ф. Иоффе, Всесоюзном институте удобрений, агротехники и агропочвоведения им. К. К. Гедройца организованы специальные лаборатории или секторы физики почвы.

Содержание работ по агрофизике значительно расширилось. Наряду с механическим, микроагрегатным и структурным составом почв, водными, воздушными и тепловыми свойствами и режимами, большое внимание привлекают физико-механические и технологические свойства почв, электрические, естественная радиоактивность.

Расширение содержания физики почв потребовало расширения и усовершенствования методов работ с использованием достижений современной теоретической механики, физики и химии, современной аппаратуры: рентгеноструктурного, спектрального и термического анализов, аппаратуры и методов для работы с мечеными атомами, с электронным микроскопом, камерами искусственных температур, с гидроплощадками, аэродинамическими трубами и т. д.

Во много раз выросли кадры агрофизиков Союза. Широкую известность, теоретическую и практическую значимость получили исследования в области агрофизики А. Ф. Лебедева, П. И. Андрианова, А. А. Роде, Ф. Е. Колясева, М. К. Мельниковой, А. Ф. Вадюниной и др. — по вопросам почвенной влаги; В. Р. Вильямса,

К. К. Гедройца, С. А. Захарова, А. Ф. Тюлина, Н. И. Саввинова, И. Н. Антипова-Каратаева, П. В. Вершинина, И. Б. Ревута — по вопросам структуры почвы; В. П. Горячкина, М. Х. Пигулевского, Н. В. Щучкина и др. — по вопросам физико-механики почвы и многие другие работы по разным разделам агрофизики. Подробнее мы коснемся их в специальных главах настоящего труда.

Повседневное участие почвоведов—физиков-мелиораторов в разрешении широких производственных задач, как покорение пустынь, освоение заболоченных территорий, использование полимеров для искусственного оструктурирования и мелиорации почв, выработка приемов агротехники в связи со скоростной вспашкой, борьба с эрозией, использование электричества для рассоления почв и др., позволит проверить теоретические основы агрофизики и методы агрофизических исследований и сделать обобщения для поднятия физики почвы на новую, теоретически высшую ступень.

В завершение этой главы отметим, что за истекшее время физика почвы успешно развивалась и в ряде зарубежных стран. В Англии на Ротамстедской опытной станции в 1913 г. был открыт специальный отдел физики почв. В США в ряде университетов открыты кафедры и лаборатории по этой специальности. По различным разделам физики почв развернуты или расширяются работы в Японии, ГДР и ФРГ, Австрии, Франции, Швейцарии, Швеции, Китае, Индии, Пакистане, Югославии, Венгрии, Чехословакии, Польше, Румынии, Финляндии и в других странах. Имена ученых-почвоведов из разных стран, прямо или косвенно способствовавших развитию физики почвы, приобрели международную известность. Это Родевальд, Митчерлих, Эренберг, Фагелер, Кубиеа, Янерт, Цункер — в ФРГ и ГДР; Кин, Робинзон, Рессел, Свен Оден, Скофильд, Гейнес — в Англии; Бриджмен, Гарднер, Букинхам, Таннер, Бевер, Ричардс, Буйякос, Киркхам — в США; Дарси, Демолен, Уден, Хенин — во Франции; Вигнер — в Швейцарии; Аттерберг, Маттсон — в Швеции; Маршалл — в Австралии; Пури — в Индии и Пакистане; Копецкий и Новак — в Чехословакии; Кирица — в Румынии; Стебут — в Югославии; Мусерович, Добжанский — в Польше; Зигмонд — в Венгрии; Секера — в Австрии и многие другие.

За рубежом выпущен в свет ряд монографий по физике почвы. Среди них:

1. Handbuch der Bodenlehre, Herausgegeben von Dr. E. Blanck, Sechster Band; Die physikalische Beschaffenheit des Bodens. Berlin 1930.

2. Bernard A. Keen — The physical properties of the soil (физика почвы). London. New-York. Toronto, 1931. (Работа переведена на русский язык).

3. Gessner Hermann — Die Schlämmanalyse. Leipzig, 1931.

4. Vageler P. — Der Kationen und Wasserhaushalt des Mineralbodens. Berlin, 1932. Русское издание — Сельхозгиз, Москва, 1938.

5. Puri A. N. D. Siph D.— Soils, Their physics and chemistry. N.-Y., 1949.

6. Baver L. D.— Soil physics, New-York, 1940, 1948, 1956.

Эти работы, как и ряд других, с некоторыми критическими замечаниями будут использованы нами при дальнейшем изложении курса.

Физика почвы как один из важнейших разделов почвоведения получила признание в международной науке. В международной ассоциации почвоведов (МОП) физика почвы представлена первой комиссией. Доклады этой комиссии на международных конгрессах почвоведов занимают одно из ведущих мест *.

Курс физики почв в настоящее время включает следующие разделы: механический и микроагрегатный состав почвы, удельные веса, скважность или порозность почв, учение о почвенной поверхности и поверхностной почвенной энергии, структура почвы, формы воды в почве, водные свойства и режимы почв, воздушные свойства и воздушный режим почв, тепловые свойства и тепловые режимы почв, электроемкость и электропроводность почв, радиоактивные свойства почвы, физико-механические свойства (твердость, коэффициенты трения, липкость, вязкость, пластичность, набухаемость, сдвиг, усадка), динамика физических свойств почвы.

В такой последовательности мы и рассмотрим эти свойства и отчасти режимы почвы, кратко обобщая отечественные и зарубежные исследования по этому разделу почвоведения.

* Н. А. Качинский. Физика почвы в работах VII Международного конгресса почвоведов. Вестн. Москв. ун-та, 1961, № 3, стр. 41—72.

Н. А. Качинский. О работах VIII Международного конгресса почвоведов. Вест. Москв. ун-та, 1965, № 2.



МЕХАНИЧЕСКИЙ И МИКРОАГРЕГАТНЫЙ СОСТАВЫ ПОЧВЫ

Механический и микроагрегатный составы являются одними из главнейших показателей при характеристике почв и грунтов в поле и в лаборатории. В соответствии с этим механический анализ — самый распространенный из анализов в почвенной и грунтоведческой практике. Данное обстоятельство диктует необходимость выработки согласованной методики анализа и классификации почв. В противном случае исключается возможность сопоставления исследований различных авторов, а также составления обобщающих сводок по этому вопросу, необходимых в почвоведении, геологии, географии, грунтоведении и других дисциплинах.

Особенно большие различия наблюдаются в методах подготовки почв к анализу, а также в технике разделения механических элементов и микроагрегатов почвы, что препятствует использованию при характеристике почв единой классификационной шкалы.

Стремясь устранить означенные недостатки, мы даем критический разбор наиболее известных в СССР и за рубежом методов механического и микроагрегатного анализов почвы и предлагаем ряд уточнений к ранее опубликованным нами рекомендациям по технике анализа и классификации почв по механическому составу.

Остановимся лишь на тех методах, которые являются логическими звеньями в развитии описываемого вопроса или сохранили теоретическую и практическую значимость в почвоведении и агрономии на сегодня.

Ограничиваем также свою задачу характеристикой в анализе механических фракций почвы от каменистой ее части до ила в суммарном его понимании, не останавливаясь детально на свойствах коллоидов *.

В книге, наряду со сводкой литературных данных, приводятся новые материалы, полученные за последнее десятилетие в лабораториях физики и технологии почв Почвенного института Академии

* Учение о коллоидах почвы является разделом не почвенной физики, а физико-химии и коллоидной химии почвы.

наук СССР и кафедры Физики и мелиорации почв Московского государственного университета *.

Последовательно рассматриваем следующие вопросы: а) происхождение, свойства и классификация механических элементов почвы; б) подготовка почвы к механическому и микроагрегатному анализам; в) техника механического и микроагрегатного анализов; г) классификация почв по механическому составу; д) оформление данных механического анализа почвы; е) необходимая точность работы при механическом анализе почвы; ж) бонитировка почв по механическому составу.

Во всех случаях механический состав почвы, как и все другие физические ее свойства, должен изучаться в строгой приуроченности к генетическим горизонтам почвы, или к характеру геологических напластований.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПОЧВЫ И МИКРОАГРЕГАТЫ

В почвенной литературе дается ряд определений о механическом элементе почвы. К. К. Гедройц относит к механическим элементам «отдельные микро-, ультра- и амикрорекристаллики» (1926). А. Ф. Тюлин (1936, 1950) и согласно с ним И. Н. Антипов-Каратаев (1945) считают таковыми частицы (частицу), все элементы которых находятся в химической взаимосвязи. А. А. Роде (1931) вводит обязательное условие, чтобы все части механического элемента принадлежали к одной кристаллической решетке. В последнее понятие необходимо внести два уточнения. Первое сводится к замечанию, что механические элементы почвы могут быть не только кристаллическими, но и аморфными, например, SiO_2 , гидраты окисей железа, частички того или другого органического вещества в почве, а также органо-минеральных соединений (гуматов). В этом случае понятие механического элемента точнее определяется по Тюлину и Антипову-Каратаеву. Второе замечание связано с наличием в почве механических элементов, представляющих собой частички (осколки) не минерала, а сложной породы. В этом случае (например, в граните) мы будем иметь в одном механическом элементе сочетание нескольких кристаллических решеток, механически удерживающихся в одном куске. Считаем возможным обобщить предложенные определения в следующей формулировке: *под механическим элементом почвы следует понимать обособленные куски, кусочки (осколки) пород и минералов, а также аморфных соединений в почве, все элементы которых (последних) находятся в химической взаимосвязи.*

* Исследования выполнялись автором и под его руководством Е. И. Кочериной, А. Ф. Макаровой, В. Е. Кореневской, Е. Н. Платовой, Р. С. Потравновой, А. И. Личмановой, А. Д. Ворониным и Яо Сянь-Лян.

В почве присутствуют механические элементы трех типов: минеральные, органические и органо-минеральные. Первое место по количеству (за исключением торфяных почв) занимают минеральные механические элементы, второе — гуматы и третье — свободные органические кислоты и полуразложившиеся органические остатки.

Все механические элементы почвы произошли в результате выветривания исходных горных пород (физического, химического, физико-химического и биологического), а также как следствие вторичных реакций при взаимодействии продуктов выветривания и биологических процессов в почве. Процессы, приводящие к образованию механических элементов в почве, протекают одновременно, но роль их на различных фазах образования механических элементов — минеральных, органических и органо-минеральных — неравноценна.

При образовании минеральных механических элементов на первых стадиях дробления породы, обладающей сравнительно малой абсолютной и относительной поверхностью, превалирует физическое и биологическое выветривание под влиянием сменных температур, механического воздействия воды, ветра, корневых систем растений, мхов, лишайников, бактерий. На этой стадии выветривания порода распадается на куски породы же (камни), потом на составляющие ее минералы и продукты их изменения.

По мере дробления, увеличения поверхности и свободной поверхностной энергии продуктов выветривания прогрессивно возрастает роль биологического фактора и химических процессов: растворение наиболее податливых элементов, окисление или восстановление их, вынос растворимых простых и сложных солей, взаимодействие высвободившихся частей с образованием новых соединений, новых минералов, окислов, вторичных алюмо- и ферросиликатов и др.

По исследованиям В. Р. Вильямса (1895), каменистая часть почв (>3 мм) обычно состоит из кусков породы (гранит, порфирит и др.) и осколков крупнозернистых минералов. В песчаных фракциях также встречаются кусочки породы, но преобладающей частью являются минералы — продукты распада исходных пород: кварц, полевые шпаты, слюды, роговая обманка и др.

По мере дробления песчаных зерен до размеров мелкого песка возрастают абсолютная и удельная поверхности песка, а значит и сфера воздействия на твердую фазу почвы воды, воздуха и биологических факторов; в составе песка остаются наиболее стойкие к химическому выветриванию минералы, главным образом кварц, тогда как менее стойкие (полевые шпаты, слюды и др.,) распадаясь, дают материал для образования пыли и илов.

В крупной пыли (0,05—0,01 мм) еще в значительном количестве присутствует кварц. В средней пыли (0,01—0,005 мм), образован-

ной из кислых пород, количество кварца резко сокращается, уступая место аморфной кремнекислоте, гидратам ее и безводным формам. Мелкая пыль (0,005—0,001 мм) по составу является переходной к илам, в которых сосредоточена большая часть продуктов химического и биологического выветривания: гидрослюды, окислы железа, алюминия, марганца и гидраты их, каолинит, фосфаты, гумусовые вещества, карбонаты кальция (в карбонатных почвах) и др.

Аналогичный процесс образования минеральных механических элементов при выветривании горных пород отмечают в своих исследованиях К. Д. Глинка (1906), Б. Б. Полюнов (1934), А. А. Роде (1938), Е. И. Кочерина (1954), А. Д. Воронин (1958), Яо Сянь-Лян (1960), А. И. Личманова (1962), подчеркивая, однако, что различным почвам свойствен и различный минералогический состав их механических элементов. Это происходит «не только в силу того, что они образовались из различных горных пород, но и в силу того, что породы эти выветривались при различных внешних условиях» (Глинка, 1906). По данным перечисленных авторов, кварц и полевые шпаты (в основном кислые плагиоклазы и кали-натровые полевые шпаты) сосредоточены преимущественно во фракциях > 0,005 мм, а слюды во фракциях 0,001—0,005 мм.

В последние десятилетия, в связи с разработкой новых методов исследования, углубленному минералогическому анализу подвергнута илистая, а в ее составе — коллоидная часть почв. В нашей стране этому вопросу большое внимание уделено А. Е. Ферсманом (1914, 1934, 1937), П. А. Земятченским (1935, 1938), И. Н. Антиповым-Каратаевым (1945), И. Д. Седлецким (1938, 1948), Н. И. Горбуновым и др. Н. И. Горбунов, используя в работе методы рентгенографического, термического и электронномикроскопического, дал характеристику минералогического состава илистой фракции различных почвенных типов СССР. По его данным * «наиболее распространены минералы монтмориллонитовой группы (монтмориллонит, бейделлит, нонтронит), каолиновой группы (каолинит, галлуазит), гидрослюдистой группы (иллит), минералы полуторных окислов (бёмит, гидраргиллит, гетит, гематит), а также аморфные вещества (аллофан, кремнекислота, опал, гидраты окисей железа и алюминия, органические и органо-минеральные вещества)» (1956). Приводим сводную таблицу из последней работы Н. И. Горбунова, любезно предоставленной нам автором (табл. 1), и термограммы илистой фракции светлокаштановой тяжелосуглинистой солон-

* По данным Горбунова и Кочериной, в илистой фракции дерново-подзолистой суглинистой почвы содержится в процентах к весу фракции: монтмориллонитовой группы 30—60 (возрастает в глубинных горизонтах); слюды 15—30; гидрослюд 15—20; кварца 5—10.

Идеальная формула монтмориллонита: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$; каолинита (сдвоенная формула для симметрии): $2\text{H}_2\text{Al}_2 \cdot \text{Si}_2\text{O}_8 \cdot \text{H}_2\text{O}$.

цеватой почвы (по А. Д. Воронину, 1959) и типичного суглинистого серозема (по Яо Сянь-Лян, 1960)*.

Как видно на графике 1, во всех горизонтах обеих почв преобладает один и тот же минерал, что доказывается сходством всех термограмм. Первый эндотермический эффект на термограммах соответствует температурам 150—180° С, при которых удаляется адсорбированная вода. Последующие эндотермические эффекты при температурах 575—595° и 845—900° С последовательно связаны с удалением конституционной воды и разрушением кристаллической решетки глинного минерала.

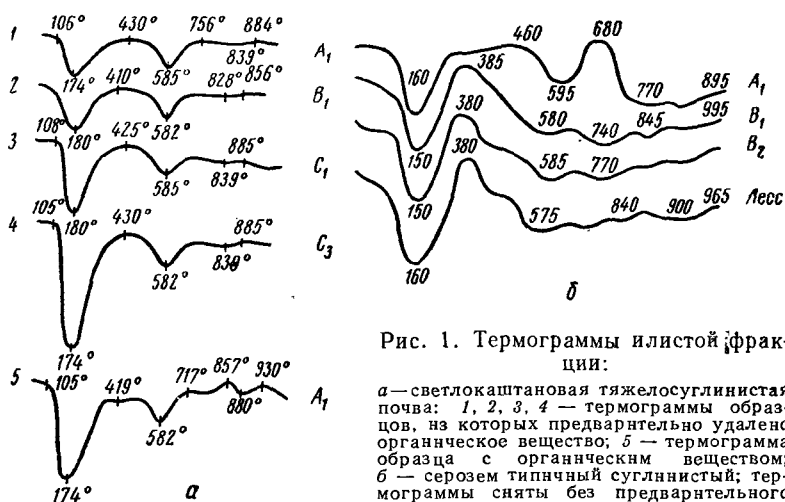


Рис. 1. Термограммы илистой фракции:

а — светлокаштановая тяжелосуглинистая почва: 1, 2, 3, 4 — термограммы образцов, из которых предварительно удалено органическое вещество; 5 — термограмма образца с органическим веществом; б — серозем типичный суглинистый; термограммы сняты без предварительного удаления из образца органического вещества

Экзотермические эффекты для образцов ила без предварительного удаления органического вещества при температурах 370—460° С и 857° С, наиболее четко выявившиеся в горизонте А₁, сопряжены с горением органического вещества. Экзотермический эффект при 885—930° С для светлокаштановой почвы и 995° С для типичного серозема при молекулярном соотношении $\frac{\text{SiO}_2}{\text{R}_2\text{O}_3}$, равном 3,1—3,2 (см. табл. 4), как и другие отмеченные эффекты, свидетельствуют о преобладании в иле характеризуемых почв гидрослюды. А. Н. Розанов на основе термограммы, аналогичной с приведенными на рисунке 1, утверждал, что в иле типичных сероземов преобладает желтый бейделит.

* Определение проведено на пирометре Курнакова (ФПК-55) платино-платинородиевой термопарой. Навеска образца — 3 г. Скорость нагрева — 12,5° С в минуту. Термограммы снимались на образцах почв без предварительного сжигания органической части почвы и со сжиганием ее.

Глинистые и сопутствующие им высокодисперсные минералы во фракции <0,001 мм главнейших типов почв (по Н. И. Горбунову)

Почвы и породы	Преобладающие или характерные для данной почвы минералы	Сопутствующие минералы
1. Дерново-подзолистые на моренных и покровных суглинках	Гидрослюда, вермикулит, минералы монтмориллонитовой группы в различных соотношениях, несилкатные аморфные полуторные окислы Гидрослюда часто преобладают. Распределение вторичных минералов неравномерное; подзолистый горизонт часто обеднен, а иллювиальный обогащен высокодисперсными минералами и полуторными окислами. Минералы крупных фракций частично разрушены	Иногда присутствует небольшая примесь каолинита, кварца, редко гетита, гиббсита
2. Дерново-подзолистые на массивно-кристаллических или хорошо дренируемых осадочных породах	Гидрослюда, вермикулит, каолинит, минералы монтмориллонитовой группы, хлориты. Распределение вторичных минералов по профилю неравномерное	Аморфные вещества, кварц
3. Серые лесные почвы на покровных суглинках	Минералы группы монтмориллонита, гидрослюда, вермикулит, иногда небольшая примесь каолинита и хлорита. Распределение вторичных минералов по профилю неравномерное	Аморфные вещества, кварц
4. Серые лесные на элювии гранита	Гидрослюда, вермикулит, каолинит, минералы монтмориллонитовой группы	Аморфные вещества, кварц
5. Черноземы на покровных и лёссовидных суглинках	Минералы монтмориллонитовой группы и гидрослюда в разных сочетаниях; первые преобладают над вторыми. Распределение вторичных минералов по профилю довольно равномерное	Аморфные вещества, кварц, иногда гетит, гиббсит
6. Черноземы на элювии массивно-кристаллических пород и красноватых глинах	Каолинит, гидрослюда, минералы монтмориллонитовой группы, иногда небольшая примесь гетита, гиббсита. Распределение вторичных минералов по профилю иногда неравномерное	

Почвы и породы	Преобладающие или характерные для данной почвы минералы	Сопутствующие минералы
7. Каштановые на суглинках и глинах	Минералы монтмориллонитовой группы и гидрослюды в разных сочетаниях; первые часто преобладают. Распределение высокодисперсных минералов по профилю иногда неравномерное	Аморфные вещества, в том числе небольшое количество полуторных окислов, редко каолинит, иногда гетит, гиббсит
8. Солонцы степной и полупустынной зон на суглинках и глинах	Гидрослюды, минералы монтмориллонитовой группы, иногда небольшая примесь каолинита. Распределение вторичных минералов по профилю неравномерное. В верхнем горизонте часто гидрослюды преобладают над монтмориллонитами, в солонцовом горизонте соотношение обратное	Аморфные вещества и полуторные окислы вместе с глинными и первичными минералами образуют конкреции, кварц, иногда гетит, гиббсит
9. Солоди среди солонцов степной и полупустынной зоны на суглинках и глинах	Минералы монтмориллонитовой группы, гидрослюды, вермикулит, аморфные вещества, небольшое количество каолинита. Распределение глинных минералов по профилю неравномерное; в верхних горизонтах их меньше, чем в более глубоких	Поверхностные горизонты обогащены кварцем и фитолитариями. Высокодисперсные минералы и полуторные окислы образуют конкреции
10. Сероземы на лёссовидных суглинках и лёссах	Минералы гидрослюдистой и монтмориллонитовой групп в разных соотношениях; часто первые в верхней части профиля преобладают; вермикулит, хлориты	Аморфные вещества, кварц, иногда гетит, гиббсит
11. Такыры водорослевые на глинистых породах	Как и сероземы, но количество монтмориллонита и аморфных веществ часто больше, чем гидрослюды. Распределение вторичных минералов по профилю различное	Аморфные вещества, кварц
12. Серо-бурые на элювии гранитов	Гидрослюды, минералы монтмориллонитовой группы, иногда небольшая примесь гетита и гиббсита	Аморфные вещества, кварц, иногда каолинит
13. Бурые лесные на суглинках и глинах	Минералы группы монтмориллонита и гидрослюды в разном соотношении, примесь каолинита, гетита, гиббсита. Распределение высокодисперсных вторичных минералов неравномерное	Аморфные вещества, в том числе полуторные окислы, кварц

Почвы и породы	Преобладающие или характерные для данной почвы минералы	Сопутствующие минералы
14. Бурые лесные на массивно-кристаллических породах	Минералы групп монтмориллонита, каолинита, гидрослюда; небольшая примесь гетита и гиббсита. Распределение вторичных высокодисперсных минералов по профилю неравномерное	Аморфные вещества, в том числе полуторные окислы, кварц
15. Желтоземы на глинистых сланцах	Смесь минералов каолининовой, монтмориллонитовой и гидрослюдистой групп, небольшая примесь гетита и гиббсита. Распределение вторичных минералов в профиле часто неравномерное	Аморфные полуторные окислы, кварц
16. Красноземы на элювии андезито-базальтов и других основных и средних пород	Минералы каолининовой группы (каолинит, галлазит) много гетита, гиббсита. Первичные минералы сильно разрушены или отсутствуют	Аморфные вещества, полуторные окислы
17. Красноземы на элювии гранитов и других кислых пород	Минералы каолининовой группы, гидрослюды, примесь гетита, гиббсита; часть первичных минералов разрушена	Аморфные вещества, небольшая примесь минералов монтмориллонитовой группы, кварц
18. Красноземы на четвертичных отложениях	Минералы каолининовой группы, большое количество гидрослюда и монтмориллонита, небольшое количество гетита, гиббсита	Аморфные вещества, кварц
19. Латеритные почвы на элювии основных и средних пород (базальтов, андезитобазальтов и др.)	Минералы каолининовой группы (каолинит, галлазит), гетит, гиббсит. Последние два минерала иногда преобладают. Первичные минералы разрушены	Примесь аморфных веществ, в том числе полуторных окислов
20. Латеритные почвы на элювии гранитов и других кислых пород	Минералы каолининовой группы, гидрослюды; примесь гетита, гиббсита часто небольшая. Часть первичных минералов разрушена	Аморфные вещества, полуторные окислы, кварц, иногда монтмориллонит

Органические механические элементы почвы образуются при разложении отмерших растений, животных и микронаселения почвы, а также в процессе жизнедеятельности организмов. В самых начальных стадиях разложения и превращения органических остатков доминирующую роль играют биологические и микробиологические процессы, в меньшей степени — процессы химические и физико-химические. Об этом, согласно говорят как старые, так и новейшие исследования, которым посвящены

монографии З. А. Ваксмана (1936), И. В. Тюрина (1937, 1949) и М. М. Кононовой (1951, 1956, 1963). Особенно наглядно стадии гумификации органических веществ показаны в работах М. М. Кононовой и ее сотрудников.

Физическое выветривание (механическое дробление) органических остатков в больших размерах наблюдается лишь в условиях сухого климата (в сухой степи, в полупустыне и пустыне), где высушенные стебли растений, а иногда и корни переносятся ветром вместе с минеральной частью почвы и истираются в труху, позже подвергающуюся биологическому разложению, воздействию химических и физико-химических процессов.

Крупные органические частицы (недоразложившиеся листья, стебли, корни и т. д.) отбираются из почвенной пробы перед анализом и, таким образом, в механическом анализе не учитываются. Гумусовые же вещества, если они предварительно не сжигаются, полностью фиксируются в анализе. Основная масса гумусовых веществ в форме гуматов, меньшая — в форме свободных гумусовых кислот попадают в илистую фракцию ($< 0,001$ мм) и фракцию мелкой пыли (0,005—0,001 мм). В составе илистой фракции гумусовые кислоты в большей своей части представлены частицами коллоидальных размеров ($< 0,2—0,1$ мк), причем, по данным К. Д. Глинки (1926), И. В. Тюрина (1949), В. В. Геммерлинга (1952), М. М. Кононовой (1951, 1956, 1963), наиболее крупными (наиболее конденсированными) в каждом почвенном типе являются частицы гуминовых кислот, а наименее конденсированными — фульвокислот, коллоидальная частица которых приближается к молекулярным размерам.

О р г а н о - м и н е р а л ь н ы е м е х а н и ч е с к и е э л е м е н т ы, или г у м а т ы, образуются в почве при взаимодействии органических и минеральных соединений. Как уже отмечалось, в основной своей массе при механическом анализе они попадают в илистую фракцию и частично в мелкую пыль. В крупных фракциях гуматы фиксируются лишь в конкрециях, например в орштейнах.

Механические элементы при определенных условиях могут слипаться, склеиваться, свертываться (коагулировать). Происходит это под влиянием поверхностной энергии, свойственной частицам и предоставленной электрическими силами (электровалентные связи), водородными связями и силами Ван-дер-Ваальса. * Наиболее эффективно означенные силы выражены для частиц коллоидальных размеров. Верхний предел коагуляции в слабых солевых растворах проявляется: по А. Аттербергу — для частиц с диаметром 20 мк (1912), по новейшим данным Е. И. Кочериной (1954) и А. И. Личмановой (1962) — для механических элементов с диаметром в 5 мк.

* Ван-дер-Ваальсовы силы — силы притяжения между незаряженными атомами или молекулами, относительно малые в сравнении с силами химическими (валентными). О водородной связи см. в главе VI.

Совокупность взаимосвязанных и «сцементированных» механических элементов образует агрегат. По предложению К. К. Гедройца (1926) условно приняты структурные отдельности с диаметром $< 0,25$ мм называть микроагрегатами, а крупнее этой величины — макроагрегатами почвы. При микроагрегатном анализе, который в современных почвенных исследованиях часто осуществляется параллельно с механическим анализом почвы, учитываются микроагрегаты диаметром $< 0,25$ мм ($0,25-0,05$; $0,05-0,01$; $0,01-0,005$; $0,005-0,001$ и $< 0,001$).

СВОЙСТВА МЕХАНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОЧВЫ

Мы отмечали, что различные по величине механические элементы почвы сильно отличаются по своему минералогическому составу. Следствием этого должен быть и неодинаковый химический состав механических элементов почвы разной крупности и различны их свойства.

Ниже приводим результаты исследования химического состава механических элементов почв, некоторых физико-химических и физических их свойств (табл. 2, 3, 4, 5 и рис. 2, 3). В таблице 2 приведены некоторые данные о валовом составе механических фракций почв и грунтов. Сопоставляются генетически различные объекты: лёсс, покровная глина, подзолистая почва, серая лесная земля, светлокаштановая почва, американские почвы. Естественно, что состав их механических фракций во многом количественно отличен. Это относится к содержанию SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 и других компонентов. Тем не менее основная закономерность в изменении состава фракций по мере уменьшения их размеров одна и та же: а) в мелких фракциях, особенно в илистой ($< 0,001-0,002$ мм), резко падает содержание SiO_2 , б) столь же и еще более резко в них возрастает содержание соединений железа, алюминия, кальция, магния, калия, натрия, а в лёссе — и извести.

Наличие этой закономерности подчеркивается в ряде работ, в том числе в исследовании С. С. Морозова (1949). Однако мы не согласны с Морозовым, когда он названную закономерность облачает в строго количественные рамки, утверждая, что даже породы, сформировавшиеся в различных почвенных зонах и в различной степени подвергшиеся выветриванию, обладают «удивительной близостью химического состава механических фракций одной и той же крупности».

Закономерно изменяются в механических фракциях почв и другие их компоненты, а также свойства. Как явствует из таблиц 5 и 6 и рисунка 2, по мере уменьшения эффективного диаметра механических элементов во фракциях в десятки раз возрастает содержание гумуса и емкость поглощения. В том же направлении увеличиваются гигроскопичность и максимальная гигроскопичность, вла-

Валовой (сокращенный) химический состав механических фракций различных почв и грунтов в % на сухую навеску *

Почва, грунт	Эффективный диаметр механических элементов, фракции, мм	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	R ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	K ₂ O+Na ₂ O	CO ₂	Автор, дата публикации
Лёсс южно-русский	Лёсс не расчленен	61,3	—	—	15,9	8,7	1,8	—	—	5,8	Мазуренко (1903)
	0,25—0,05	84,3	—	—	8,3	3,2	0,6	—	—	2,5	
	0,05—0,01	79,7	—	—	10,3	3,3	0,6	—	—	2,1	
	0,01—0,005	62,2	—	—	17,3	7,6	2,0	0,2	5,0	5,3	
	0,005—0,001	42,7	—	—	24,6	12,7	3,1	—	—	9,5	
	<0,001	39,0	—	—	29,9	14,1	5,1	0,3	6,0	10,1	
Подзолистая почва	Не расчленена	85,2	—	—	8,8	1,4	1,0	—	—	0,0	Мазуренко (1903)
	0,25—0,01	89,4	—	—	—	1,1	—	—	—	0,0	
	0,01—0,005	79,1	—	—	12,3	1,2	—	—	—	0,0	
	0,005—0,001	63,2	—	—	24,3	2,7	1,8	—	—	0,0	
	<0,001	53,7	—	—	23,2	3,4	2,3	0,3	9,0	0,0	
	1—0,2	93,9	1,2	1,6	2,8	0,4	0,5	0,05	0,8	—	
Американские почвы (усредненные данные)	0,2—0,04	94,0	1,2	2,0	3,2	0,5	0,1	0,1	1,5	—	Рассель и Галль (1924)
	0,04—0,01	89,4	1,5	5,1	6,6	0,8	0,3	0,1	2,3	—	
	0,01—0,002	74,2	5,1	13,2	18,3	1,6	0,3	0,2	4,2	—	
	<0,002	53,2	13,2	21,5	34,7	1,6	1,0	0,4	4,9	—	
	Не расчленена	66,01	6,09	15,59	21,68	—	—	—	—	—	
Глина покровная, Пензенская область	0,05—0,01	83,40	27,27	6,19	8,46	—	—	—	—	—	Морозов (1949)
	0,001—0,00054	50,38	9,74	16,40	26,14	—	—	—	—	—	
	0,00040—0,00028	48,48	10,62	17,82	28,44	—	—	—	—	—	
	0,00028—0,00022	47,10	11,12	18,65	29,77	—	—	—	—	—	
	<0,00022	43,47	11,19	19,02	30,21	—	—	—	—	—	

* В таблице С. С. Морозова расчет сделан на бескарбонатную навеску.

Таблица 3

Валовой химический состав фракций механических элементов светло-серой лесной почвы, % на прокаленное вещество
(из работы А. И. Личмановой)

Размер частиц, мм	Горизонт	Глубина, см	Гигроскопическая вода, %	Потеря при прокаливании, %	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Молекулярное отношение SiO ₂ /R ₂ O ₃
0,05—0,01	A ₁	5—15	0,29	0,71	85,91	2,45	5,92	0,84	0,57	0,92	1,44	Сл.	19,72
	A ₁ A ₂	20—30	0,26	0,71	85,71	2,88	6,35	0,92	0,54	0,88	1,58	»	17,87
	B ₁	35—45	0,25	0,61	86,47	3,20	5,83	0,94	0,54	0,90	1,45	»	18,70
	B ₂	60—70	0,25	0,72	86,57	3,43	5,72	0,96	0,53	0,98	1,43	»	18,70
0,01—0,005	A ₁	5—15	1,17	1,49	84,14	4,17	5,88	0,84	0,67	0,84	1,59	»	16,66
	A ₁ A ₂	20—30	1,52	1,40	82,20	4,50	7,43	0,86	0,84	0,79	1,46	»	13,54
	B ₁	35—45	1,28	1,24	81,68	4,65	7,92	0,91	1,09	0,80	1,48	»	12,71
	B ₂	60—70	1,18	1,51	82,01	4,85	7,83	0,94	1,18	0,82	1,45	»	12,71
0,005—0,001	A ₁	5—15	2,92	7,92	73,44	4,89	14,73	0,41	2,72	0,63	1,70	0,33	7,13
	A ₁ A ₂	20—30	2,15	5,80	71,97	5,30	16,37	0,40	2,75	0,58	1,66	0,41	6,34
	B ₁	35—45	2,22	4,33	68,18	6,26	18,59	0,42	2,45	0,56	1,71	0,26	5,15
	B ₂	60—70	2,57	4,82	68,89	6,35	17,94	0,41	2,28	0,56	1,63	0,26	5,39
<0,001	A ₁	5—15	5,97	15,12	59,86	8,32	23,05	0,51	4,03	0,34	2,36	0,44	3,65
	A ₁ A ₂	20—30	6,95	13,24	58,67	9,33	24,52	0,43	3,56	0,28	2,10	0,47	3,32
	B ₁	35—45	8,97	10,62	53,56	12,01	25,16	0,47	3,83	0,27	2,40	0,40	2,73
	B ₂	60—70	9,15	10,59	53,76	11,38	26,36	0,46	4,13	0,25	2,15	0,34	2,74
Исходная почва в целом	A ₁	5—15	2,62	5,39	81,67	4,90	7,18	1,07	1,22	0,83	1,85	0,16	13,60
	A ₁ A ₂	20—30	2,21	4,44	81,71	5,41	6,99	1,14	1,38	1,80	1,70	0,23	13,60
	B ₁	35—45	4,11	5,63	77,30	7,77	8,06	1,17	1,67	0,75	1,70	0,21	10,07
	B ₂	60—70	5,05	5,85	77,34	7,75	9,22	1,14	1,45	0,76	1,62	0,16	9,27

Валовой химический состав фракции механических элементов светлокаштановой тяжелосуглинистой солонцеватой почвы,
% на прокаленное вещество
(из работы А. Д. Воронина)

Размер фракций, мм	Горизонты, глубины, см	Гумус, %	CO ₂ карбонатов, %	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Молекуляр- ное отноше- ние SiO ₂ /R ₂ O ₃
0,1—0,05	A ₁ (0—12)	Не опреде- ляется	нет	86,78	5,98	1,02	1,42	0,31	22,2
	B ₁ (18—26)		нет	87,10	6,11	1,07	1,36	0,28	21,6
	C ₁ (60—80)		1,68	87,21	6,20	1,12	1,34	0,67	21,2
0,01—0,05	A ₁ (0—12)	0,11	0,04	84,87	7,85	1,11	1,46	нет	16,9
	B ₁ (18—26)	0,02	0,04	84,34	7,90	1,14	1,32	—	16,7
	C ₁ (60—80)	нет	4,36	84,52	7,87	1,10	1,18	0,49	16,7
0,01—0,005	A ₁ (0—12)	0,44	0,12	83,08	7,78	1,46	1,24	нет	16,2
	B ₁ (18—26)	0,28	0,68	81,38	9,49	1,90	1,18	0,51	12,9
	C ₁ (60—80)	0,13	8,73	79,95	9,64	2,18	1,28	1,31	12,4
0,005—0,001	A ₁ (0—12)	5,46	0,50	70,00	13,10	4,49	1,50	1,77	7,4
	B ₁ (18—26)	3,62	0,50	68,57	14,55	4,58	1,24	2,42	6,7
	C ₁ (60—80)	1,48	17,63	68,17	14,36	4,38	0,87	2,47	6,9
<0,001*	A ₁ (0—12)	4,38	0,40	55,32	24,27	9,90	2,21	3,06	3,1
	B ₁ (18—26)	3,17	нет	57,41	23,98	10,32	2,09	3,94	3,2
	C ₁ (60—80)	1,89	19,65	56,96	23,31	10,45	1,43	—	3,2
Исходная почва в целом	A ₁ (0—12)	2,18	0,21	77,56	11,61	3,54	—	—	9,5
	B ₁ (18—26)	1,65	0,14	74,72	14,63	5,26	—	—	7,1
	C ₁ (60—80)	0,47	6,59	68,00	12,35	4,30	—	—	7,7

Таблица 5

**Некоторые химические характеристики механических фракций
чернозема обыкновенного Воронежской области**
(Анализировал Г. Дикий в лаборатории МГУ, 1916 г.)

Эффективный диаметр механических элемен- тов анализируемых фракций, мм	Содержание фракций в почве, %	Процент от данного продукта							
		потеря при прока- ливании	перегной	остаток после обработки		SiO ₂ извлекаемая щелочам	извлекаемые 10%—HCl		
				конц. H ₂ SO ₄ и щелочью	10% HCl и щелочью		P ₂ O ₅	K ₂ O	Na ₂ O
1—0,25	6,46	0,329	—	94,32	—	—	Следы	—	—
0,25—0,01	29,98	3,54	2,51	81,68	83,28	6,71	0,026	0,166	0,02
0,01—0,001	44,36	16,36	10,95	56,44	60,01	11,90	0,104	0,196	0,039
<0,001	19,86	29,18	19,76	10,34	14,15	28,30	0,332	1,062	0,03
Почва не расчленена	—	12,92	9,75	57,01	—	14,62	0,127	0,336	0,002

гоемкость, капиллярность, хотя быстрота передвижения воды по капиллярам, в связи с уменьшением активных пор в капиллярах, замедляется в десятки и сотни раз (табл. 6). В том же направлении падает водопроницаемость фракций. Что касается пластичности и липкости фракций, а также способности их набухать, то эти свойства во фракциях $>0,005$ мм почти вовсе отсутствуют, а наиболее сильно выражены в иловой фракции. Аналогичные выводы о некоторых физических свойствах механических элементов сделали ранее А. Аттерберг (Atterberg, 1912), В. В. Охотин (1933), П. А. Земятченский (1935), П. Ф. Мельников (1940, 1949). Отмеченные закономерности в изменении свойств механических элементов подтверждены также А. Д. Ворониным на почвах светлокаштанового комплекса (1959), Яо Сянь-Лян на типичных сероземах (1960) и А. И. Личмановой на серых лесных землях (1962).

Е. И. Кочериной и А. И. Личмановой выполнены тщательные исследования коагуляционной способности механических элементов почв различной крупности. Отчетливо (в слабых солевых растворах) такой способностью обладают частицы $<0,001$ мм (ил); менее устойчиво и не во всех образцах она проявляется во фракции мелкой пыли (0,005—0,001 мм)*. Данное наблюдение Е. И. Кочериной и А. И. Личмановой важно при решении вопросов структурообразования в почве. Согласно их заключению, цементирующей способ-

* Как известно, Аттерберг, впервые исследовавший эту способность почвенных механических элементов, верхним пределом частиц, способных коагулировать в слабых солевых растворах, считал механические элементы в 0,02 мм.

Некоторые химические и физические свойства почвы и отдельных механических ее фракций
Дерново-подзолистая легкосуглинистая крупнопылеватая почва. Калининский район Московской области. Лес.
 (данные Е. И. Кочериной, 1954 г.)

Горизонт, глубина, см	Эффективный диаметр, мм	Гумус, %	Емкость поглощения, мг-экв	Удельный вес твердой фазы	Объемный вес, г/см ³	В процентах веса почвы или отдельной фракции					Набухание, % объема	Время поднятия воды на высоту 5 см, мин
						нижняя граница тесноты	предел раскатывания в шпур	число пластичности	максимальная гигроскопичность	влажностность		
A ₁ —3—13	Образец не расчленен	2,93	8,2	2,62	1,27	59,29	28,23	31,06	4,85	40,69	2,10	58
	0,10—0,05	Нет	Нет	2,66	Не опред.	Нет	Нет	Нет	0,3	Не опред.	Нет	Нет
	0,05—0,01	0,43	1,4	2,66	1,49	»	»	»	0,42	28,34	»	9
	0,01—0,005	1,48	3,2	2,62	1,20	»	»	»	1,39	42,42	»	10
	0,005—0,001	5,37	14,4	2,59	0,92	59,20	42,68	16,52	6,40	65,10	2,20	48
	<0,001	6,42	40,5	2,59	1,03	87,11	52,87	34,24	14,66	69,49	8,08	568
A ₂ —14—26	Образец не расчленен	1,30	6,9	2,64	1,41	38,29	23,53	14,76	4,15	39,09	1,45	55
	0,10—0,05	Нет	Нет	2,68	Не опред.	Нет	Нет	Нет	0,64*	Не опред.	Нет	Не опред.
	0,05—0,01	0,18	0,8	2,65	1,48	»	»	»	0,43	28,43	»	8
	0,01—0,005	0,43	1,9	2,63	1,26	»	»	»	0,88	39,30	0,52	9
	0,005—0,001	2,83	11,9	2,59	0,93	59,29	41,45	17,84	5,38	59,73	0,95	56
	<0,001	3,97	35,2	2,63	1,04	80,76	46,97	33,79	16,10	66,61	5,66	875
B ₁ —35—45	Образец не расчленен	0,47	11,6	2,65	1,43	30,40	20,58	9,82	6,54	33,00	2,07	54
	0,10—0,05	Нет	Нет	2,67	Не опред.	Нет	Нет	Нет	0,84*	Не опред.	Нет	Нет
	0,05—0,01	0,09	1,0	2,65	1,47	»	»	»	0,42	29,36	»	9
	0,01—0,005	0,13	2,1	2,65	1,23	»	»	»	0,66	40,61	»	10
	0,005—0,001	0,57	7,9	2,63	0,96	44,44	34,28	10,16	2,47	58,46	»	74
	<0,001	1,47	43,9	2,69	1,07	89,39	48,03	41,36	20,29	63,79	12,80	810
B ₂ —65—75	Образец не расчленен	0,27	17,7	2,68	1,48	45,58	20,32	25,26	8,93	33,56	4,06	69
	0,10—0,05	Нет	Нет	2,68	Не опред.	Нет	Нет	Нет	0,94*	Не опред.	Нет	Нет
	0,05—0,01	0,65	1,0	2,67	1,51	»	»	»	0,43	28,83	»	8
	0,01—0,005	0,14	1,8	2,68	1,26	»	»	»	0,74	38,57	»	14
	0,005—0,001	0,30	7,2	2,71	1,08	44,64	30,37	14,27	2,52	45,66	»	92
	<0,001	0,85	53,3	2,70	1,07	92,60	42,14	50,19	22,58	63,27	12,53	1200
B _{2C} —100—110	Образец не расчленен	Не учт.	22,5	2,71	1,41	33,27	10,22	14,05	9,59	30,20	2,23	—
	0,10—0,05	»	Нет	2,69	Не опред.	Нет	Нет	Нет	0,26	Не опред.	Нет	—
	0,05—0,01	0,09	1,3	2,69	1,44	»	»	»	0,49	28,97	»	7
	0,01—0,005	0,13	2,4	2,67	1,25	»	»	»	0,73	39,71	»	14
	0,005—0,001	0,31	11,4	2,72	1,02	42,13	28,48	13,65	2,86	47,87	»	92
	<0,001	1,15	63,7	2,74	1,02	88,01	41,88	46,13	25,92	63,27	11,87	680

* Максимальная гигроскопичность во фракции 0,1—0,05 мм больше, нежели во фракции 0,05—0,01 мм, что объясняется большим содержанием орштейнов в первой из этих двух фракций.

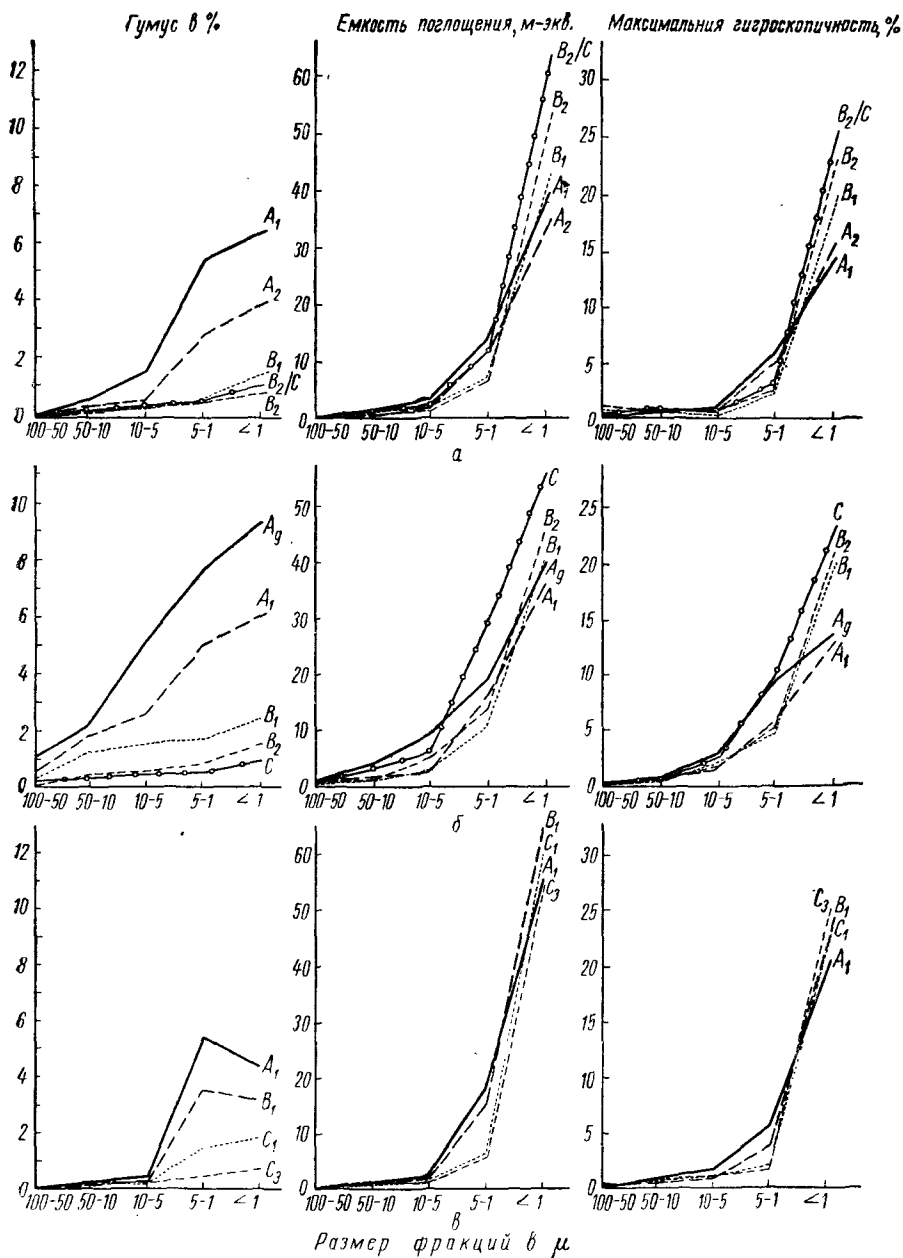


Рис. 2. Некоторые характеристики механических элементов почв:

а — дерново-подзолистая суглинистая почва; б — светло-серая суглинистая лесная земля; в — светлокаштановая солонцеватая суглинистая почва

ностью обладают лишь механические элементы $<0,005$ и особенно $<0,001$ мм.

Отмеченные нами закономерности повторяются во всех обследованных образцах, но количественная выраженность их в различных почвах и горизонтах почв разная *. Например, при сравнении емкости поглощения мелкого песка и ила (табл. 6) выявляется увеличение этой способности почвы в илистой фракции: для горизонта A_1 —в 29 раз; для A_2 —в 48 раз; для B_1 в 43,9; для B_2 — в 53,3 раза.

Заслуживает также быть отмеченным, что в дерново-подзолистой почве и серой лесной земле наибольшее содержание гумуса найдено в илистой фракции ($<0,001$ мм), а в почвах светлокаштановой, в солонце и в лугово-каштановой наиболее богатой гумусом оказывается фракция мелкой пыли (0,005—0,001 мм).

Особое место среди характеристик механических фракций почвы, приведенных в таблице Е. И. Кочериной, занимают объемный вес и удельный вес твердой фазы почвы.

Объемный вес (в $г/см^3$) механических фракций уменьшается по мере нарастающей мелкоземистости материала. Это естественно для «насыпного» грунта. В случае раздельночастичного строения песчаные зерна легче и скорее упаковываются, нежели пыль или ил. В природной обстановке пахотный слой песчаной почвы, по сравнению с пахотным слоем почвы суглинистой или глинистой, также обычно обладает большим объемным весом и в соответствии с этим меньшей порозностью.

Своеобразна закономерность изменения удельного веса твердой фазы отдельных фракций (см. табл. 6 и рис. 3). В перегнойно-аккумулятивном горизонте эта величина уменьшается по мере движения от песчаных зерен к пыли и илу. В иллювиальных горизонтах, наоборот, наибольшим удельным весом обладают мелкая пыль (0,005—0,001 мм) и особенно ил ($<0,001$ мм). В первом случае (в горизонте A_1) сказывается обогащенность мелкой пыли

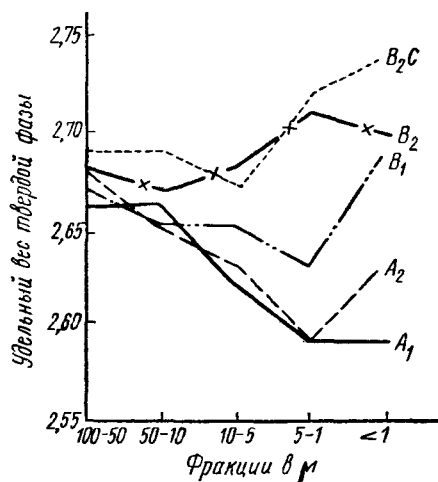


Рис. 3. Удельный вес твердой фазы механических фракций дерново-подзолистой суглинистой иловато-пылевой почвы

* Исследование Е. И. Кочериной, насколько нам известно, является первым, в котором свойства механических элементов изучены в почвенном профиле применительно ко всем горизонтам почвы. Позже и для других почв это сделано А. Д. Ворониным, Яо Сянь-Лян и А. И. Личмановой.

и ила гумусом. В иллювиальном горизонте количество гумуса в илистой фракции также наибольшее, но абсолютно оно невелико, кроме того, эта фракция здесь богаче тяжелыми минералами и аморфными соединениями железистого типа.

Значительная изменчивость удельного веса твердой фазы различных фракций почвы является фактором, весьма осложняющим точность механического анализа почвы. Как увидим далее, удельный вес твердой фазы почвы входит обязательным членом в формулы вычисления скорости падения механических элементов почвы в жидкостях. Мы вводим его в формулу единой величиной для каждого анализируемого образца почвы, тогда как, строго говоря, его следовало бы давать соответственно каждой фракции анализируемого образца, что практически весьма затруднительно.

Как показано в приведенных исследованиях, все свойства механических элементов почв: химические, физико-химические, физические и физико-механические — закономерно изменяются в связи с их размерами. Отсюда понятно значение характера механического состава почв для оценки их свойств и главного свойства — плодородия, а также внимание, которое уделялось и уделяется учеными и практиками вопросу классификации механических элементов почв и грунтов от истоков земледелия до наших дней.

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОЧВ ПО ИХ КРУПНОСТИ

Указания на значение механического состава почв при оценке их плодородия мы находим у М. В. Ломоносова (1763), у И. Комова (1789), Дэви (Devu, 1813), Шумахера (Schumacher, 1864) и многих других.

В настоящее время в почвоведении имеются многие десятки классификаций механических элементов почвы по их крупности. Мы остановимся лишь на некоторых из них, чтобы охарактеризовать историю развития вопроса и современное его состояние в почвоведении различных стран. В таблице 7 приведены как старые классификации, так и первые наиболее подробные классификации (А. А. Фадеева, В. Р. Вильямса, А. Н. Сабанина), легшие в основу большинства современных.

Как видно из данных таблицы, первые классификации (Шене, Лоренца, Осборна, Докучаева) были мало дифференцированными. В них выделяется от четырех до шести различных фракций почвы. Авторы этих классификаций располагали еще ограниченными знаниями о свойствах механических элементов и строили свои классификации преимущественно интуитивно, исходя из практики сельского хозяйства, в которой представление о легких (теплых) и тяжелых (холодных, но богатых питательными веществами) почвах уходит к истокам земледелия. Тем не менее следует отметить, что в приведенных старых классификациях основные по крупности фракции

Таблица 7

Классификация механических элементов почвы по их крупности

Эффективный диаметр механических элементов почвы, мм	1867 г., Шене	1881 г., Лоренц	1886 г., Осборн	1886 г., Докучаев	1889 г., Фадеев	1893 г., Вильямс	1903 г., Сабанин										
>10	Скелет	Камни и хрящ	Крупнозем	Хрящ	Камни и галька		Камни										
10—7					Хрящ и гравий	Хрящ и гравий	Хрящ и гальки	крупный									
7—5									крупный	средний							
5—3											мелкий						
3—2	Песок	крупный	Песок	крупный	Песок	крупный											
2—1							крупный	Песок	крупный	средний	Песок	средний					
1—0,5													средний	тонкий	мелкий	Пыль	Ил
0,5—0,25																	
0,25—0,05							Пыль	Ил									
0,05—0,01	Глина	Глина	Пыль и глина	Ил или глина	Ил	Пыль			крупная								
0,01—0,005							крупная	Пыль		средняя	Пыль	средняя					
0,005—0,001													мелкая	ил	ил		
<0,001	тонкий	ил															

почвы — каменистая часть, песок, пыль и глина — выделяются весьма согласно. Близки и границы размеров этих фракций в миллиметрах, а весьма важная для классификации почв по механическому составу граница ($<0,01$ мм) даже полностью в них совпадает. Отсутствует, однако, согласованность в понятиях терминов: пыль, ил, глина. Так, ил по Осборну соответствует пыли по Лоренцу и Докучаеву. У него же ил крупнее пыли. Подобные разногласия в терминологии (см. табл. 8 и 10) свойственны и современным классификациям механических элементов почвы. Наиболее стройной из старых классификаций является классификация Е. Шене (1867) — профессора Петровской сельскохозяйственной академии. Она основана на результатах механического анализа почвы в текучей воде на приборе конструкции того же автора.

При первых наиболее обстоятельных исследованиях почв России в прошлом столетии, а именно при изучении почвенного покрова Нижегородской губернии под руководством В. В. Докучаева (1886 г.), использовалась классификация механических элементов, близкая по характеру к шкале Лоренца (см. табл. 7).

Первая подробная шкала механических элементов почвы, соответствующая современным классификациям, была разработана А. А. Фадеевым и использовалась в курсе его лекций для студентов Петровской сельскохозяйственной академии (1890). В его классификации выделяется 12 фракций механических элементов.

Классификация Фадеева была видоизменена Вильямсом. Он упростил подразделение каменистой части почвы, предложив две градации вместо четырех, расширил границы для пыли ($0,25—0,0015$ мм), тем самым переместив границу для фракции ила с $<0,01$ до $<0,0015$ мм. В результате отмеченных изменений классификация стала более совершенной (в понимании фракций пыли и ила) и компактной: в ней 9 классификационных подразделений.

Дальнейшим изменением классификация Фадеева — Вильямса подверглась в работе А. Н. Сабанина (см. табл. 7). Он восстановил классификацию каменистой части почвы по Фадееву. Нижнюю (меньшую) границу для фракции песка принял такой, как в классификациях Шене и Докучаева, тем самым ограничив фракцию пыли рамками $0,05—0,001$ мм. В классификации Сабанина 11 фракций механических элементов. Эта классификация получила широкое распространение в почвенных работах в России.

Из описанных классификаций наиболее дробными являются классификации Фадеева (12 фракций) и Сабанина (11 фракций). Однако было бы неправильным предполагать, что классификация тем лучше, чем она более детальна, и что нужно стремиться к дальнейшему дроблению классификации механических фракций почвы. В этом вопросе есть свой оптимум: слишком краткие классификации (например, у Осборна — четыре фракции) неполно характеризуют свойства почвы, а излишне детальные классификации затрудняют пользование ими. Ведь классификации предназначены не только

Таблица 8

Современные классификации механических элементов почвы, наиболее распространенные в СССР (1937—1957 гг.)

Эффективный диаметр механических элементов почвы, мм	Качинский, 1937 г.		Качинский, 1957 г.		Охотин, 1940 г.		
>20	Камни		Камни		Хряц и гравий	крупный	
20—10						средний	
10—7						мелкий	
7—3						очень мелкий	
3—2	Песок	крупный	Гравий		Песок	крупный	
2—1		средний				средний	
1—0,5		мелкий	Песок	крупный		мелкий	
0,5—0,25				средний		песчано-пылеватый	
0,25—0,05				мелкий			
0,05—0,01	Пыль	крупная	Пыль	крупная	Пыль		
0,01—0,005		средняя		средняя	Ил		
0,005—0,002		мелкая		мелкая	Глина	грубая	
0,002—0,001	Ил		Ил	грубый		тонкая	
0,001—0,0005				тонкий			
0,0005—0,0001				коллоиды			
<0,0001							
>0,01	Физический песок		Физический песок		—		
<0,01	Физическая глина		Физическая глина				

для научных работников, но и для практиков. Наряду с содержательностью, они должны быть достаточно просты и легко запоминаемы. Мы считаем, что дробность современных классификаций механических элементов почвы, выделяемых при обычном механическом анализе, достаточна. В дальнейшем необходимо уточнение в них границ механических фракций и научное (с позиций химии, физико-химии, физики и физико-механики почв) их обоснование.

В работах Н. А. Качинского по механическому анализу почвы в 1937 г. были приняты за основу номенклатурные подразделения механических фракций почвы по Сабанину (табл. 7, 8): названия фракций оставлены по возможности привычные для советского почвоведства. Вместе с тем следует помнить, что это сходство только формальное, так как названные фракции почв в методике Сабанина выделяются с принятием скоростей падения механических элементов почвы в воде по формуле Шене (1867), а в методе Качинского — по формуле Стокса (1937, 1943, 1958), следствием этого является различие в величинах одноименных механических элементов, достигающее 100% и более. Это замечание остается справедливым и при оценке величин механических элементов почвы, выделяемых по методу Вильямса (см. табл. 9).

Таблица 9

Величины механических элементов почвы применительно к скоростям падения их по различным формулам *

Вильямс—Стокс			Шене—Стокс		
Скорости падения механических элементов почвы в воде, мм/сек (по Вильямсу)	Диаметр частиц, мм (по Вильямсу)	Диаметр частиц для тех же скоростей по формуле Стокса при 15° С и при удельном весе частиц 2,65	Скорости падения механических элементов почвы в воде, мм/сек (по Шене)	Диаметр частиц, мм (по Шене)	Диаметр частиц для тех же скоростей по формуле Стокса при 15° С и при удельном весе частиц 2,65
0,33	0,010	0,0200	0,1650	0,010	0,014
0,0046	0,005	0,0024	0,0560	0,005	0,008
0,0012	0,001	0,0012	0,0044	0,001	0,002

* См. также: С. В. Астапов. Очерки по изучению физических свойств почвы, 1928.

Кроме того, нельзя упускать из виду, что величины механических элементов, отмучивавшихся в анализах по Шене, Вильямсу и Сабанину, не имели строго определенных размеров, так как в этих анализах не принимались поправки на вязкость воды при различных температурах.

По сравнению с классификацией Сабанина в последней классификации упрощено подразделение каменистой части почвы: вместо четырех фракций выделяется одна (каменистая часть почвы — фракции > 3 мм). Это сократило в классификационной шкале количество фракций с 11 до 8. По аналогии с предложением Н. М. Сибирцева (1899, 1901), частицы $> 0,01$ мм объединены под названием «физический песок» и частицы $< 0,01$ мм — под названием «физическая глина».

Предложенная Качинским в 1937 г. классификация широко привилась в почвенных исследованиях СССР. Она также опубликована в различных странах: в Болгарии (1947, 1951), Югославии (1947), Венгрии (1949, 1952), Польше (1950), Румынии (1951), Китае (1954), Японии (1954), ГДР (1955), во Франции и Англии (1956), в США (1961).

Учитывая данные, накопленные в лабораториях отдела физики и технологии почв Почвенного института им. В. В. Докучаева АН СССР до 1961 г. и кафедры физики и мелиорации почв МГУ, а также материал производственного опыта, в настоящее время предлагаем несколько видоизменить классификацию механических элементов почвы в сторону ее уточнения, однако таким образом, чтобы не нарушить преемственность новых работ со старыми. Изменения сводятся к уточнению фракций крупного и среднего песка. Как известно, во фракцию крупного песка Фадеев, Вильямс, Сабанин, а также Качинский относили механические элементы с диаметром от 1 до 3 мм. В то же время каждый почвовед знает, что такого «песка» в природе, как породы, не существует. Существуют минеральные зерна такой крупности, которые иногда, особенно в аллювиальных отложениях, скапливаются в больших количествах как примесь к другим, более мелким механическим элементам, но такой примесью могут быть и камни любых размеров. Кроме того, свойства механических элементов с диаметром 1—3 мм не соответствуют свойствам песка.

Пески природные, обладая значительной водопроницаемостью, в то же время отличаются заметной влагоемкостью (в 5—10—15%) и капиллярными свойствами. В соответствии с этим они пригодны для выращивания культурных полевых растений и лесных, особенно сосны.

Совершенно иными свойствами обладают фракции из механических элементов с диаметром $> 1—3$ мм. Водопроницаемость таких фракций — провальная. Влагоемкость их и капиллярные свойства ничтожно малы (влагоемкость $< 3\%$). По своим свойствам они переходны от почвенного мелкозема к каменистой части. В то же время — это не камни. Находясь в породе или в пахотном слое, они огрубляют их, но, даже в случае высокого содержания, не препятствуют сельскохозяйственному освоению территории.

Мы считаем целесообразным фракцию с диаметром зерен от 1 до 3 мм выделить как гравий. В соответствии с этим фракции песка изменяются так: песок крупный 1—0,5 мм; песок средний — 0,5—0,25 мм; песок мелкий остается в прежних пределах — 0,25—0,05 мм.

Данное изменение классификации не нарушает преемственности в работах: ведь фракция 1—3 мм никогда не бывает основной даже в песках. В то же время при заметной примеси к другим фракциям (к глине, к пескам) ее нужно будет оттенять термином «гравелистый»: песок гравелистый, суглинок гравелистый и т. д.

Это видоизменение классификации приблизит ее к некоторым зарубежным классификациям механических элементов почвы и в первую очередь к британской и американской классификациям, что в данном случае является обоснованным и полезным (см. табл. 8 и 10).

С принятием указанного изменения наша классификация для собственно механических анализов будет включать 9 фракций.

В некоторых специальных исследованиях требуется расчленять и фракцию ила ($<0,001$ мм). Для этих целей мы дифференцируем фракцию ила на три части: ил грубый, ил тонкий и коллоиды (см. табл. 8).

Как и прежде, оставляем подразделение:

а) фракции $>0,01$ мм — «физический» песок;

б) фракция $<0,01$ мм — «физическая» глина.

Поскольку свойства механических элементов зависят не только от их крупности, но также от формы элемента и его химического состава, постольку совершенно очевидна необходимость изучения свойств механических элементов различных почв и геологических напластований.

Пески кварцевые, слюдяные или карбонатные обладают различными свойствами. Различная степень глинистости наблюдается в «физической» глине подзолистой почвы, чернозема, солонца и т. д. Знание свойств механических элементов различных почв и грунтов позволит дифференцированно подойти к классификации почв по механическому составу.

В грунтоведческих работах в СССР часто применяется классификация механических элементов по Охотину (см. табл. 8). В ней 12 номенклатурных подразделений, из которых 8 падает на песок, хрящ и гравий и лишь 4 на все остальные тонкие фракции. Подробная классификация песка, хряща и гравия вызвана тем, что эти фракции грунтов являются обязательными, а иногда и основными в различных строительных материалах и работах: в производстве бетона, при постройке дорог, фундаментов сооружений и пр.

Почвоведы не удовлетворяют в классификации Охотина суженое понятие пыли (0,05—0,01 мм) и противопоставление «ила» глине (причем «ил» в классификации Охотина оказывается более

грубым, чем глина). Такое понятие об «иле» неудачно позаимствовано Охотиным у Осборна.

В таблице 10 приведены распространенные зарубежные классификации.

Как можно видеть, степень дифференциации их примерно та же, что и в наших классификациях. Наиболее элементарной среди них является немецкая классификация довоенного периода (1930)*, а наиболее подробной — классификация Аттерберга (Atterberg, 1912). Из зарубежных авторов Аттерберг особенно много сделал в вопросе изучения физико-химических, физических и физико-механических свойств механических элементов почвы. Ему принадлежат первые эксперименты по установлению верхних границ броуновского движения для почвенных частиц и коагуляции их в слабых солевых растворах, детальное изучение водных свойств и пластичности механических фракций почвы. В частности, на основе этих работ им введены понятия о верхней и нижней границах текучести почвы и грунта, о границах клейкости и скатывания в шнур. Эти «константы», как и основанная на них характеристика пластичности почв и грунтов, получили международное распространение, в том числе в почвоведении и грунтоведении Советского Союза.

Отдавая должное классификации Аттерберга, мы должны, однако, помнить, что она разработана на ограниченном количестве почв, распространенных в Швеции, поэтому характеристики Аттерберга и наши иногда существенно расходятся. Мы уже отмечали, что по Аттербергу верхний предел коагуляции механических элементов в слабых солевых растворах соответствует крупности частиц 0,02 мм, тогда как по нашим данным он лежит в пределах 0,005—0,001 мм. Глинистые свойства частиц Аттерберг обнаруживает во фракциях $< 0,02$ мм; мы к физической глине относим частицы $< 0,01$ мм. Резко выраженная пластичность фракций по Аттербергу присуща частицам $< 0,002$ мм. По данным В. М. Безрука (1935), П. Ф. Мельникова (1940), Е. И. Кочериной (1954) и А. И. Личмановой (1962), она смещается до величины частиц $< 0,001$ мм и т. д.

Границы между фракциями каменистой части почвы, песка, пыли, ила, коллоидов в классификации Аттерберга приблизительно соответствуют границам в нашей классификации. Однако в классификации Аттерберга обращает на себя внимание искусственность границ между фракциями, построенная на чередовании цифр 6 и 2. Создается впечатление, что все свойства механических фракций изменяются на этих «магических» границах. Конечно, в природе такой закономерности нет. Нам кажется более естественным и гибким построение наших классификаций, как и ряда зарубежных,

* В современных немецких руководствах Шмальфуса (Schmalfuss, 1950), Ремера-Шеффера (Roemer-Scheffer, 1959) и других используется сокращенная классификация Аттерберга.

Современные зарубежные классификации механических элементов почвы

Таблица 10

Эффективный диаметр механических элементов почвы, мм	Польша, государственная классификация	Германия, с.-х. опытные станции, 1930 г.	Британия, Почвенное бюро	США, Почвенное бюро	Индия, Пури	Эффективный диаметр механических элементов почвы, мм	Аттерберг	Международная
>5	Гравий	Камни	Гравий	Гравий	Каменистая часть	>6	Гравий	Гравий
5—2		Гравий				6—2		
2—1	Песок	Песок	Мелкий гравий	Мелкий гравий	крупный	2—0,6	Песок	Песок
1—0,5		крупный				0,6—0,2		
0,5—0,25		средний				0,2—0,06		
0,25—0,20		мелкий				0,06—0,02		
0,20—0,10	Пыль	Песок мелкий и очень мелкий, минеральная пыль, глина	Пыль	Пыль	средний	0,02—0,006	Пыль	Пыль
0,10—0,05						0,006—0,002		
0,05—0,02						0,002—0,0006	Глина, ил коллоидный	Глина
0,02—0,01						0,0006—0,0002		
0,01—0,006	Ил	Песок мелкий и очень мелкий, минеральная пыль, глина	Тонкая пыль	Глина	грубая	<0,0002	Коллоиды	Коллоиды
0,006—0,005								
0,005—0,002								
0,002—0,001								
<0,001	Коллоиды		Глина	Глина	Глина			
					Ультраглина			

с использованием дифференцированных границ, выраженных цифрами 1, 2, 3, 5, 25.

Классификации, применяемые в Британии и США (они почти идентичны), в общем, близки к нашей классификации, однако наиболее тонкая фракция, выделяемая в них ($< 0,005 \text{ мм}$), соответствует нашей мелкой пыли плюс ил (см. табл. 10).

В таблице 10 рядом с классификацией Аттерберга приведена «международная» классификация механических элементов почвы. Нетрудно видеть, что она представляет собой сильно сокращенную и упрощенную классификацию Аттерберга. В ней лишь 6 членов, и изменяются они по величине зерен в порядке десятичной системы: каждая последующая граница в 10 раз меньше предыдущей. Эта шкала была принята как «международная» на втором международном конгрессе почвоведов (1930 г.).

Цель авторов шкалы очевидна: сделать ее легко запоминающейся и доступной для всех. Но очевидна и чрезмерная искусственность этой шкалы. Если мы сомневались в закономерности изменений свойств механических элементов почвы согласно классификации Аттерберга, построенной на сочетании цифр 6 и 2, то очевидно, что эти изменения нельзя уложить в шкалу, где новые свойства предполагаются обязательно при увеличении или уменьшении размеров зерен в 10 раз. Чрезмерная искусственность этой шкалы исключила возможность для нее стать международной, хотя в некоторых странах она применяется, например во Франции (1956), в Румынии (1955), в ФРГ (1959) и в некоторых других.

В 1922 г. К. К. Гедройц, придавая исключительное значение коллоидной фракции почвы, впервые поставил вопрос об ультрамеханическом анализе. Наша задача в данном учебнике ограничивается рамками собственно механического анализа: от каменистой части почвы ($> 3 \text{ мм}$) до ила ($< 0,001 \text{ мм}$). Однако считаем целесообразным в заключение настоящей главы отметить некоторые свойства суспензий, «коллоидов» и «кристаллоидов» (табл. 11).

Попутно заметим, что понятие о «коллоидах» и «кристаллоидах» введено Грэмом (1861).

Коллоидами, которые нас в данном случае особенно интересуют, он считал специфические вещества, как крахмал, альбумин, желатина, клей. Само слово «коллоид» произведено от латинского слова *colla*, что значит клей. После исследований Оствальда (1909 г. и более поздние) эта точка зрения Грэма была оставлена. На основе современных работ правильнее говорить не о «коллоидах», а о коллоидном состоянии вещества.

В коллоидное состояние могут быть переведены многие минералы и другие вещества. Необходимо лишь соблюдение следующих условий: а) вещество (дисперсная фаза) должно быть минимально растворимо в растворителе — в дисперсионной среде (в нашем случае — в жидкой фазе); б) дисперсная фаза должна быть раздроблена

Некоторые характеристики суспензий, коллоидов и кристаллоидов

Размеры частиц	Название	С водой образуется	Свойства
250 мк — 0,1 мк. Видимые невооруженным глазом и видимые в микроскоп	Суспензии или микроны	Водная взвесь или дисперсия	Частью видимы невооруженным глазом. Все просматриваются в микроскоп. Верхняя граница броуновского движения около 1—2 м. Верхняя граница коагуляции в слабых солевых растворах и граница пластичности около 5 мк. Набухаемость слабая. Не проходят сквозь бумажные фильтры
0,1 мк — 5 — 1 м.к. Ультрамикроскопические	«Коллоиды»: субмикроны и амикроны	Коллоидный раствор — золь или дисперсoid	Субмикроны видимы в ультрамикроскоп отдельными светящимися точками, амикроны (наиболее мелкие) дают в ультрамикроскопе диффузный световой эффект в виде конуса Тиндала (1869). Полностью обнаруживаются при помощи электронного микроскопа. Все подвержены броуновскому движению и процессу коагуляции, нарастающими с уменьшением частиц. Коагулируя, переходят из золя в гель (сгусток). Пластичность и набухаемость высокие. Проходят сквозь бумажные фильтры, но обычно не проходят сквозь растительные и животные перепонки
5—1 м.к Аналитические	«Кристаллоиды»	Истинный молекулярный раствор или дисперсид	Молекулы и атомы. В ультрамикроскоп не видимы. Электронным микроскопом не обнаруживаются. Обнаруживаются в радиоактивном состоянии с помощью фотометрии. Проходят сквозь бумажные фильтры, растительные и животные перепонки. Форма вещества доступная растениям и животным. Перед механическим анализом из почвы отмываются или учитываются в виде плотного остатка при выпаривании суспензии

до размеров $< 0,1$ мк; в) дисперсная фаза (ее поверхность) должна находиться в активном взаимодействии с дисперсионной средой.

В современной химии изменено также понятие Грэма о «кристаллоидах», под которыми сейчас следует понимать истинные, молекулярные растворы.

Употребляя в дальнейшем названия «коллоиды» и «кристаллоиды», мы пользуемся этими терминами лишь как историческими, вкладывая в них современный смысл согласно сделанным выше замечаниям.

ПОДГОТОВКА ПОЧВ К МИКРОАГРЕГАТНОМУ И МЕХАНИЧЕСКОМУ АНАЛИЗАМ

Микроагрегатный анализ

В почвенной литературе до 30-х годов понятие о микроагрегатном анализе почв не встречается. Все упомянутые во второй главе анализы почв и классификации механических элементов относились к категории механических анализов. Разделение анализов и составов почв на микроагрегатные и механические стало привлекать внимание почвоведов после работы Гедройца об ультрамеханическом составе почв (1922) и окончательно оформилось на Втором международном конгрессе почвоведов (1930 г.), когда были рекомендованы для международной практики: 1) «международный» метод «А» с максимальным диспергированием почвенной пробы перед анализом (механический анализ) и 2) «международный» метод «В» — с более слабым диспергированием пробы перед анализом (микроагрегатный анализ).

Если обратимся к более старым методам анализа почв, как методы Шене, Копецкого, Фадеева, Вильямса, Сабанина и других, в которых химическая подготовка образцов почвы к анализам отсутствовала, то должны будем сделать заключение, что в данном случае имело место, особенно для карбонатных почв, применение микроагрегатного анализа, так как полного диспергирования почв в анализах не достигалось. Правда, некоторые из этих методов, как, например, метод Сабанина, не отвечают и современному понятию о микроагрегатном анализе. Применяя кипячение и повторное растирание образцов, автор разрушал значительную часть микроагрегатов (в подзолистых почвах — почти нацело), но полного диспергирования почв, особенно карбонатных и красноземов, не получал.

— В наше время не только не отрицается значимость микроагрегатного анализа, но считается обязательным для агрономической характеристики почв. Как будет показано далее, сопоставление данных микроагрегатного и механического анализов дает представление о потенциальной способности почв к оструктуриванию и о степени дисперсности почв в их природном состоянии.

Авторы различных методов микроагрегатных анализов сходятся на том, что в результате подобных анализов нужно выявить сумму наиболее стойких микроагрегатов в почве. Однако подход к диспергированию почвы весьма различен. Сопоставим лишь три метода подготовки почв к микроагрегатному анализу, характеризующие возможный диапазон расхождений в этом вопросе (табл. 12).

Таблица 12

Подготовка почв к микроагрегатному анализу

Метод	Диаметр отверстий сита для сухого просеивания почвы, мм	Навеска почвы для анализа, г	Химическое воздействие	Механическое и термическое воздействие	Диаметр отверстий сита при мокром просеивании, мм	Техника анализа
«Международный» В	2	10—15	Обработка NH_4OH	Размачивание 24 ч в 200 см ³ дистиллированной воды. Кипячение 2 часа или растирание с последующим встряхиванием (200 толчков в минуту)	Отсутствует	Декантация
Астапова	10, 5, 3, 1	20—30	Отсутствует	Размачивание от 6 до 24 ч при смачивании почвы до соответствующей ей влагоемкости. Десятикратное оборачивание цилиндра перед анализом	Отсутствует	Пипетирование
Качинского	1	10—30	Отсутствует	Размачивание 24 ч в 250 см ³ дистиллированной воды. Встряхивание 2 ч, 200 толчков в минуту	0,25	Пипетирование

Как видно из данных таблицы, наиболее сильное воздействие на почву для отмучивания частиц $<0,002$ мм рекомендуется в «международном» методе «В». По сути дела — это механический анализ, в котором, наряду с кипячением и растиранием почв, рекомендуется также насыщение поглощающего их комплекса ионом NH_4^+ (1932 г.). Ион NH_4^+ диспергирует почву слабее, нежели Na^+ , но, как покажем ниже, влияние его столь сильно, что большинство микроагрегатов распадается.

Диаметрально противоположный метод рекомендует С. В. Астапов (1947). В его методе отсутствует не только химическое воздействие на почву, но и сколько-нибудь сильное физическое воздействие. В анализ в этом методе идут и микро-, и макроагрегаты с диаметром <10 мм. Здесь имеет место совмещение микроагрегат-

ного и макроагрегатного анализов. Кроме того, срок размачивания почвы не определен: от 6 до 24 ч. Механическое воздействие на почву в сыром состоянии ограничивается десятикратным оборачиванием цилиндра вручную. Этот метод не может дать устойчивых результатов, которые можно было бы сопоставлять с результатами механического анализа тех же почв.

В рекомендуемом Качинским методе исключается химическое воздействие на почву, а средства физического воздействия остаются те же, что и при механическом анализе, лишь кипячение заменяется встряхиванием. Некоторые исследователи считают, что при такой подготовке почвы разрушаются агрегаты. Это замечание совершенно верно. Агрегаты учитываются в агрегатном анализе по Саввинову, в микроагрегатном анализе нас интересуют лишь частицы $< 0,25$ мм. Микроагрегаты таких размеров будут сохраняться в большей или меньшей степени в зависимости от свойств почвы. То же обстоятельство, что большинство процессов механического воздействия на анализируемую пробу почвы в рекомендуемом методе одинаково с механическим анализом и что эти процессы исключают индивидуальное влияние аналитика (просеивание сквозь сита, встряхивание на автоматической мешалке, пипетирование), дает право сопоставлять данные механического и микроагрегатного анализов при вычислении показателей структурности и дисперсности почвы.

Механический анализ

В лабораториях физики и технологии почв Почвенного института АН СССР и кафедры физики и мелиорации почв МГУ сравнивалось большинство существующих методов подготовки почв к механическому анализу. Прежде чем перейти к их оценке, сделаем несколько существенных, с нашей точки зрения, замечаний о различном характере механических элементов почвы.

Роль механических элементов в определении различных свойств почвы — химических, физико-химических, физических, физико-механических и биологических — зависит, как уже указывалось выше, от их размеров и формы, от химического и минералогического состава. Однако она зависит также от устойчивости во времени размеров механических элементов и их свойств. Химические свойства механических элементов в зависимости от их крупности и влияния их на физические свойства давно учитываются в почвоведении, а вопрос об устойчивости во времени механических элементов часто полностью выпадает из внимания исследователей. Вследствие этого возникает, с нашей точки зрения, необоснованная цель: разработать методы подготовки к механическому анализу любой почвы, которые обеспечили бы диспергирование всех составных ее частей и разделение механических элементов вне зависимости от постоянства основных их свойств.

Мы считаем такой подход к механическому анализу неправильным по следующим соображениям. Механические элементы, составляющие твердую фазу почвы, даже имеющие одни и те же размеры, помимо химических свойств, различаются по степени устойчивости (постоянства) в почве. По последнему признаку можно выделить следующие категории механических элементов.

1. *Эфемерные механические элементы* — воднорастворимые соли, которые появляются в сухой почве и исчезают во влажной. Они влияют на химические и физические свойства почвы, вызывая при определенных условиях коагуляцию суспензий или пептизацию их, но они непостоянны в почве и в отдельных ее горизонтах, так как обладают способностью вымываться и передвигаться вместе с капиллярной и гравитационной водой.

2. *Карбонаты кальция и магния*. Эти механические элементы более устойчивы и постоянны в почве, чем растворимые соли, но также подвержены вымыванию из почвы и передвижению с водой по капиллярам. Размеры их динамичны: в сырой почве, особенно в перегнойно-аккумулятивном ее горизонте, богатом CO_2 , часть карбонатных механических элементов, растворяясь, будет уменьшаться в размерах. При просыхании почвы, наоборот, карбонаты будут выпадать из раствора, увеличивая число и размеры соответствующих механических элементов.

Промежуточное место по растворимости между эфемерными механическими элементами и карбонатами кальция и магния занимает гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Его растворимость: одна часть гипса на 488 частей воды при 20°C .

3. Наиболее устойчивыми механическими элементами в почве, сохраняющимися в ней десятилетиями, являются *силикаты, алюмо- и ферросиликаты, окислы железа и алюминия, марганца* и ряд других слабо растворимых в воде минеральных соединений. Эта часть механических элементов наиболее характерна для механического состава почвы и является как бы паспортом его. Едва ли правы те исследователи, которые стремятся найти методы подготовки почвы к механическому анализу, позволяющие диспергировать всю массу почвы, вне зависимости от качеств механических элементов.

Во-первых, как показывает опыт, устойчивого диспергирования нельзя достигнуть, не изменяя состава механических элементов исходной почвы. Во-вторых, диспергированная и частично измененная химически и минералогически почва в дальнейшем разделяется в анализе на фракции, в которые попадают резко различные по своей устойчивости механические элементы, как растворимые соли, карбонаты, алюмо- и ферросиликаты и другие, значение которых для физических и иных свойств почвы неравноценно. Видимо, более правильно растворимые соли и карбонаты удалять из почвы перед анализом и изучать их обособленно, а собственно механическому анализу подвергать устойчивую, постоянную, а потому наиболее характерную часть почвы, представленную сили-

катами, алюмо- и ферросиликатами и другими минеральными соединениями, слабо растворимыми в воде.

Из сказанного явствует, что все методы подготовки почвы к механическому анализу можно сгруппировать в три основные категории: а) подготовка почвы без химического воздействия; б) подготовка почвы с химическим воздействием и с отмыванием некоторых более подвижных частей почвы; в) диспергирование почвы химическими методами без удаления из нее каких-либо составных частей. В таком порядке мы и приступим к рассмотрению методов подготовки почв к механическому анализу.

Метод Н. А. Качинского (дается для сравнения): навеска 10—30 г (10 г — для глин и суглинков; 15 г — для супесей; 20—30 г — для песков). Карбонатная почва обрабатывается раствором 0,2 н. HCl до прекращения выделения пузырьков CO₂; некарбонатная почва, а также карбонатная, после указанной предварительной обработки, промывается на фильтре последовательно 0,05 н. HCl до вытеснения иона Ca и водой — до отсутствия реакции на Cl. Обработанная навеска почвы с 250 см³ дистиллированной воды кипятится в колбе один час, причем в нее добавляется 1 н. NaOH по емкости поглощения почвы *.

Анализ производится пипет-методом с использованием пипетки конструкции Качинского и с расчетом скоростей падения механических элементов почвы в воде по формуле Стокса **.

Подготовка почвы к анализу без химической ее обработки путем растирания почвы в состоянии сырой пасты (при нижней границе текучести по Аттербергу) — Нефедов, 1902; Панков, 1934; Земятченский, 1935; Тюлин, 1936; Новиков, 1937; Квирикашвили, 1940; Цуринов, 1940; Шаров, 1940; Айдинян, 1947; Чернов и Шапошников, 1950; Кореневская, 1953; Годлин, 1956. Техника этого метода подробно описана в работе Р. Х. Айдиняна.

«Международный» метод А. Навеска почвы 10 г кипятится с 50 см³ 6-процентного раствора H₂O₂ для сжигания гумуса и обрабатывается 250 см³ 0,2 н. HCl для разрушения карбонатов. Промывают почву водой на фильтре в течение часа. Затем встряхивают суспензию с 500 см³ воды плюс 4 см³ 1 н. NaOH или в 0,01 н. растворе Na₂CO₃ в течение 2 часов при двухстах толчках в минуту. Анализ проводится пипет-методом.

Судан-метод. 2,5—5 г почвы, высушенной при 100° С, взбалтывается 2 часа со 100 см³ 2-процентного Na₂CO₃. Отмучивание глины (<0,002 мм) проводится в 0,05-процентном растворе Na₂CO₃. Анализ осуществляется методом декантации.

* Напомним, что идея диспергирования почв путем насыщения поглощающего их комплекса Na⁺ была предложена К. К. Гедройцем (1915, 1922). См. также по этому вопросу работы А. Н. Соколовского (1916, 1921—1923).

** Подробное описание анализа и описание пипетки см. в работе Н. А. Качинского «Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения». М., 1958.

Метод Пури. 10—20 г почвы обрабатываются 30—60 мин в чашке емкостью 100—200 см³ 1 н. NaCl; на фильтре почва промывается последовательно 500 см³ 1 н. NaCl, 10 см³ 0,2 н. NaCl, 10 см³ дистиллированной воды, затем взбалтывается в течение часа в 500 см³ воды плюс 5 см³ 1 н. NaOH. Анализ ведется пипет-методом.

Методы «международные» А и В, Суданский и Пури подробно описаны в докладе В. Новака на Втором международном конгрессе почвоведов (Novak, 1932) (см. также уточнения к ним в Трудах Версальской конференции 1-й комиссии Международной ассоциации почвоведов, 1934 г.).

Группа методов, в которых диспергирование почвы достигается путем обработки ее растворами различных натриевых солей: а) оксалата натрия (Na₂C₂O₄); б) пирофосфата натрия (Na₄P₂O₇); в) гексаметафосфата натрия (Na₆P₆O₁₈) *. Применяются растворы 0,5 н. концентрации. Количество реактива, необходимое для диспергирования почвы, зависит от степени их карбонатности и загипсованности.

Суспензия с добавлением соответствующего реактива кипятится с водой 1 час или растирается в состоянии пасты, иногда — с добавлением песка (см. Даван и др., 1955).

Оценка методов

Растирание почвенной пробы в состоянии сырой пасты для некарбонатных почв таежной зоны обеспечивает необходимое диспергирование образца и для этих почв может применяться в механическом анализе наравне с методом подготовки почв по методу Н. А. Качинского.

Однако такая замена едва ли целесообразна. Подготовка к анализу почв ненасыщенных основаниями по методу Качинского требует мало времени. Но в этом случае мы получаем добавочную характеристику — «потерю при обработке почв» 0,05 н. HCl, которая соответствует легкоподвижным соединениям в почве, в том числе подвижным несиликатным формам соединений железа и алюминия.

Применение «метода растирания почвенной пробы» для невскипающих горизонтов степных почв приводит, как показали исследования Кореневской (1953), к ошибкам в содержании глины (к уменьшению ее на 3—4 %). Наконец, этот метод дает совершенно искаженные результаты при анализе карбонатных почв и пород, а также красноземов (рис. 4).

Подготовка почвы к анализу по Судан-методу, при условии декантирования суспензии, дает вполне удовлетворительные ре-

* Анализы производятся пипет-методом. Описание методов дано в работах: Тинера (Thunberg, 1939), Квирикашвили (1940), Кильмера (Kilmer) и Александра (Alexander, 1949), Рыжова (1951), Шкабары и Костюкевича (1952), Черниковой (1953), Потравновой (1955), Мельникова (1956), Братчевой (1957) и др.

зультаты в диспергировании почвы, но для карбонатных почв процесс декантации суспензии затягивается на многие часы и требует больших объемов дистиллированной воды. Карбонаты в этом случае в значительной своей части вымываются в форме бикарбоната кальция.

Степень диспергирования минеральной части почвы по «международному» методу А для почв с емкостью поглощения не свыше

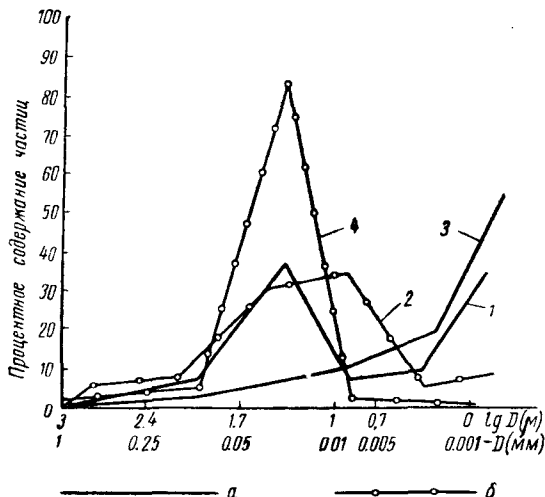


Рис. 4. Механический состав солонца и краснозема при различных методах подготовки образцов к анализу (по В. Е. Корневской):

а — подготовка по методу Качинского; б — подготовка методом растирания; 1 и 2 — солонец глубоко-столбчатый, гор. С (70—80 см); 3 и 4 — краснозем, гор. С (92—99 см)

40 м-экв. приблизительно такая же, как и по методу автора. Для почв с емкостью > 40 м-экв. она недостаточна. Это зависит от стандартного количества (4 см³) 1 н. NaOH, которое добавляется в суспензию всех почв перед пипетированием (Physique du Sol, Paris, 1934). Вследствие этого при емкости поглощения почв менее 40 м-экв. Na⁺ вводится в суспензию в избытке; наоборот, при емкости поглощения свыше 40 м-экв. введенного Na⁺ оказывается недостаточно для замещения поглощенного водорода после обработки почвы HCl. Таким образом, анализ почв с различной емкостью поглощения производится по этому методу при переменном pH.

Сжигание гумуса в анализируемой пробе почвы недопустимо и бесцельно. Недопустимо потому, что гумус является главной составной частью почвы, без которой самое понятие почвы немыслимо; бесцельно потому, что в случае последующей отмывки легкорастворимых солей, карбонатов и насыщения поглощающего

комплекса почвы Na^+ сжигание гумуса, как это показано в работах В. Е. Кореневской (1953) и А. Ф. Макаровой (1955), не повышает дисперсности минеральной ее части. Следовательно, эта сложная операция при механическом анализе почвы ни с какой точки зрения не может быть оправдана.

Следует также помнить, что применение для обработки почвы H_2O_2 и 0,2 н. HCl сопровождается значительным разрушением алюмо- и ферросиликатов почвы. Так, по данным Кореневской, при промывании навески почвы из горизонта A_1 выщелоченного чернозема 0,05 н. HCl до исчезновения Ca^{++} , в собранном фильтрате оказалось SiO_2 — 0,21% к весу почвы, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ — 0,40%. При промывании той же почвы, обработанной H_2O_2 и 0,2 н. HCl , как это рекомендуется по методу А, фильтрат содержал: SiO_2 — 0,98%; $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ — 1,39%. Иногда эта потеря алюмо- и ферросиликатов бывает еще выше.

Резюмируя оценку подготовки почвы к механическому анализу по «международному» методу А, мы не можем рекомендовать его почвоводам. Для других целей, например, для минералогического анализа почв, в отдельных случаях применение этого метода может оказаться целесообразным.

Метод Пури дает неустойчивые результаты по диспергированию почвы: чем более карбонатна почва, тем менее полно она диспергируется. Это объясняется стандартным количеством реактивов, рекомендуемых для диспергирования любой почвы.

Группа методов, означенная в п. 6, рассчитана главным образом на диспергирование карбонатных почв. Количество реактивов, применяющихся в этих методах, 0,5 н. концентрации, потребное для диспергирования почв, в зависимости от степени их карбонатности и гипсоносности, должно быть эквивалентным одинарной, двойной и даже тройной емкости поглощения почв. Это сильно увеличивает размер поправки, которую нужно вносить в результаты анализа на количество введенной в дисперсию соли. Кроме того, введение $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ и других диспергирующих почву реактивов в количестве, эквивалентном двойной и тройной емкости поглощения почвы, может вызвать коагуляцию суспензий.

При использовании этих методов следует также учитывать, что первоначальные формы соединений кальция в анализируемой почве значительно изменяются в процессе обработки ее оксалатом натрия или другими вышеназванными реактивами. Поглощенные кальций и магний и часть их, входящая в карбонаты и гипс, связываются в новые соединения: $(\text{Ca}, \text{Mg})\text{C}_2\text{O}_4$; $(\text{Ca}_2, \text{Mg}_2)\text{P}_2\text{O}_7$; $(\text{Ca}_3, \text{Mg}_3)\text{P}_6\text{O}_{18}$; $\text{Na}_2\text{Ca}_2(\text{PO}_3)_6$, образуя и новые, ранее отсутствовавшие в почве механические элементы. В соответствии с этим часть карбонатов кальция и магния трансформируется в соду и бикарбонат кальция. Поэтому неверны указания некоторых авторов, что, применяя, скажем, $(\text{NaPO}_3)_6$, они добиваются диспергирования карбонатных почв, не изменяя состава и формы карбонатов. Напомним хотя бы

тот факт, что гексаметафосфат натрия используется для смягчения жестких вод и очистки паровых котлов от карбонатных и силикатных накипей. Способность «захвата» последним реактивом, т. е. обволакивания им в форме защитных двойных солей (например, $\text{Na}_2\text{Ca}_2(\text{PO}_3)_6$) мелких частиц, может приводить также к тому, что обволакиваться будут не только механические элементы, но и микроагрегаты, что исключит возможность их диспергирования.

Для характеристики масштаба новых минеральных образований приводим расчет для случая диспергирования с помощью $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ образца тучного чернозема с емкостью 60 м-экв., что в Са соответствует 1,2% к весу почвы. Почва · 2Са + $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ = Почва · 4На + $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$. Учтя атомные веса и процентное содержание поглощенного кальция в почве, найдем процентное содержание новообразованного в навеске $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$:

$$\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7 = \frac{12(80 + 62 + 112)}{10 \times 80} = \frac{12 \times 254}{800} = \frac{3048}{800} = 3,8\%.$$

Если принять во внимание, что в анализах $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ часто вводится по двойной емкости поглощения, чтобы связать не только Са поглощенный, но и Са в растворе, то новообразующийся минерал составит 7,6% к анализируемой навеске почвы. В сероземах емкость поглощения примерно в три раза меньше, нежели в принятом нами случае. Но и тогда новообразующийся минерал ($\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$) составит 2,5%.

Степень диспергирующего воздействия на почву оксалата натрия, пирофосфата натрия и гексаметафосфата натрия разная. Следовательно, анализы с применением этих трех реактивов между собой несопоставимы.

Отметим также, что диспергирование наиболее существенной части в навеске почвы (за вычетом легкорастворимых солей, гипса и карбонатов) путем применения названных реактивов ниже, нежели по методу Качинского. Для примера даем механический состав серозема, подготовленного к анализу различными методами (табл. 13) *.

Как явствует из данных таблицы 13, наибольшее диспергирование почвы достигнуто при подготовке ее к анализу солянокислым методом с последующим насыщением поглощающего комплекса почвы ионом натрия. Во всех трех проанализированных горизонтах типичного серозема наибольший выход ила (20,8; 22,8 и 18,1%) получен по этому методу.

Методы растирания образца в состоянии пасты и обработки почвы NaF дали неустойчивые результаты. Первый из них оказался совершенно непригодным для диспергирования сильно кар-

* Расчет фракций в % в методе Качинского сделан на бескарбонатную навеску.

Механический состав типичного серозема при различных способах подготовки образцов к анализу, в % веса сухой почвы
(по данным Яо Сянь-Лян — 1960)

Горизонт	Глубины, см	Методы подготовки	Потеря от обработки 0,05 н. HCl	Фракции, мм						
				1—0,25	0,25—0,05	0,05—0,01	0,01—0,005	0,005—0,001	< 0,001	< 0,01
A ₁	0—5	I. Метод Н. А. Качинского	16,8	0,8	5,1	48,3	11,8	13,1	20,8	45,7
		II. Метод растирания образца в тестообразном состоянии без химической обработки (по Р. Х. Айдиняну)	—	0,7	7,4	48,9	11,3	15,7	16,6	43,5
		III. Метод растирания образца с раствором щавелево-кислого натрия (по Т. Н. Черниковой)	—	0,6	7,5	50,3	8,3	14,5	18,8	41,6
		IV. Метод растирания образца с раствором пирофосфата натрия (по П. Ф. Мельникову)	—	0,8	8,8	48,3	11,0	14,0	17,8	42,0
		V. Метод с применением гексаметафосфата натрия (по Тупегу — М. И. Братчевой)	—	1,7	10,6	49,5	12,9	14,3	10,9	38,0
		VI. Метод растирания образца с раствором фтористого натрия	—	0,8	8,1	47,5	11,6	13,8	18,3	43,6
B ₁	15—50	I. Метод Н. А. Качинского	22,3	0,1	6,5	46,6	12,4	11,7	22,8	46,9
		II. Метод растирания образца в тестообразном состоянии без химической обработки (по Р. Х. Айдиняну)	—	0,0	6,5	45,2	12,1	15,9	20,2	48,3

Лёсс	1500— 1600	III. Метод растирания образца с раствором щавелево-кислого натрия (по Т. Н. Черниковой)	—	0,0	9,7	42,4	12,3	16,3	19,3	47,8
		IV. Метод растирания образца с раствором пирофосфата натрия (по П. Ф. Мельникову)	—	0,0	8,4	45,5	11,7	16,2	18,1	46,0
		V. Метод с применением гексаметафосфата натрия (по Тупегу — М. И. Братчевой)	—	0,5	9,5	45,4	13,6	16,1	14,9	44,6
		VI. Метод растирания образца с раствором фтористого натрия	—	0,6	9,1	46,8	7,4	29,4	7,3	44,0
		I. Метод Н. А. Качинского	22,4	0,0	6,6	54,1	11,7	9,5	18,1	39,3
		II. Метод растирания образца в тестообразном состоянии без химической обработки (по Р. Х. Айдиняну)	—	0,0	5,1	62,0	27,1	3,9	1,6	32,6
		III. Метод растирания образца с раствором щавелево-кислого натрия (по Т. Н. Черниковой)	—	0,0	5,0	52,4	12,9	11,8	17,8	42,6
		IV. Метод растирания образца с раствором пирофосфата натрия (по П. Ф. Мельникову)	—	0,1	7,4	53,7	12,0	10,7	16,3	38,9
		V. Метод с применением гексаметафосфата натрия (по Тупегу — М. И. Братчевой)	—	0,2	7,5	57,9	12,5	11,2	10,8	34,4
		VI. Метод растирания образца с раствором фтористого натрия	—	0,0	4,4	87,9	4,4	2,3	0,9	7,7

бонатной породы с глубины 1500—1600 см. Второй (метод NaF) показал удовлетворительные результаты лишь на малокарбонатном образце из гор. А₁ (0—5 см). Три метода — оксалатный, пирофосфатный и гексаметафосфатный во всех случаях обусловили меньшее диспергирование почвы, нежели солянокислый метод. Из этих трех методов наименьшее диспергирование образца показал гексаметафосфатный метод, по которому выход ила по сравнению с солянокислым методом сокращается на 10 и более процентов.

О неполном диспергировании карбонатных почв лишь путем введения в суспензию Na₄P₂O₇ известно и сторонникам этого метода (Квирикашвили, 1940; Шкабара и Костюкевич, 1952; Dhawan и др., 1955; Мельников, 1956), поэтому они в разных вариантах предлагают сочетать обработку почвы Na₄P₂O₇ с размятием ее при смачивании до состояния пасты *. Новый вариант этого метода для карбонатных и засоленных почв предлагает П. Ф. Мельников (1956). Воздушно-сухая навеска почвы постепенно смачивается раствором Na₄P₂O₇ и разминается в фарфоровой ступке пестиком с каучуковым наконечником в течение 20 мин. Мельников пишет: «Реагент в водном растворе добавлялся к воздушно-сухому грунту в таком количестве, чтобы привести его в состояние густой пасты. Характерным признаком такого состояния грунта является своеобразное потрескивание (подчеркнуто нами), слышимое при растирании пасты пестиком и исчезающее при переходе грунта в более разжиженное состояние». Автор метода уверяет, что растирание почвы в означенных условиях исключает раздавливание механических элементов. В доказательство он приводит данные о том, что растирание почвы в течение 40 и 60 мин по сравнению с растиранием в течение 20 мин не повышает дисперсность почвы. Однако естественно возникает возражение, что двадцатиминутное растирание может оказаться достаточным, чтобы размельчить и гипс, и карбонаты, а меньший срок растирания автор не применял. Да и как могут конкреции гипса или такие частички извести, как, например, осколки ракушника с *Cardium edule*, которые легко растираются между пальцами, противостоять раздавливанию их в фарфоровой ступке в течение 20 мин. Конечно, они будут и разрушаться и «своеобразно потрескивать».

Итак, мы приходим к заключению, что при подготовке почв к механическому анализу целесообразно удаление из навески почвы растворимых солей и карбонатов путем обработки ее 0,05 н.

* Необходимо отметить, что М. Н. Шкабара и З. В. Костюкевич в своей работе полностью извратили метод подготовки почв к механическому анализу по Качинскому. Для отмывки карбонатов они применяли 10-процентную HCl вместо рекомендованной Качинским 0,05 н. HCl. Они также пренебрегли рекомендацией Качинского вносить в суспензию 1 н. NaOH по емкости поглощения почвы. Это лишает их права сравнивать свой метод с методом Н. А. Качинского.

HCl и водой с последующим насыщением поглощающего комплекса почвы одним из щелочных катионов. Эти положения разделяются большинством почвоведов СССР.

Однако в дальнейшем возникает ряд вопросов.

Чему отдать предпочтение при механическом диспергировании почвы перед анализом: встряхиванию почвы холодным способом или кипячению?

Что целесообразнее применять для диспергирования почвенной суспензии: соли натрия или соли аммония? (Применение NH_4OH для диспергирования почвенной суспензии предлагали П. А. Земятченский и В. В. Охотин (1928), Н. П. Карпинский и С. И. Долгов (1930) и др.)

В какой момент анализа и в каком количестве целесообразно вводить диспергирующий ион?

Для решения этих вопросов в лаборатории Физики и мелиорации почв МГУ Качинским в 1939 и 1940 гг. были поставлены специальные исследования.

Подготовка почв к анализу проводилась в одних случаях без всякого химического воздействия на образец, в других — без сжигания гумуса, но с отмывкой карбонатов и легкорастворимых солей с помощью HCl и воды (см. ниже). Сравнивалось диспергирующее действие ионов аммония и натрия (из NH_4OH и NaOH), а также влияние на диспергирование образца почвы предварительного кипячения и встряхивания почвенной суспензии.

Аммоний (10-процентный) прибавлялся в суспензию в количестве 10 см^3 перед встряхиванием и кипячением, как рекомендовали авторы этого метода *. Едкий натрий (однонормальный и децинормальный) вводился в одних случаях сразу всей предназначенной порцией, исходя из средней емкости поглощения почвы данного типа: 1 см^3 1 н. NaOH на каждые 10 м-экв. емкости поглощения, в других случаях постепенно — по фенолфталеину (до слабо-розового окрашивания), с доведением pH суспензии, при повторных взбалтываниях ее, до 8,4 (Красникова, 1936).

Кипячение суспензии, в тех случаях когда оно применялось, проводилось в течение одного часа в колбе с обратным холодильником. Встряхивание суспензии осуществлялось на мешалке с горизонтальными толчками, при диапазоне качаний в 10 см и при 180 ударах в минуту. Исследованию были подвергнуты 6 почв (21 образец).

Анализы выполнены Н. И. Федуловым и Г. В. Васицкой (Васицкая, 1940). Частичные результаты анализов представлены в таблицах 14, 15. Экономя место, приводим данные лишь о фракциях почвы $< 0,01$ и $< 0,001 \text{ мм}$.

* В иных вариантах в почвенную суспензию добавляется 1-процентный аммиак «до слабого запаха».

Влияние метода подготовки почвы на результаты механического анализа, %
(анализировали Н. И. Федулов и Г. В. Васицкая)

Почва	Горизонты, глубина, см	Механический анализ						Микроагрегатный анализ	
		диспергирование 1 н. NaOH				диспергирование 10-процентным NH ₄ OH		встряхивание— 180 ударов в 1 мин	
		кипячение		встряхивание		кипячение			
		<0,01 мм	<0,001 мм	<0,01 мм	<0,001 мм	<0,01 мм	<0,001 мм	<0,01 мм	<0,001 мм
Дерново-сильнопodzолистая суглинистая иловато-пылеватая. Ст. Луговая Московской области, вырубка	A ₁ —(2—5) A ₂ —(13—17) B ₃ —(80—84)	37,1 32,2 55,0	16,6 12,3 32,7	34,1 31,2 54,5	11,7 11,0 29,8	34,8 29,6 52,4	13,2 8,7 28,1	20,3 22,1 31,0	1,8 1,27 3,8
Чернозем обыкновенный террасовый тяжелосуглинистый иловато-пылеватый. Екатериновский орошаемый участок Куйбышевской области, стерня овса	A _п —(0—10) B ₁ —(65—75) C ₁ —(140—150)	49,3 45,9 40,1	35,7 34,0 27,6	47,8 45,6 39,7	34,9 33,9 27,6	40,4 37,6 29,4	24,7 23,6 19,8	11,4	0,8
Приазовский карбонатный легкоглинистый иловато-пылеватый чернозем. Ст. Верблюд, пшеница озимая	A _п —(0—10)	66,1	41,6	65,3	36,1	65,8	35,2		
Каштановая тяжелосуглинистая иловато-пылеватая почва. С. Алтата Саратовской области, стерня пшеницы	A _п —(0—12) B ₁ —(30—35) C—(75—85)	58,7 58,2 50,7	35,9 38,0 35,0	58,4 57,4 51,5	36,8 38,3 35,9	52,5 52,8 43,8	26,2 30,7 28,2		
Краснозем легкоглинистый иловато-пылеватый. Анасули. Грузинская ССР, целина	A ₁ —(0—10)	69,4	22,6	65,1	18,6	66,9	18,0		

Влияние метода подготовки почвы на результаты механического анализа, %
(анализировала Г. В. Васицкая)

Почва	Горизонты, глубина, см	Диспергирование 1 н. NaOH, рассчитанным по емкости поглощения почвы				Диспергирование 0,1 н. NaOH, прибавляе- мым по фенолфталеину до слабощелочной реакции			
		кипячение		встряхивание		кипячение		встряхивание	
		<0,01 мм	<0,001 мм	<0,01 мм	<0,001 мм	<0,01 мм	<0,001 мм	<0,01 мм	<0,001 мм
Дерново-среднеподзоли- стая суглинистая песчано- пылеватая. Собакино Мос- ковской области, лес	A ₁ (0—12)	36,3	13,3	36,0	12,1	32,2	9,2	32,1	8,6
Приазовский карбонатный легкоглинистый иловато-пы- леватый чернозем. Ст. Вер- блюд, пшеница озимая	A ₁ (0—10)	66,1	41,6	65,3	36,1	67,1	36,1	65,6	33,4
Краснозем легкоглини- стый, иловато-пылеватый. Анасеули, Грузинской ССР, целина	A ₁ (0—10)	69,4	22,6	65,1	18,6	60,9	12,9	51,6	11,9

Оценивая данные, приведенные в таблицах 14 и 15, можно сделать следующие выводы:

1. Кипячение в подавляющем числе случаев обуславливает лучшее диспергирование почвы, нежели встряхивание. Разница (в пользу кипячения) достигает: по выходу физической глины (частицы $< 0,01$ мм) — 4,5%; по выходу ила (частицы $< 0,001$ мм) — до 5%. Наибольшая разница, и главным образом по выходу ила, отмечается для почв, ненасыщенных основаниями (подзолистые, красноземы). Наименьшая разница, иногда сходящая к нулю и даже получающая изредка обратное значение, отмечается для черноземов и каштановой почвы.

2. Диспергирование почвы путем насыщения ее ионом натрия заметно выше, чем при насыщении ионом аммония. Выход физической глины и ила в случае поглощенного Na^+ на 3—10—11% больше, чем при насыщении почвы аммонием, и лишь в единичных случаях диспергирующая роль того и другого иона становится одинаковой.

3. Выявилось существенное значение метода введения диспергирующего вещества в суспензию. Едкий натр, введенный в суспензию одновременно всей порцией, во всех случаях заметно сильнее диспергирует почву, нежели натрий, даваемый по частям (прибавляемый порциями — по фенолфталеину). В последнем случае максимум его накапливается в суспензии лишь перед пипетированием.

Следует отметить, что метод введения натрия по фенолфталеину до стандартного pH (8,3—8,4) создает в анализе большие затруднения и сильно задерживает работу. Как выявилось в работе Г. В. Васицкой (1940) и как отмечала это ранее А. С. Красникова (1936), реакция почвенной суспензии со щелочью, вводимой небольшими порциями, проходит весьма медленно. Стандартная величина pH Васицкой была достигнута лишь через 10—14 дней, за такой срок суспензия начинает загнивать.

При сильно окрашенной суспензии, что имело место при анализе чернозема и краснозема, установить порозовение суспензии от прибавления щелочи в присутствии фенолфталеина весьма трудно. Определение же pH суспензии в создаваемом интервале щелочности также затруднено: использование упрощенного метода с универсальным индикатором при сильно окрашенных суспензиях (не осветляющихся даже при фильтровании через двойной фильтр (Extra hart 602) невозможно. Приходится пользоваться электрометрическим методом с применением стеклянного электрода, так как хингидронные электроды применимы лишь до pH 8. Хотя данные для оценки последнего описываемого метода подготовки почвы к анализу немногочисленны, все же остается впечатление, что он едва ли войдет в широкую практику. Видимо, пока наиболее целесообразным в массовых анализах следует признать метод диспергирования почвы щелочью путем разового ее введения

перед кипячением с расчетом по емкости поглощения почв (с минимальным ее превышением).

В тех случаях, а они часто встречаются в практике аналитика, когда емкость поглощения и состав поглощенных катионов для анализируемого образца неизвестны, видимо, возможно нормировать количество вводимой в суспензию щелочи, исходя из средних величин емкости поглощения почв данного типа. В своих анализах эти нормы мы определяем такими величинами (в см^3 1 н. NaOH):

Почва	
Черноземы тучные	6
Черноземы обыкновенные	5
Черноземы южные (малоомощные)	4,5
Каштановые почвы	3,5
Бурые почвы	3
Серые лесные земли	3
Сероземы	2
Подзолистые почвы тяжелые по механическому составу:	
горизонты A_1 и A_2	1
подгоризонты B_1 , B_2 , B_3	2
Подзолистые почвы легкие по механическому составу	0,5
Солонцы и солонцеватые почвы, в зависимости от зоны и их типа	от 2 до 5
Красноземы:	
горизонт A_1	2
остальные горизонты	1,5

В отношении методов диспергирования образцов почвы путем кипячения или встряхивания их с водой следует заметить, что при механическом анализе нужно применять кипячение, а при микроагрегатном анализе — встряхивание на мешалке с горизонтальными толчками при диапазоне качаний 10 см и при количестве ударов 180—200 в мин.

Резюмируя сопоставление методов подготовки почв к механическому анализу, рекомендуем вошедший в практику кислотно-щелочной метод. Считаем возможным использование его и для карбонатных почв, для суждения о дисперсности некарбонатной минеральной части почвы, а это основное при механическом анализе почв. Что касается карбонатов, то в случае переосаждения их из воды они в большинстве своем попадают в мелкую пыль и ил. В случае же карбонатного песка (органогенного происхождения) он должен быть отсеян «мокрым способом» на ситах и просмотрен под микроскопом. Растворимые соли, как известно, учитываются в водных вытяжках.

Сопоставление данных по плотному остатку водных вытяжек, процента карбонатов в почве с учетом их характера и механического состава наиболее устойчивой в почве ее части — силикатов, алюмо- и ферросиликатов и других стойких соединений — дает в руки исследователя многосторонний материал по характеристике механического состава почвы или грунта, от которого зависят

их физические, физико-механические, а в известной степени химические и физико-химические свойства. По попытка смешения этих резко различных частей и определение их общей суммой в различных фракциях при механическом анализе почвы, к тому же без знания процентного содержания их в отдельных фракциях, является не раскрытием вопроса, а запутыванием его. Такой безликий механический состав почвы не может стать основой при характеристике ее свойств.

В связи со сказанным встает вопрос о месте «потери» при обработке образца почвы перед анализом 0,05 н. HCl. Ранее рекомендовалось (Качинский, 1943) разносить «потерю» по различным механическим фракциям согласно величине этих фракций и степени их карбонатности. Для этой цели была предложена определенная пропорция.

К настоящему времени накопился значительный новый материал, который позволяет решить этот вопрос более дифференцированно:

1. В почвах, ненасыщенных основаниями, потеря от обработки почвы 0,05 н. HCl складывается главным образом из вытесненных водородным ионом поглощенных оснований, несиликатных форм железа и алюминия и из продуктов незначительного распада силикатов, алюмо- и ферросиликатов. Такая «потеря», в основном извлекаемая из наиболее дисперсной части почвы, должна быть отнесена к этой же части, т. е. приплюсована к фракции ила. Но она обязательно должна быть показана и отдельно, так как дает представление о подвижной составной части почвы, особенно несиликатных форм железа и алюминия.

2. В карбонатных и засоленных почвах «потеря» состоит в основном из карбонатов и легкорастворимых солей. В различных почвах и грунтах варьируют:

- а) соотношение карбонатов и легкорастворимых солей;
- б) распределение их, особенно карбонатов, по различным механическим фракциям почвы.

3. Из п. 2 следует:

а) в результатах механического анализа «потеря» от обработки 0,05 н. HCl должна быть поставлена обособленной графой: «Сборная фракция подвижных соединений» с включением ее в 100% навески;

б) в тех почвах и грунтах, где «сборная фракция» состоит в основном из карбонатов, наряду с указанием ее отдельной графой в составе 100% навески, допустима разноска ее по фракциям механических элементов (в самостоятельной строке записи результатов анализа) с учетом распределения карбонатов в различных фракциях механических эле-

ментов данной почвы или данной породы. В таком случае необходимы пропорции разности карбонатов по фракциям: для украинского лёсса, для сыровых суглинков Заволжья, для среднеазиатского лёсса и для других типичных и распространенных пород. Разность «потерю» по фракциям, ее нужно записывать подстрочно, не приплюсовывая к основным (устойчивым) фракциям почвы. Учет содержания карбонатов и легкорастворимых солей в отдельных фракциях почвы углубляет характеристику фракций.

ПРИНЦИПЫ И ТЕХНИКА МЕХАНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПОЧВЫ

Различают несколько методов механического анализа почвы: 1) грубоэмпирические — полевые; 2) ситовой анализ; 3) механический (вернее, микроагрегатный) анализ почвы в струе воздуха; 4) механический анализ почвы в жидкостях, преимущественно в воде.

Механический анализ в водной среде имеет два варианта: а) анализ в текучей воде; б) анализ в стоячей воде.

Все виды анализа в водной среде, за исключением метода центрифугирования, основаны на учете различных скоростей падения механических элементов. В методе центрифугирования используется различная центробежная сила механических элементов, зависящая от их размера и массы.

В означенном порядке кратко охарактеризуем наиболее распространенные или в принципе интересные методы механического анализа почвы.

Определение механического состава почвы в поле (без приборов)

«Сухой» метод. Зерно почвы, величиною с зерно гречихи, испытывают на ощупь между пальцами. Раздавливают ногтем на ладони и втирают в кожу. Чем зерно более угловато, жестко, прочно и чем большая часть его после полного раздавливания втирается в кожу, тем почва тяжелее по механическому составу.

«Мокрый» метод. Почву смачивают и разминают между пальцами до такого состояния, чтобы не ощущались ее структурные зерна. Почву следует смачивать до консистенции теста, т. е. до влажности, приблизительно соответствующей нижней границе текучести по Аттербергу: в таком состоянии вода из почвы не отжимается, но почва поблескивает от воды и мажется. Хорошо размятая почва раскатывается на ладони «ребром» второй кисти руки в шнур и сворачивается в колечко. Толщина шнура около 3 мм, диаметр кольца — около 3 см (рис. 5).

«Мокрый» полевой метод определения механического состава почвы в случае тщательного его применения дает результаты при определении основных классов почв по механическому составу

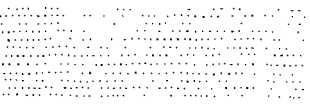
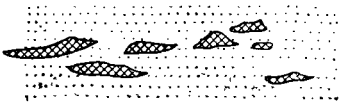
<i>Механический состав</i>	<i>Морфология образца при испытаниях (вид в плане)</i>
Шнур не образуется — песок	
Зачатки шнура — супесь	
Шнур, дрожащий при раскатывании, — легкий суглинок	
Шнур сплошной, кольцо, распадающееся при свертывании, — средний суглинок	
Шнур сплошной, кольцо с трещинами — тяжелый суглинок	
Шнур сплошной, кольцо стойкое — глина	

Рис. 5. Показатели «мокрого» способа определения механического состава почвы в поле (метод раскатывания)

весьма близкие к получаемым при анализе с помощью приборов. Можно рекомендовать этот метод и для ориентировочного определения механического состава почв при камеральной их обработке.

Ситовой метод механического анализа почв

Ситовой метод механического анализа в почвоведении применим для определения каменистой части почв любого механического состава, при анализе песков, а также при отделении среднего песка

от мелкого и физической глины. Эти операции мы приурочиваем к рекомендуемой классификации механических элементов почвы по их крупности (см. табл. 8).

Для определения каменистой части почвы используют сито с диаметром отверстий в 3 мм. Процесс отсеивания каменистой части почвы лучше произвести в поле, так как для точного учета каменистости в случае высокого содержания камней необходимо просеять несколько килограммов почвы.

Просеиваемую навеску с камнями взвешивают в поле при естественной влажности с точностью до 0,1 г, а в случае нескольких килограммов — с точностью до 1 г. Одновременно берут пробу для определения влажности мелкозема и (отдельно) влажности каменистого материала.

Каменистую часть почвы перед взвешиванием освобождают от приставшего к камням мелкозема с помощью жесткой волосистой щетки.

В лаборатории обычным способом определяют влажность мелкозема и влажность каменистой части. Каменистость почвы рассчитывают в процентах на сухую почву: процентное отношение сухих камней к сумме сухой навески мелкозема плюс сухая каменистая часть.

Из почвы, просеянной сквозь сито с отверстиями в 3 мм берут среднюю пробу для дальнейшего механического анализа.

Навеску в 100—150 г после растирания по частям в фарфоровой ступке пестиком с каучуковым наконечником просеивают в воздушно сухом состоянии сквозь сито с отверстиями в 1 мм. Перед просеиванием учитывают влажность почвы.

Гравий, оставшийся на сите, собирают, очищают водой от приставшего к нему мелкозема, высушивают до абсолютно сухого состояния и рассчитывают в процентах к абсолютно сухой навеске почвы (мелкозем плюс гравий).

Таким образом, гравий (механические элементы размером 3—1 мм) войдет в 100% анализируемой навески.

Дальнейший процесс механического анализа почвы подробно описан ниже. Здесь отметим лишь, что в процессе этого анализа применяются два сита для мокрого просеивания фракций почвы с диаметром отверстий 0,5 и 0,25 мм.

Ситовой анализ песков

Наиболее часто ситовой анализ применяют при изучении песков. Рекомендуем выделять фракции: 1) гравия (3—1 мм); 2) крупного песка (1—0,5 мм); 3) среднего песка (0,5—0,25 мм); 4) мелкого песка (< 0,25 мм). Иногда используют в анализе также сито с диаметром отверстий в 0,1 мм, но следует отметить, что фракции < 0,1 мм ситовым анализом учитываются не точно.

Чтобы установить размеры песчаных зерен, очищают песок

от приставшего к песчинкам мелкозема. Для выполнения этой операции целесообразно воспользоваться подготовкой песка к анализу по методу Ностица (Nostiz, 1936). Анализируемую пробу песка размачивают 24 часа в дистиллированной воде с прибавкой NH_4OH до явного запаха. В последующем песок растирают в чашке пальцем в резиновом напальчнике, муть сливают несколько раз до полного просветления раствора.

Очищенный таким образом песок кипятят на водяной бане с однопроцентным раствором H_2O_2 для очищения от возможных примесей органического вещества.

В дальнейшем песок просеивают через гнездо сит: 1-е сито (верхнее) — диаметр отверстий 1 мм; 2-е сито (среднее) — 0,5 мм; 3-е сито (нижнее) — 0,25 мм.

Анализ (просеивание) может производиться сухим и мокрым способом. При этом, в случае тщательной очистки песка перед анализом от приставшего мелкозема, различия в результатах анализа сухим и мокрым способами незначительны.

При ситовом анализе почв и песков приходится пользоваться ситами круглодырчатыми (штампованными) и сетчатыми — с квадратными отверстиями. Возникает вопрос, каким ситам отдать предпочтение. Круглые отверстия обеспечивают в плане прохождения через них механических элементов более выровненного размера, нежели квадратные. Через круг в плоскости проходят механические элементы, имеющие размер не свыше его диаметра. Через квадрат, у которого сторона равна диаметру круга, в плоскости по диагонали могут пройти и более крупные элементы, нежели через круг. Казалось бы, во всех случаях нужно предпочесть круглодырчатые сита, однако этого сделать нельзя. Во всяком сите есть «вредная» площадь, располагающаяся между отверстиями. Чем она больше, тем сильнее истирание механических элементов почвы или песка при просеивании. В штампованных круглодырчатых ситах вредная площадь дна тем больше, чем меньше диаметр отверстий, поэтому в ситах с мелкими отверстиями степень искусственного истирания механических элементов значительная и значительнее ошибки в анализах.

На Международной конференции по физике почв во Франции (в Версале) в 1934 г. было принято постановление, согласно которому сита < 0,5 мм должны быть сетчатыми, а сита с отверстиями в 0,5 мм и более — круглодырчатыми, штампованными.

Механический анализ почвы в струе воздуха

Опубликовано описание нескольких попыток механического анализа почвы в струе воздуха. Наиболее известным прибором для этой цели является прибор Кашмена (1907 г.).

Аппарат Кашмена для разделения механических элементов почвы в струе воздуха представляет собою сочетание пяти воронок

в форме усеченного конуса, обращенных узким концом вниз (рис. 6). Объем воронок 13,5 л, 9 л и три по 4,5 л. Воронки между собой соединены трубками таким образом, что трубка начинается ворончатым расширением (уловителем механических элементов) в верху предыдущей воронки, а тонким концом опускается почти до дна последующей воронки. Дно первой воронки соединено с нагнетательной воздуходувной машиной (компрессор Вестингауза). Из последней (пятой) воронки имеется вывод в вакуум. Ворончатое расширение трубки, ведущей в вакуум, затянато плотным полотном, задерживающим мелкозем в пятой воронке.

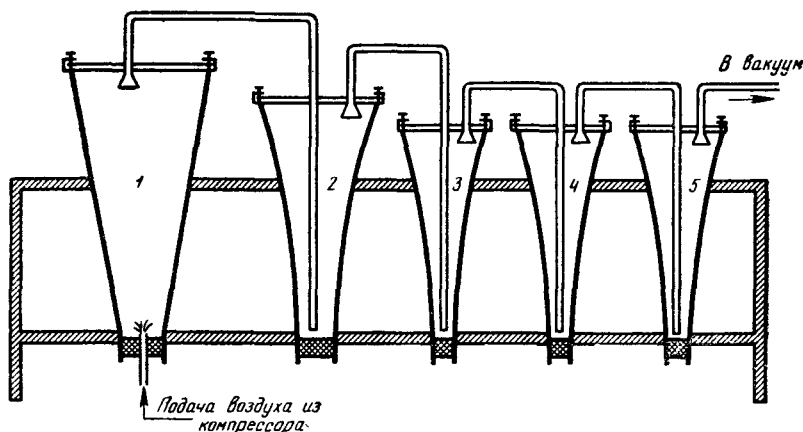


Рис. 6. Аппарат Кашмена для разделения механических элементов почвы в струе воздуха

Абсолютно сухая навеска почвы в пределах 1 кг, предварительно пропущенная в сухом виде сквозь сито, помещается на дно первой (большой) воронки. Затем включаются воздуходувная машина и вакуумная установка. Подаваемый в систему воронок воздух предварительно высушивается в трубках с пемзой, смоченной серной кислотой. Ток воздуха должен быть равномерным, обеспечивающим пылимость почвенной пробы в виде облачка. Анализ заканчивается, когда перенос мелкозема из одной воронки в другую прекращается.

Механические элементы распределяются от самых крупных в первой воронке до самых мелких — в последней.

В принципе метод Кашмена весьма интересен. Но на практике при анализе почв, тяжелых по механическому составу, он дает весьма неустойчивые результаты вследствие электризации и выхлопывывания наиболее тонких механических элементов почвы. Кроме того, на результатах анализа, как показали исследования Лиона (Lyop, 1924), сильно сказываются изменения атмосферного давления и температуры воздуха. Значительно более применим

этот метод для механического анализа песков, для характеристики пылимости, развеваемости грунтов.

Используя принцип анализа по Кашмену в этих целях, значительное усовершенствование в него внес В. Е. Соколович (1947). В аппарате Соколовича регулируются давление, скорость ветра, относительная влажность воздуха. Это позволило автору установить ряд закономерностей в пылимости различных грунтов в зависимости от их генезиса и степени увлажнения в пределах от абсолютно сухого состояния до максимальной гигроскопичности.

МЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОЧВЫ В ВОДНОЙ СРЕДЕ

Механический анализ почвы в водной среде в настоящее время является самым распространенным. Он основан на учете различных скоростей падения механических элементов в жидкостях (в нашем случае — в воде) в зависимости от их крупности, что в свою очередь обусловлено увеличением абсолютной и удельной поверхностей частиц по мере их дробления.

Пример: поверхность 1 см^3 твердой фазы равна $1 \text{ см}^3 \times 6 = 6 \text{ см}^2$. Удельная поверхность (отношение поверхности к объему) равна 6. При дроблении 1 см^3 на кубики с ребром в 1 мм поверхность 1 см^3 вещества возрастает до величины $(0,1)^2 \times 6 \times 1000 = 0,06 \times 1000 = 60 \text{ см}^2$, а удельная поверхность — до 60.

Аналогичным расчетом можно показать, что поверхность 1 см^3 твердой фазы почвы при дроблении ее до коллоидных размеров (ребро кубиков $0,1 \mu$) достигнет $600\,000 \text{ см}^2$ и удельная поверхность одного кубика (отношение его поверхности в квадратных сантиметрах к объему в кубических сантиметрах) достигнет 600 000 и т. д.

Следовательно, при падении частиц в жидкости поверхность трения их (вернее — сольватных оболочек) о жидкость будет тем выше, чем мельче частицы. С уменьшением диаметра частиц соответственно уменьшаются и скорости их падения.

Второе обязательное условие, которое кладется в основу механического анализа почвы в воде — это постоянство скоростей падения механических элементов почвы в жидкостях. Выяснению этого вопроса значительное внимание уделил наш великий химик Д. И. Менделеев (1880). Приводим результаты одного из его опытов.

В цинковый цилиндрический сосуд со стеклянными боковыми прорезями, наполненный водой, опускался латунный шар диаметром 4 см , удельный вес латуни 8,1. Через стеклянные просветы фиксировалась быстрота падения шара на отрезках пути (считая от поверхности воды): $0-40 \text{ см}$; $40-100 \text{ см}$, и $100-160 \text{ см}$. Опыт был повторен пятикратно. Итоговые результаты опыта, в среднем из пяти повторностей, приведены ниже.

Отрезки пути	$0-40 \text{ см}$	$40-100 \text{ см}$	$100-160 \text{ см}$
Время прохождения шаром каждого отрезка пути, сек . .	3	3,92	3,61

Скорость падения шара на отдельных отрезках пути, <i>мм/сек</i>	133	153	161
Приращение скорости на втором и третьем отрезках пути, <i>мм/сек</i>		20	8

На втором участке пути (40—100 см) ускорение падения шара достигло 20 *мм/сек*; на третьем отрезке пути, который равен второму (100—160 см), оно снизилось почти в три раза — до 8 *мм/сек*. На дальнейшем пути падения шара приращение скорости его движения (Δv) стремится к нулю.

Д. И. Менделеев заключает: «Падение тел в жидкой среде совершается медленнее, чем свободное падение, не только потому, что уменьшается вес их на вес вытесненной жидкости, но еще и потому, что действует сопротивление среды, направленное в сторону, противоположную с направлением движения. Если назовем сопротивление через R , то, зная, что сопротивление каждого тела в каждой среде возрастает вместе со скоростью, станет очевидным, что наступит при некоторой скорости C такое сопротивление, что оно будет равно весу тела: R (сопротивление) = P (весу тела), а тогда ускорения не будет и, следовательно, прекратится прирост скорости и движение станет равномерным» (1946, стр. 291).

Об этом же явлении известный английский физик почвы Кин (Keen, 1931) пишет: «Когда частица только начинает падать, то ее скорость увеличивается до тех пор, пока сила тяжести не будет уравновешена силою трения, возрастающей с увеличением скорости падения».

В опыте Менделеева испытывалось крупное тело — латунный шар диаметром 40 *мм* и удельным весом 8,1. Он не достиг постоянной скорости движения в воде даже на протяжении 160 см.

При механическом анализе почвы в воде самые крупные частицы имеют диаметр 0,25 *мм*, а удельный вес их в среднем 2,60. В силу означенного, как показали прямые микроскопические наблюдения различных исследователей, механические элементы почвы начинают падать в воде с постоянной скоростью от начальных этапов пути их движения. Практически в наших расчетах при механическом анализе почвы мы можем принять, что на всем протяжении пути в жидкости (в нашем случае в воде) механические элементы почвы падают с постоянной скоростью, свойственной каждой почвенной частичке.

Совершенно очевидно, что скорость падения частиц почвы зависит не только от их размеров, но также от формы частиц и их удельного веса. В соответствии с этим введено понятие о г и д р а в л и ч е с к о й с к о р о с т и ч а с т и ц, под каковой понимается способность частиц падать в жидкости с определенной постоянной скоростью в зависимости от их размера, формы и удельного веса.

При механическом анализе почвы мы говорим об определенном диаметре частиц. Как же согласовать это положение с фактической формой частиц, иногда весьма далекой от формы шара? Это затруднение успешно устраняется предложением английского почвоведов Свен-Одена (Oden Sven, 1915), введшего понятие об эффективном диаметре частиц. Под эффективным диаметром следует понимать диаметр такого шара, который будучи сложен из того же материала, что и данная частица, падал бы в жидкости с той же скоростью, как и данная частица. При ситовом анализе за эффективный диаметр просеиваемых частиц практически принимают диаметр отверстий сита, через которое проходит 10 весовых процентов просеиваемого материала.

Для расчета гидравлической ценности частиц (в нашем случае механических элементов почвы) были проведены специальные изыскания и предложены формулы многими исследователями (Стокс, Вильямс, Аппиани, Босуелл, Шене и др.). Широкое распространение в конце XIX и начале XX вв. получила формула Шене (1867) для определения скоростей падения механических элементов почвы в воде. Первоначально Шене исходил из теоретического соотношения

$$\frac{d}{d_1} = \frac{v^2}{v_1^2}, \quad (1)$$

где d и d_1 — диаметры частиц в мм, а v и v_1 — скорости падения их в жидкости в мм/сек.

Из пропорции (1) следует, что

$$d \text{ (мм)} = \frac{d_1 v^2}{v_1^2} \text{ или } d \text{ (мм)} = v^2 K \text{ (мм/сек)}, \quad (2)$$

где K — определенный коэффициент.

Опытным путем Шене уточнил, что

$$K = \frac{0,0518}{S-1},$$

где S — удельный вес частиц;

1 — удельный вес воды.

Если S принять за 2,65, то K будет равен 0,0314.

Кроме того, в уравнении (2) член v^2 должен быть исправлен на

$$v^{7/11} = \sqrt[11]{v^7}.$$

В окончательном виде формула Шене получит выражение:

$$d \text{ (мм)} = 0,0314 \cdot v^{7/11} = 0,0314 \cdot \sqrt[11]{v^7} \text{ (мм/сек)}. \quad (3)$$

Данная формула позволяет вычислить скорости падения механических элементов почвы в воде в зависимости от их крупности.

Шене ограничивал условия приложения своей формулы скоростями 0,1—12 мм/сек и температурой около 20° С.

Для этих условий найдены следующие скорости:

Диаметр частиц мм	Скорость падения мм/сек
0,1	7
0,05	2
0,01	0,2

Диаметр фракций почвы, выделяемых на его аппарате и по его скоростям, соответствовал размерам: 0,25—0,05 мм; 0,05—0,01 мм; < 0,01 мм.

Существенным недостатком формулы Шене, как и всех других, за исключением формулы Стокса, был недоучет в ней температурных условий, влияющих на вязкость воды, а следовательно, на скорости падения механических элементов. Тем не менее формула Шене заслуженно для своего времени получила широкое распространение в международной почвенной практике при механическом анализе почв.

Механический анализ почв в воде прежде всего можно разделить на две группы: 1) анализы в текущей воде; 2) анализы в стоячей воде.

Механический анализ почв в текущей воде

Приборы и методы для механического анализа почв в текущей воде предлагали: Небель, опубликовано у Вольфа (Wolff, 1864), Шене (Schöne, 1867), Гильгард (Hilgard, 1879), Копецкий (Kopcesky, 1901), Краусс (Krauss, 1925), Енгл, Иодер (Engle a. Joder, 1926) и др.

Мы кратко ознакомимся с главнейшими методами, которые или сыграли существенную роль в развитии методов механического анализа почвы, или в том или ином варианте применяются в почвенной практике и теперь.

Метод Небеля (1864). Небель был предшественником Шене в развитии методов механического анализа почв. Он не пользовался формулой Шене и какими-либо другими скоростями падения механических элементов почвы в воде. Но исходя из практики, он предложил принцип и прибор для механического анализа почвы в текущей воде, которые в дальнейшем были усовершенствованы в работах Шене, Копецкого, Краусса и др.

В приборе Небеля (рис. 7) четыре различных по диаметру последовательно соединенных трубками грушевидных воронки обращены вершинами вниз. Суммарная емкость всех воронок 4 л. Отношение их объемов — I : II : III : IV = 1 : 8 : 27 : 64.

Почву перед анализом в количестве 30 г кипятят с водой несколько часов, после чего пропускают сквозь сито с отверстиями диаметром 3 мм. Мутную суспензию сливают во вторую воронку (см. рис. 7), осадок на сите переносят в первую воронку. Третью и четвертую воронки наполняют водой, после чего сквозь все четыре воронки из сосуда А, открывая кран b, пропускают ток воды,

причем 9 л ее должно вытечь наружу за 40 мин. Результаты анализа оцениваются так: в первой груше — хрящевой песок; во второй — песок грубый; в третьей — песок мелкий; в четвертой — песок глинистый; наружу из четвертой воронки отмучивается глина.

Принцип использования в приборе Небеля воронок с прогрессивно увеличивающимся диаметром, а следовательно, с прогрессивно уменьшающейся быстротой тока воды — правилен. Но поскольку воронки имеют формы усеченного конуса, в них нет отрезка

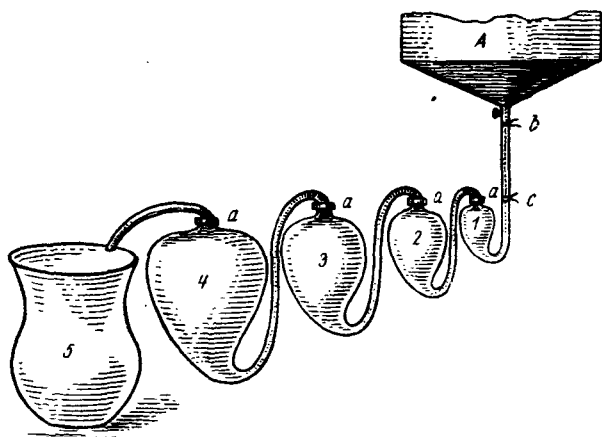


Рис. 7. Аппарат Вольфа (Небеля) для механического анализа почвы

пути, где скорости движения тока воды, а значит и суспензии, были бы постоянны. Кроме того, такая форма воронок вызывает завихривание суспензий, особенно при выходе их из воронок. Постоянство скорости падения механических элементов отсутствует. Результаты анализа оказываются неточными и трудно-воспроизводимыми.

Метод и прибор Небеля ввиду простоты и быстроты анализа получили значительную известность, в том числе и в России (см., например, Бараков, 1911), но неточность механического анализа по этому методу побуждала к его усовершенствованию. Следующим этапом развития этого метода механического анализа почвы в текучей воде можно считать метод Шене.

Прибор и метод Шене для механического анализа почв в текучей воде (1867 г.). Учтя недостатки прибора Небеля, Шене придал своему прибору форму и размеры, максимально обеспечивающие ламинарность (равномерность) движения воды (рис. 8).

Как видим на рисунке 8, нижняя часть прибора имеет коническую форму. Конус в нижней части с диаметром поперечного сечения 4,5 мм постепенно расширяется кверху и на высоте 50 см переходит в цилиндр. Поперечник цилиндрической части прибора —

5 см, высота ее 10 см. Вверху цилиндрическая часть прибора, симметрично и плавно сужаясь, заканчивается горлом воронки, в которое с помощью пробки вставляется пьезометр *C*, регистрирующий напор воды в приборе при анализе. Пьезометр имеет два перегиба под углом 45° . В нижнем перегибе сделано отверстие *D* в форме круга с диаметром 1,5 мм, через которое дисперсия во время анализа вытекает наружу и может собираться в стакан. Вода в прибор подается из бака *A*. Расход ее можно регулировать краном *B*. Скорость движения воды в приборе учитывается в цилиндрической его части. Прибор калибруется таким образом, что при напоре воды в пьезометре, равном 1,5 см, скорость движения воды в цилиндрической части сосуда равна 0,2 мм/сек. Вода или дисперсия в этом случае поступает из отверстия в пьезометре каплями. В случае давления в пьезометре, равного 30 см, быстрота тока воды в цилиндрической части прибора равна 2 мм/сек. Вода или дисперсия в этом случае вытекает из пьезометра тонкой струйкой.

Почва для анализа просеивается в сухом виде сквозь сито с отверстиями в 1 или 2 мм.

Навеску почвы в 25 г кипятят с водой 2 часа. Охлажденная дисперсия пропускается сквозь сито с диаметром отверстий в 0,20 или в 0,25 мм, а в некоторых вариантах анализа — сквозь шелковое сито*. Пропущенная сквозь сито дисперсия с помощью воронки количественно переносится в прибор через его горло. Прибор наполняют водой, затем приступают к отмучиванию механических элементов. Первоначально создается такой ток воды, чтобы скорость движения ее в цилиндрической части прибора равнялась 0,2 мм/сек. В пьезометре в этом случае будет отмечен напор в 1,5 см. С каплями воды наружу будет поступать фракция почвы <0,01 мм

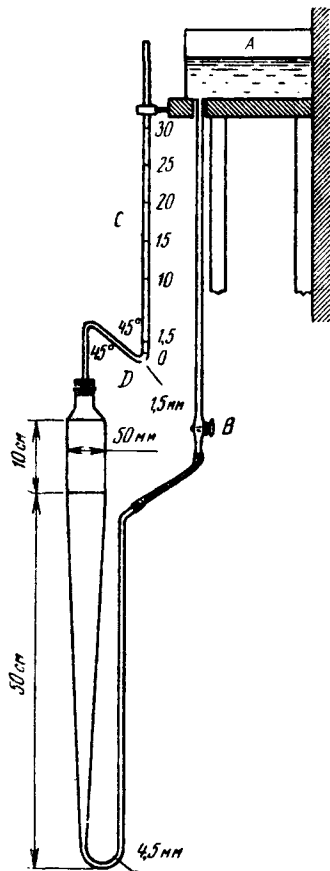


Рис. 8. Аппарат для механического анализа почв по Шене

* В России для сухого просеивания применялось сито с отверстиями диаметром 1 мм, для мокрого просеивания — 0,25 мм. В Западной Европе для сухого просеивания — сито с диаметром 2 мм; для мокрого просеивания — 0,2 мм.

(«физическая глина»). Отмучивание ее продолжается до тех пор, пока вытекающая из прибора вода не станет чистой от суспензий. Собранную дисперсию отстаивают, сливая чистую воду, затем выпаривают, полученные суспензии высушивают и взвешивают. Можно их учитывать и по разности, вычитая из навески почвы сумму остальных фракций.

Отмудив фракцию $< 0,01$ мм, с помощью крана В, ток воды в приборе усиливают до показаний пьезометра 30 см. Скорость потока воды в цилиндрической части прибора будет при этом 2 мм/сек. Наружу со струйкой воды будут сбрасываться суспензии с диаметром механических элементов 0,05—0,01 мм (крупная пыль или «лёссовидная» фракция почвы). Анализ продолжается до полного осветления сбрасываемой воды. Фракция 0,05—0,01 мм количественно учитывается.

В случае применения сит с диаметром отверстий в 1 и 0,25 мм в результате анализа получаем по Шене:

- 1) на сите при «мокром» просеивании фракцию крупного и среднего песка — 0,25—1 мм;
- 2) на дне прибора после отмучивания глины и пыли фракцию мелкого песка — 0,05—0,25 мм;
- 3) при скорости тока воды 2 мм/сек фракцию пыли — 0,01—0,05 мм;
- 4) при скорости тока воды 0,2 мм/сек фракцию физической глины $< 0,01$ мм.

Прибор Шене прост в употреблении. Анализ с помощью его протекает быстро. Результаты получаются значительно более точные, нежели в приборе Небеля.

Недостаток его, общий для всех приборов с проточной водой, тот, что в нем в силу завихривания тока воды при сужении и расширении сосуда невозможно добиться строгого постоянства скорости движения воды. Кроме того, в приборе Шене, по сравнению с прибором Небеля, шагом назад была замена серии воронок одной воронкой, удлинившая процесс анализа. Это упущение, как увидим ниже, устранено в приборе Копецкого.

Но для своего времени прибор Шене был наиболее совершенным. Он получил мировую известность, вошел во все почвенные руководства, вызвал многочисленные подражания. Во времена Докучаева — Сибирцева в русских почвенных работах, особенно на юге России, метод Шене пользовался наибольшим распространением. Применительно к результатам механического анализа почвы по Шене М. Н. Сибирцев разработал классификацию почв по механическому составу (см. стр. 128).

Прибор Копецкого для механического анализа почвы в текучей воде (1901, 1914). В приборе Копецкого сочетаются положительные стороны аппаратов Шене и Небеля. Из прибора Шене позаимствован тип сосудов для отмучивания, в которых обязательно имеется и превалирует по высоте цилиндрическая часть, чем обеспечивается

ламинарность тока воды в сосуде и наиболее постоянная его скорость. Из метода Небеля воспринято сочетание в одном аппарате нескольких сосудов-воронок различного диаметра. Это позволяет, пропуская воду через аппарат, создавать в отдельных сосудах различные скорости тока воды, а значит одновременно отмучивать в отдельных воронках фракции механических элементов различной крупности.

Копецкий при механическом анализе почвы пользовался скоростями падения механических элементов почвы в воде, рассчитанными по формуле Шене (см. стр. 76).

Для отмучивания фракций в означенных пределах в его аппарате сочетаются три воронки (рис. 9). Скорость тока воды в них должна быть: в первой воронке — 7 мм/сек, во второй — 2 мм/сек, в третьей — 0,2 мм/сек. Скорость регулируется подачей воды из бака А. Прибор предварительно калибруется по учету расхода воды и показанию пьезометра В. Диаметры воронок в приборе могут быть разные, но соотношения их должны быть постоянными.

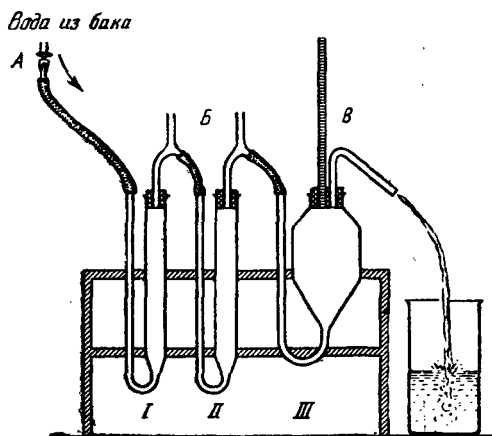


Рис. 9. Прибор Копецкого для механического анализа почвы

Как известно, при постоянном расходе воды в единицу времени скорость движения ее в цилиндрической части сосудов будет обратно пропорциональна площади поперечного их сечения, или обратно пропорциональна квадрату радиусов этих сечений. Следовательно, в нашем случае отношения поперечного сечения воронок, для соблюдения в них заданных скоростей токов воды в 7, 2 и 0,2 мм/сек, должны быть

$$I : II : III = \frac{1}{7} : \frac{1}{2} : \frac{1}{0,2} = \frac{1}{7} : \frac{1}{2} : 5,$$

или отношения радиусов поперечных сечений воронок:

$$I : II : III = \sqrt{\frac{1}{7}} : \sqrt{\frac{1}{2}} : \sqrt{5} = 0,378 : 0,707 : 2,24.$$

Принимая радиус первой воронки за единицу, получим $I : II : III = 1 : 1,87 : 5,92^*$.

* Необходимо отметить, что в книге С. В. Астапова «Очерки по изучению физических свойств почвы», 1928, на стр. 19 в этих расчетах допущена грубая ошибка.

Если диаметр первой воронки в приборе Копецкого определим в 30 мм, то диаметры второй и третьей воронок соответственно будут 56 и 178 мм.

Почва к анализу по Копецкому подготавливается так же, как и в методе Шене. Суспензия, пропущенная сквозь сито в 0,2 или 0,25 мм, помещается перед отмучиванием фракций в первую воронку. Все воронки наполняются водой. Тоже воды из бака к прибору регулируется краном, а скорость движения воды в воронках гарантируется показанием пьезометра *В*, который отградуирован ранее, при калибровке прибора.

Для отвода пузырьков воздуха из верхних перегибов трубок, соединяющих воронки, и для удаления невыявленных ранее органических остатков в этих частях трубок сделаны стеклянные отводки *Б*.

Вода пропускается до тех пор, пока из воронки третьей наружу не станет поступать совершенно чистая вода. К этому времени прекращается также переброска механических элементов из воронки первой во вторую и из второй в третью.

По окончании анализа, в случае применения сит для сухого просеивания с диаметром отверстий в 1 мм



Рис. 10. Большая воронка к аппарату Копецкого, предложенная Крауссом

и для мокрого просеивания — с диаметром отверстий в 0,25 мм, фракции почвы распределяются следующим образом:

- 1) на сите с диаметром отверстий в 0,25 мм — фракция 0,25—1 мм;
- 2) на дне первой воронки — фракция 0,25—0,1 мм;
- 3) на дне второй воронки — фракция 0,1—0,05 мм;
- 4) на дне третьей воронки — фракция 0,05—0,01 мм;
- 5) наружу из прибора будет отмыта фракция < 0,01 мм.

Фракции на сите и из воронок количественно учитываются. Вычитая сумму их из навески, получаем фракцию < 0,01 мм, отмытую из прибора наружу.

Метод механического анализа почвы в текучей воде, предложенный Копецким, получил международное распространение и вошел в многочисленные руководства по анализу почв. Он рекомендован для использования Вторым международным конгрессом почвоведов в Москве (1930), Версальской конференцией Международной ассоциации почвоведов (теперь МОП) по физике почвы (1934) и другими съездами и совещаниями почвоведов. В России он широко применялся наряду с методами Шене и Сабанина. В настоящее время в СССР, в связи с использованием новых методов

подготовки почв к механическому анализу и новой техники механического анализа, метод Копецкого применяется лишь в специальных целях, когда не требуется учитывать наиболее мелкие фракции ($< 0,001$ мм).

Заканчивая на этом обзор методов механического анализа почвы в текучей воде, напомним, что прибор Копецкого пытался усовершенствовать Краусс (Krauss, 1925). Он изменил форму третьей воронки в приборе Копецкого, устранив в ней цилиндрическую часть и придав ей форму плавно обтекаемой симметричной груши (рис. 10).

Однако прибор Краусса не прижился в почвенной практике.

Механический анализ почвы в стоячей воде

Большинство современных методов механического анализа почвы разработано применительно к спокойной (стоячей) воде (методы Осборна, Кноппа, Аппиани, Вильямса, Сабанина, Аттерберга, Глушкова, Робинсона, Филатова, Качинского, Долгова и др.).

Техника забора, сливания дисперсии, а также определения ее плотности и взвешивания суспензий в методах отдельных авторов — разные, но время, нужное для проведения наблюдений в этих целях, во всех методах рассчитывается по одним и тем же показателям: а) путь (h , см) свободного падения в воде механических элементов выше определенной (заданной в анализе) крупности; б) скорость падения механических элементов в воде (v , мм/сек); в) время, через которое производится отбор дисперсии (t , сек), плотность дисперсии и другие показатели.

Очевидно, что эти характеристики взаимно связаны

$$t = \frac{h}{v}; \quad h = v \cdot t; \quad v = \frac{h}{t}. \quad (4)$$

В начальный момент анализа подготовленную и помещенную в сосуд дисперсию взмучивают, чтобы придать ей гомогенное строение и плотность (рис. 11, I). С этого момента механические элементы начинают оседать в воде, причем более крупные из них обгоняют в пути более мелкие, в связи с чем дисперсия в сосуде дифференцируется на зоны (см. на рис. 11, II, зоны А, В и С). Наличие этих зон позволяет выделять из дисперсии механические фракции почвы различной крупности.

Например, сливая через t секунд дисперсию из зоны (из толщи) А, мы будем удалять самые мелкие частицы. Если ту же операцию производить для толщи дисперсии А + В, сливанию будут подвергнуты частицы первой и второй крупности.

Некоторое количество механических элементов первой и второй крупности за время t проникает в зону С. Если мы ставим себе цель отмыть их из дисперсии нацело, то в сосуд необходимо снова

добавлять воду, взмучивать дисперсию, сливать ее через t секунд и т. д., пока все частицы заданной крупности не будут удалены из сосуда.

На рисунке 11 дана схема простой смеси механических элементов трех размеров. В почвенной дисперсии картина значительно сложнее, но принцип разделения механических фракций почвы остается тот же.

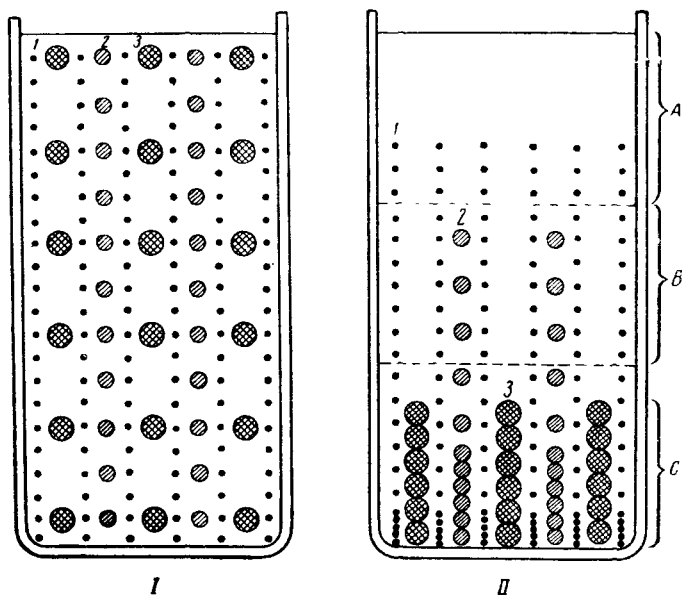


Рис. 11. Распределение механических элементов различной крупности (схема):

I — начальный период после взмучивания дисперсии; II — через n мин после взмучивания дисперсии; А, В, С — зоны.

Помимо отмучивания механических элементов, можно их учитывать и другими способами: взвешиванием через определенные интервалы времени на заданной глубине под водой или путем измерения на заданных глубинах через определенные отрезки времени плотности дисперсии.

Возникает вопрос: на какой же глубине и через какие отрезки времени необходимо учитывать плотность дисперсии? Глубина для учета плотности (путь h) устанавливается исследователем. Путь должен быть таким, чтобы жидкость в сосуде после взмучивания в начальный момент анализа пришла в состояние покоя, иначе колебательные движения жидкости исключат прямолинейное падение механических элементов почвы и условия анализа будут нарушены. Кроме того, путь (h) должен быть таким, чтобы время t , через которое необходимо повторять операции в анализе, позволяло

бы аналитику своевременно и доброкачественно их выполнить. При условии соблюдения указанных требований путь (h) для учета механических фракций нужно задавать наименьшим из допустимых, чтобы сократить время выполнения анализа.

Определив глубину (h) учета механических фракций заданной крупности (сливание, взвешивание под водой, учет плотности дисперсии), мы тем самым определили и интервал времени для производства операции, так как

$$t = \frac{h}{v},$$

где t — время в сек;

h — путь в мм;

v — скорость падения в воде механических элементов определенного диаметра в мм/сек.

К настоящему времени предложены десятки различных приборов и методов для механического анализа почвы в стоячей (спокойной) воде. Часть таких приборов изображена на рисунке 12.

Как видно на рисунке, дисперсия из цилиндров для анализа сливается с помощью различных кранов или сифонов, а иногда по принципу действия обыкновенной бюретки (прибор Виргеллера).

Кратко опишем лишь несколько методов и аппаратов, исходя из значимости их в истории развития механического анализа почвы и современной их применимости.

Механический анализ почвы способом двойного отмучивания с малой навеской, по Сабанину (1903). Метод механического анализа почвы по А. Н. Сабанину, как и ранее описанные, относится к валовым методам механического анализа: взятая для анализа проба почвы целиком дифференцируется на составляющие ее части, из которых каждая часть полностью количественно учитывается.

Название метода «двойного отмучивания» дано в связи с тем, что суспензии почвы дважды отмучиваются: сначала в фарфоровых чашках, потом в стаканах. Этим гарантируется наиболее совершенное диспергирование навески почвы.

Прибор Сабанина для механического анализа почвы включает в себя следующие детали (рис. 13): а) колбу с обратным холодильником для кипячения дисперсии; б) сифон для сливания дисперсии; в) стаканы, градуированные по высоте, с отметками: меньший — 2 и 4 см и больший — 6 и 12 см; г) чашки фарфоровые: большая — на 500 см³ и малая — на 100 см³; д) стеклянная палочка с резиновой лопаточкой для взмучивания дисперсии в стаканах; е) сито сетчатое с диаметром отверстий в 0,25 мм; ж) стеклянные банки емкостью в 2 л для сбора сливаемой из стаканов дисперсии; з) промывалка с дистиллированной водой; и) песочные часы на 100 и 30 сек.

Воздушно-сухая почва растирается в фарфоровой ступке пестиком с каучуковым наконечником и в сухом виде пропускается сквозь сито с отверстиями диаметром в 1 мм. Из отсеянной почвы по методу средней пробы отбирается навеска в 4 г («малая» навеска),

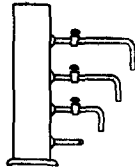
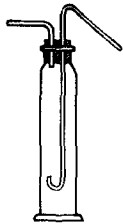
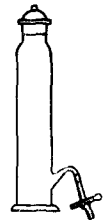
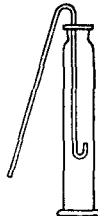
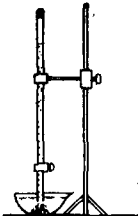
Приборы								
		<i>Княз</i>	<i>Кнопа</i>	<i>Апиани</i>	<i>Вагнера</i>	<i>Аттерберга</i>	<i>Ваншаффе</i>	<i>Виргеллера</i>
Размеры в см	Общая высота	30	45	40	40	40	40	60
	Высота наполнения водой	23	40	30	20	30	20	40
	Внутренний диаметр	8,5	10	6	6	8	6	1

Рис. 12. Приборы для механического анализа почвы

при этом учитывается гигроскопическая влажность почвы в процентах. Величина навески сообразуется с объемом малого стакана для отмучивания суспензии (около 100 см^3), что, по мнению автора метода, гарантирует свободное падение частиц в воде.

Навеска переносится в колбу с водой (отношение объема воды к объему навески 1 : 6, т. е. воды около 25 см^3) и кипятится 1 час с обратным холодильником. Охлажденная дисперсия строго без потери количественно сквозь сито ($0,25 \text{ мм}$) переносится в большую фарфоровую чашку, на дно которой наливается вода. При этом суспензия на сите слегка протирается пальцем в резиновом футляре и тщательно промывается водой из промывалки. Частицы на сите собираются в фарфоровую чашку, затем переносятся в тигель или в сушильный ста-



Рис. 13. Прибор Сабанина для механического анализа почвы

канчик, высушиваются и учитываются. Суспензия в большой чашке растирается пальцем. Через 20 сек муть сливается в малую чашку, а еще через 50 сек — из малой чашки в малый стакан. В большую чашку повторно доливается вода.

Операция отмучивания в чашках повторяется до полного осветления сливаемой в малый стакан жидкости, причем содержимое обеих чашек по мере осветления в них дисперсии объединяется в одной чашке. Полностью осветленный песок переносится в большой стакан для отмучивания суспензии.

Как только малый стакан наполнится дисперсией до отметки 4 см , приступают к отмучиванию в нем суспензий с помощью сифона. Установив стакан на полку штатива строго горизонтально по уровню, опускают в него конец сифона до отметки 2 см . Дисперсию взмучивают кручением между пальцами ручки лопаточки, выжидают 100 сек и сливают ее через сифон в стеклянную банку. При сливании нужно следить, чтобы сифон в последний момент не отрывался от жидкости, а соединялся бы с нею капиллярной каплей.

Время (t) 100 сек получено из расчета:

$$t = \frac{h}{v} = \frac{20}{0,2} = 100,$$

где 20 мм — путь;

0,2 мм/сек — скорость падения в воде (по Шене) механических элементов с диаметром, равным 0,01 мм.

После каждого сливания малый стакан пополняется дисперсией из малой чашки, а позже, когда отмучивание в чашках будет закончено, водой из промывалки. Операция сливания повторяется до тех пор, пока слой жидкости на уровне 2—4 см по прошествии 100 сек после взмучивания не окажется полностью свободным от суспензий. После этого содержимое малого стакана переносится в большой, где еще раз проверяется полнота отмучивания частиц $< 0,01$ мм. Для этого контролируется слой жидкости в большом стакане на уровне 6—12 см. Этот слой по прошествии 300 сек ($60 : 0,2 = 300$) должен быть свободным от суспензий. В противном случае необходимо продолжать отмучивание фракций $< 0,01$ мм до полного осветления слоя 6—12 см.

По завершении этой операции в большом стакане с помощью сифона производится отмучивание фракций 0,01—0,05 мм, для чего сливание жидкости следует производить через 30 сек после взмучивания дисперсии. Это время найдено из отношения $60 : 2 = 30$, где 60 мм — путь ($12 - 6 = 6$ см = 60 мм), 2 мм/сек — скорость падения в воде (по Шене) частиц диаметром 0,05 мм.

Процесс отмучивания частиц диаметром 0,01—0,05 мм заканчивается, когда слой жидкости в большом стакане на уровне 6—12 см через 30 сек после взмучивания оказывается свободным от суспензии.

В методе Сабанина предусмотрено и дальнейшее разделение фракции $< 0,01$ мм на пыль среднюю (0,01—0,005 мм), пыль мелкую (0,005—0,001 мм) и ил ($< 0,001$ мм), однако в практику эта часть анализа не вошла. Обычно он заканчивается учетом физической глины (частиц $< 0,01$ мм).

В результате анализа получают следующие фракции:

- 1) при сухом просеивании частицы > 1 мм;
- 2) при мокром просеивании частицы 1—0,25 мм;
- 3) на дне большого стакана частицы 0,25—0,05 мм;
- 4) при отмучивании из большого стакана (сливание дисперсии через 30 сек) частицы 0,05—0,01 мм;
- 5) при отмучивании из малого стакана частицы $< 0,01$ мм.

Все фракции $> 0,01$ мм собираются и строго количественно учитываются. Фракция $< 0,01$ мм, если дальнейшее разделение ее не предполагается, вычисляется по разности суммы всех более крупных фракций и навески.

Сабанин расчет всех фракций делал в процентах к воздушно-сухой навеске. В настоящее время механический состав почв вычисляется в процентах к абсолютно сухой почве.

Относительная простота и доступность метода Сабанина обусловили широкое его применение в научных и практических целях. До 1925—1930 гг. этот метод механического анализа почв был самым распространенным в нашей стране.

К недостаткам в технике метода нужно отнести засасывание сифоном суспензий из слоев жидкости, расположенных ниже заданных пределов (ниже 2 см в малом стакане и ниже 6 см в большом стакане). Вследствие этого в результате анализа почва, как говорят, «переутяжелелась», т. е. получалось завышение в ней мелких фракций.

Сабанин знал об этом недостатке своего метода и учел его в классификации почв по механическому составу. Если Сибирцев глинистыми считал почвы, в которых фракция $< 0,01$ мм составляла 33% и более (применительно к методу Шене), то Сабанин к глинистым относил почвы, содержащие свыше 50% физической глины. Вторым недостатком метода Сабанина является неодинаковая степень диспергирования различных почв. Почвы подзолистого типа по этому методу диспергируются полностью, тогда как карбонатные почвы, желтоземы и красноземы при анализе по методу Сабанина в значительной мере сохраняют микроагрегатное состояние.

В почвенной литературе известны попытки, с одной стороны, уточнить, а с другой — упростить метод Сабанина. М. М. Филатов (1925) сконструировал приспособление, устраняющее засасывание суспензий из слоев жидкости ниже заданной глубины. Сифон в приборе он заменил цилиндром с резиновым перепончатым дном, отверстие в котором, диаметром в 2—3 см, может открываться и закрываться резиновой пробкой, закрепленной на стеклянном стерженьке. Перепонка и пробка могут быть заменены створками по типу диафрагмы в микроскопе. Цилиндр с открытым дном опускается в стакан с дисперсией после ее взмучивания на глубину 2 см. По прошествии 100 сек ($20 : 0,2 = 100$) отверстие в дне закрывается, цилиндр извлекается из стакана и дисперсия сливается в банку. Операция повторяется до тех пор, пока не будет отмучена вся физическая глина (частицы $< 0,01$ мм). Отмучивание крупной пыли (0,01—0,05 мм) производится так же, как и в методе Сабанина. Прибор М. М. Филатова ввиду громоздкости не нашел применения в почвенной практике. В другом приборе, в так называемой воронке Филатова (1931), автор упростил прибор Сабанина (рис. 14).

Подготовка почвы к анализу в этом приборе производится так же, как в методе Сабанина, но отмучивание суспензий осуществляется без сифона, путем наклона воронки и сливания жидкости. Наполнение воронки дисперсией из чашек или просто водой и сливание из нее дисперсии производится до полного осветления сливаемой жидкости. Габариты воронки показаны на чертеже. Путь (h) для учета оседающих суспензий принят в 60 мм. Следовательно, сливания дисперсии (по скоростям Шене) при отмучивании физиче-

ской глины (частиц $< 0,01$ мм) должны производиться через интервал в 300 сек ($60 : 0,2 = 300$), а при отмучивании крупной пыли (частицы $0,01 - 0,05$ мм) — через 30 сек ($60 : 2 = 30$).

Нижняя часть воронки Филатова представляет собой узкий градуированный цилиндр. После отмучивания глины в этой части воронки скапливается песок. Объем песка, после уплотнения его

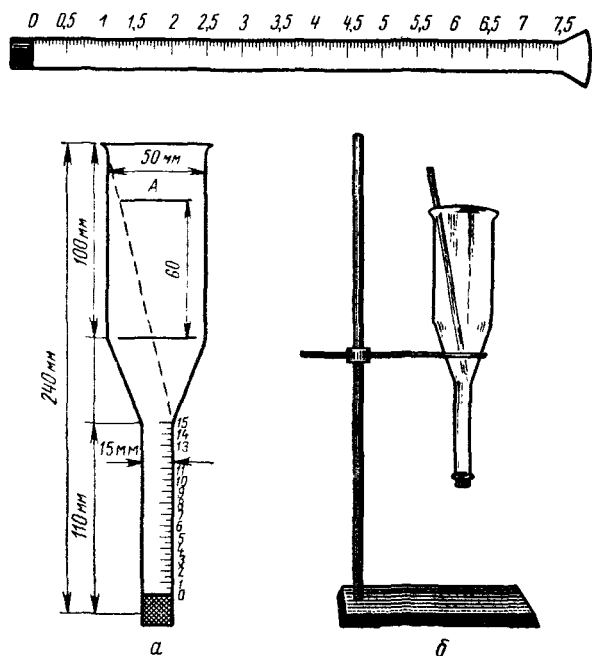


Рис. 14. Воронка М. М. Филатова для механического анализа почвы (размеры в мм)

постукиванием по воронке, может быть измерен. Отношение объема этого песка к определенному ранее объему всей набухшей навески почвы дает механическое число почвы:

$$M = \frac{100 \cdot v_1}{v}, \quad (5)$$

где M — механическое число почвы в процентах;

v_1 — объем песка;

v — объем набухшей почвы.

Чем больше механическое число, тем почва легче по механическому составу.

Наряду с воронками, изображенными на рисунке 14, в прибор Филатова входит набор градуированных цилиндрических трубок (мензурок) с ворончатым расширением сверху и с резиновой пробкой

в нижней части. В этих трубках производится сопоставление объемов одинаковых навесок почвы в сухом и сыром, набухшем (под водой) состоянии. Для опыта берется почва, просеянная сквозь сито с отверстиями диаметром в 1 мм и хорошо размятая в сыром состоянии. В результате сопоставления находят число набухания почвы

$$K = \frac{100 (v - v_1)}{v_1}, \quad (6)$$

где K — число набухания;
 v — объем набухшей почвы;
 v_1 — объем сухой почвы.

Чем выше число набухания, тем почва тяжелее по механическому составу. Воронка Филатова широко вошла в грунтоведческую полевую практику, но следует отметить, что получаемые с ее помощью характеристики весьма приблизительны.

Говоря об усовершенствованиях прибора Сабанина, следует назвать работу М. А. Орлова (1925), механизировавшего анализ почвы по методу Сабанина. Он объединил в один агрегат 10 приборов, с которыми может справиться один аналитик. Сифоны конструкции Орлова, по сравнению с сифоном Сабанина, обладают малой засасывающей силой и, следовательно, использование их в меньшей степени вызывает «переотмучивание» глины в анализе.

Разрабатывая свой метод анализа, Сабанин исходил из опыта работы в этой области А. А. Фадеева и В. Р. Вильямса (Вильямс, 1889). В основу их метода положен принцип отмучивания механических элементов почвы в воде способом декантации. Метод Фадеева—Вильямса дает в анализе результаты высокой точности, но ввиду больших габаритов сосудов для отмучивания, растягивается на многие дни, а иногда недели и требует больших объемов воды (до 100 л). Эта сложность анализа по Фадееву — Вильямсу воспрепятствовала широкому внедрению его в производственные лаборатории. Она же побудила Сабанина искать способы упрощения метода Фадеева — Вильямса и разработки общедоступного варианта анализа, что весьма успешно и было осуществлено.

Уравнение Стокса. До 1930 г. механический анализ почвы в разных странах и в СССР производился, в большинстве случаев, без учета вязкости воды при вычислениях скоростей падения механических элементов. Это приводило к случайным, несогласованным результатам анализов в работах отдельных исследователей.

Иллюстрируем данное положение несколькими примерами. Ниже сопоставляются скорости падения механических элементов почвы в воде по данным Вильямса, Шене и Стокса (мм/сек)

Эффективный диаметр частиц, мм	Скорость по Вильямсу	Скорость по Шене	Скорость по Стоксу, 15° С
0,05	—	2,0	2,029
0,01	0,33	0,165	0,081
0,005	0,0046	0,056	0,002
0,001	0,0012	0,0044	0,00081

Как видим, расхождения в показаниях достигают 400—500%. Следствием этого явилось выделение различными авторами под одними и теми же названиями механических элементов разной крупности с расхождениями в 200% и более (см. табл. 9).

Лишь на Втором международном конгрессе почвоведов в СССР в 1930 г. было достигнуто соглашение о применении во всех методах механического анализа почвы скоростей падения механических элементов в жидкостях, рассчитанных по формуле Стокса (Stokes, 1845), в которой учитывается влияние температуры на вязкость жидкости.

Иллюстрируем влияние температуры на вязкость воды и в соответствии с этим на быстроту падения в ней механических элементов почвы $< 0,001$ мм:

*Температура, °С Вязкость воды (v),
см-1. г-сек-1*

5	0,01525
10	0,01301
15	0,01138
20	0,01006
25	0,00895
30	0,00800

<i>Темпе- ра- тура, °С</i>	<i>Скорость падения, мм/сек</i>	<i>Время прохожде- ния пути в 70 мм</i>
10	0,00070	27 ч. 46' 40"
15	0,00081	24 ч. 00' 19"
20	0,00092	21 ч. 08' 07"
25	0,00103	18 ч. 52' 41"

Из анализа приведенных данных можно сделать вывод, что игнорирование влияния температуры на результаты механического анализа в интервале 10—25° С приводит к ошибкам в 50% к определяемой величине, т. е. делает результаты анализов несравнимыми и лишает их всякой ценности. При этом следует учитывать, что диапазон колебания температур при анализах практически превышает 15° С, а потому ошибки могут быть значительно выше указанных здесь.

Уравнение Стокса, теоретически выведенное из законов гидродинамики для выявления скорости движения шарообразных частиц в вязкой однородной среде под влиянием постоянной силы, имеет вид:

$$\omega \text{ (дин)} = 6\pi \cdot \eta r v, \quad (7)$$

где ω — сопротивление движению в жидкости;

η — вязкость среды;

r — радиус падающей сферы;

v — скорость движения сферы радиуса r .

Если в нашем случае движущей силой является вес падающих частиц и скорость движения их постоянна, то уравнение примет вид:

$$\omega = 6\pi\eta r v = \frac{4\pi r^3}{3} \cdot (\sigma_1 - \sigma) \cdot g, \quad (8)$$

где $\frac{4\pi r^3}{3}$ — объем падающей сферы;

σ_1 — плотность падающей сферы;

σ — плотность среды (в нашем случае — воды);

g — ускорение силы тяжести.

Из уравнения (8) следует:

$$v = \frac{4\pi r^3 (\sigma_1 - \sigma) \cdot g}{3 \cdot 6\pi\eta r} = \frac{2}{9} g \cdot r^2 \frac{(\sigma_1 - \sigma)}{\eta}. \quad (9)$$

Уравнение (закон) Стокса справедливо при соблюдении следующих условий:

1. *Механические элементы должны быть в сотни и тысячи раз крупнее, нежели молекулы жидкости* (в нашем случае — воды), иначе при падении они будут подвержены броуновскому движению, что исключит прямолинейность пути их падения.

2. *Частицы должны быть сферической формы, гладки и неэластичны*. Двум первым условиям этого пункта механические элементы почвы часто не удовлетворяют, поэтому введено понятие об эффективном диаметре частиц (см. выше).

3. *Частицы в жидкости должны падать с постоянной скоростью, когда ускорение движения равно нулю*. При падении механических элементов почвы в воде это условие практически осуществляется с первых мгновений падения частиц. Так, по формулам Вейссенгофа и Саксера можно рассчитать с точностью до 1%, что для кварцевых зерен с $d = 0,1$ мм, с удельным весом 2,65 для $t^\circ \text{C} = 20$ и для $\eta = 0,010$ постоянная скорость падения частиц наступает через 0,032—0,027 сек.

4. По границе *поверхность частицы — среда* не должно быть скольжения, характерного для идеальной жидкости.

При падении механических элементов почвы в реальной жидкости — воде внутреннее трение дисперсной фазы с дисперсионной средой всегда имеет место.

5. Скорость падения частиц не должна превышать определенной величины (это условие разъяснено ниже).

6. На поверхности падающих частиц не должно быть многослойных сольватных оболочек.

7. Объем жидкости должен быть таким, чтобы влияние пограничного слоя жидкость — внутренняя поверхность сосуда исключалась. Ниже приводим расчеты Гесснера (Gessner, 1931), характеризующие это явление в зависимости от радиуса сосуда.

Из приведенных данных видно, что не следует для механического анализа почвы использовать цилиндр диаметром менее 5—8 см,

причем пробу суспензии для анализа нужно брать из центральной части сосуда.

<i>Радиус сосуда, мм</i>	<i>Объем цилиндра, в котором частица подвержена влиянию стенок, %</i>
0,3	56
0,5	36
1,0	19
2,0	10
5,0	4
10,0	2
20,0	1
50,0	0,4

8. Плотность суспензии должна быть такой, чтобы механические элементы падали в жидкости свободно, независимо один от другого.

Перечисленные условия приложимости формулы Стокса были предметом специального обсуждения на Международной конференции по физике почвы в Версале (1934). На конференции было решено считать допустимым использование формулы Стокса для размеров частиц в диапазоне $d = 0,02 - 0,002$ мм.

Ограничивающими факторами для учета частиц $< 0,002$ мм по формуле Стокса являются: а) подверженность этих частиц броуновскому движению; б) значительная степень их гидротации, при которой объем частиц за счет сольватной оболочки и плотность их изменяются в такой степени, что значительно искажают свойства частиц.

Падение излишне крупных частиц также не соответствует закону Стокса, так как быстрота их падения превышает скорости, допустимые формулой. Кроме того, при падении крупных частиц появляется новая сила, не предусмотренная формулой Стокса. Частицы большого размера, падая в воде, не только расклинивают жидкость, но и гонят столб ее перед собой, преодолевая инерцию покоя жидкости.

Вопрос о верхнем пределе механических элементов, к которым приложима формула Стокса, уточнялся в ряде исследований. Предложены формулы для вычисления этого предела. Из них наиболее известной является формула Аллена (Allen, 1900):

$$v \geq \frac{\eta}{\sigma r}, \quad (10)$$

где v — скорость падения частиц в воде;
 η — вязкость воды при данной температуре;
 σ — плотность воды;
 r — радиус частицы.

Согласно этой формуле для приложимости закона Стокса требуется, чтобы скорость падения частиц была меньше или в край-

нем случае равнялась отношению $\frac{\eta}{\sigma r}$. Если эту формулу приложить к скоростям падения частиц с диаметром в 0,01 мм, то при 15° С получим $v \leq \frac{\eta}{\sigma r}$, или $0,081 < \frac{0,0114}{1 \cdot 0,005}$, или $0,081 < 2,3$.

Следовательно, формула Стокса к частицам диаметром 0,01 мм и менее вполне приложима. Аналогичный же расчет применительно к частицам с диаметром 0,05 мм показывает, что скорость падения частиц этого размера в воде при 15° С, равная 2,029 мм/сек, больше выражения $\frac{\eta}{\sigma r}$, которое для частиц с диаметром 0,05 мм равно 0,46, т. е. $2,029 > 0,46$. Значит, если принять формулу Аллена, закон Стокса для учета скоростей падения механических элементов почвы в воде нельзя применять, начиная с диаметра частиц 0,05 мм и выше.

К формуле Аллена в свою очередь предложена поправка Арнольда (Arnold, 1911) и Озеена (Oseen, 1910, 1913). Согласно уравнению Озеена, формулу Стокса можно применять для учета частиц при наибольшем диаметре в 100 мк (0,1 мм).

В СССР принято применять формулу Стокса для расчета скоростей падения механических элементов почвы в воде с диаметром в пределах от 0,05 до 0,001 мм (50 мк — 1 мк).

Чтобы расширить возможность использования в механических анализах посуды различных габаритов, предложены поправки к формуле Стокса. Одна из них — поправка Ладенбурга (Ladenburg, 1907) сводится к следующим видоизменениям формулы Стокса:

$$V = \frac{2}{9} g \cdot r^2 \frac{(\sigma_1 - \sigma)}{\left(1 + 2,3 \frac{r}{R}\right) \cdot \left(1 + 3,1 \frac{r}{L}\right)} \eta, \quad (11)$$

где даны те же характеристики, что и в формуле Стокса, и добавочно — R — радиус цилиндра для анализа и L — высота слоя жидкости в цилиндре. Если принять R цилиндра 3 см, а $L = 50$ см, то поправочные коэффициенты в знаменателе формулы, взятые в скобки, даже для самых крупных частиц, которые мы учитываем по скоростям Стокса (0,05 мм), выразятся величинами:

$$1 + 2,3 \cdot \frac{0,025}{30} = 1,0018 \text{ (первые скобки)}$$

и

$$1 + 3,1 \cdot \frac{0,25}{500} = 1,00015 \text{ (вторые скобки)}.$$

В результате выражение:

$$\eta \left(1 + 2,3 \frac{r}{R}\right) \cdot \left(1 + 3,1 \frac{r}{L}\right) = 1,002 \eta,$$

т. е. практически поправка Ладенбурга для сосудов указанных размеров сводится к нулю.

Механический анализ почвы с помощью пипетки. Идея механического анализа почвы в спокойной воде с помощью пипетки была предложена впервые отечественным ученым В. Г. Глушковым в 1912 г., им же для этой цели был сконструирован прибор (рис. 15).

Основное отличие пипеточного метода от ранее описанных заключается в том, что это метод средней пробы. По данному методу отдельные фракции почвы в анализируемой навеске учитываются не полностью, как, например, в методе Сабанина, Шене, Копецкого, а путем взятия средней пробы из дисперсии с опреде-

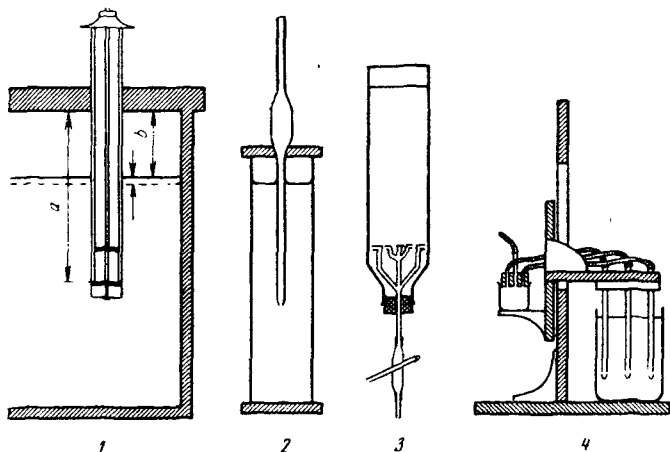


Рис. 15. Пипет-аппараты для механического анализа почв:

1 — Глушкова В. Г. (1912); 2 — Робинзона Г. В. (1922);
3 — Енингса Д. С., Томаса М. Д., Гарднера В. (1928),
4 — Краусса Г. (1923)

ленной глубины, с учетом скоростей падения механических элементов почвы в жидкости (в данном случае в воде).

При этом должно быть известно отношение объемов жидкости в сосуде для анализа к объему взятой средней пробы. В дальнейшем процентное содержание искомой фракции в анализируемой навеске почвы (F) находится из равенства:

$$F\% = \frac{ka}{A} \cdot 100, \quad (12)$$

где F — содержание данной фракции в почве в %;

k — число, показывающее отношение объема жидкости в цилиндре к объему дисперсии в средней пробе (в пипетке);

a — вес фракции в г;

A — вес анализируемой почвы в г.

Метод механического анализа почвы с помощью пипетки менее точен, нежели валовые методы, но, как будет показано ниже, возможная погрешность в нем (при заданной точности анализа)

вполне допустима. Вместе с тем время, потребное для производства анализа по этому методу, по сравнению с методами валовыми, сильно сокращается, особенно если одновременно выполнять серию анализов для 10—15—20 образцов почвы, как это обычно теперь делается.

В приборе В. Г. Глушкова (рис. 15) для механического анализа по методу средней пробы дисперсия почвы забирается с помощью трубки (аналог пипетки) в 10—15 см длины и 10—15 мм в диаметре. Снизу трубка закрыта шлифованным диском, соединенным со стержнем, проходящим в центре трубки. Верхняя часть стержня гаечкой соединяется с пружиной, опирающейся на крышку сосуда. Нажимом на гаечку отодвигаем донный диск трубки, и в нее через кольцевую щель поступает дисперсия с заданной глубины, поднимаемая до уровня жидкости в большом цилиндре. Опустив гаечку, закрываем дно цилиндра, вынимаем трубку и переносим дисперсию в стаканчик или тигель.

На рисунке 15 *a* — расстояние нижней части трубки, вбирающей дисперсию от верхнего края сосуда; *b* — расстояние исходного уровня жидкости в сосуде от верхнего края сосуда; *b* + *c* — то же после вхождения дисперсии в трубку. Глубина взятия пробы дисперсии

$$H = a - \left(b + \frac{c}{2} \right) \text{ мм.} \quad (13)$$

Объем пробы жидкости, забираемой трубкой Глушкова, — около 10 см³.

Примерно через 10 лет после опубликования работы Глушкова, независимо от него, аналогичные методы (пипет-методы механического анализа почвы) предложили: Робинзон — в Бангорте (Robinson, 1922), Еннингс, Томас и Гарднер — в Логане (Jennings, Thomas, Gardner, 1922), Краусс — в Дрездене (Krauss, 1923). Приборы названных авторов изображены на рисунке 15. Как видно на рисунке, прибор Робинсона представляет собою обычную пипетку, приложенную к цилиндру с помощью крышки для опускания пипетки в жидкость на постоянную (заданную) глубину. Пипетка трех авторов (Еннингса, Томаса и Гарднера) позволяет сливать пробу дисперсии с заданной глубины, причем для лучшего обеспечения средней пробы дисперсия забирается из нескольких точек, расположенных на одной глубине по плоскости поперечного сечения цилиндра. Наконец, прибор Краусса представлен тремя трубчатыми пипетками, через которые с помощью аспиратора дисперсия забирается из цилиндра одновременно в трех точках, расположенных в плоскости поперечного сечения цилиндра на одной глубине.

Прибор для механического анализа почвы с пипеткой Качинского — Федулова представлен на рисунке 16. Подробное описание пипетки дается ниже на стр. 113.

В советской литературе по инициативе П. А. Земятченского (Земятченский и Охотин, 1928) за пипеточным методом прочно укоренилось имя английского почвоведов Робинсона. Даже в настоящее время часто почвоведы, используя нашу методику и аппаратуру при механическом анализе, существенно отличные от

того, что рекомендовано Робинсоном, называют метод анализа его именем. Остальные авторы этого метода или остались неизвестными, или забыты. Хотя приборы для пипеточного метода механического анализа почвы, предложенные в разных вариантах после Глушкова, во многом удобней и точнее его прибора, все же по справедливости пипеточный метод механического анализа должен быть назван именем первоавтора этого метода — В. Г. Глушкова.

В заключение разбора принципиальных основ пипеточного метода механического анализа почвы коснемся точности работы по этому методу, воспользовавшись данными Б. А. Кина (Keen, 1931).

При отборе пробы дисперсии через t секунд после ее взмучивания с глубины h см предполагается, что проба берется из тонкого слоя в поперечнике цилиндра на уровне конца пипетки. В действительности, как показали наблюдения Кюна (Köhn, 1928), поступление дисперсии в пипетку идет по-разному, в зависимости от быстроты ее засасывания (рис. 17).

Рис. 16. Общий вид установки Качинского — Федулова для механического анализа почвы

В обычную пипетку, какую рекомендовал Робинзон, при медленном засасывании попадают суспензии, падающие близко и параллельно к конечной части ствола пипетки (рис. 17, 1). При быстром засасывании в пипетку забирается дисперсия из шарообразной сферы, соответствующей по величине объему пипетки (рис. 17, 2). Очевидно, что во втором случае засасывания дисперсии отступление от заданной глубины, а значит, и от заданной скорости падения частиц будет наибольшим. Вычислим ошибку для этого край-

него случая, считая, что дисперсия забирается через t секунд с глубины 10 см пипеткой, имеющей объем $v = 20 \text{ см}^3$. Сфера засасывания дисперсии в этом случае будет иметь радиус:

$$R = \sqrt[3]{\frac{3v}{4\pi}} = \sqrt[3]{\frac{60}{4 \cdot 3,14}} = 1,7 \text{ см.} \quad (14)$$

Следовательно, в пипетку будут попадать суспензии в диапазоне глубин: $h_1 = 10 - 1,7 = 8,3 \text{ см}$; $h_2 = 10 + 1,7 = 11,7 \text{ см}$, а скорость падения фактически учитываемых частиц, по сравнению

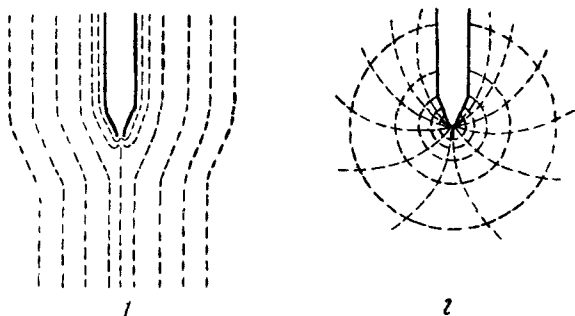


Рис. 17. Поступление суспензий в пипетку:
1 — при медленном заборе; 2 — при быстром заборе

с заданной $\left(v = \frac{10}{t}\right)$, будет варьировать от $v_1 = \frac{8,3}{t}$ до $v_2 = \frac{11,7}{t}$. Ошибка в любом из этих крайних случаев достигает 17%. Так, например,

$$\frac{v_2}{v} = \frac{11,7}{t} : \frac{10}{t} = \frac{11,7t}{10t} = 1,17.$$

Если $v = 100\%$, то $v_2 = 117\%$. На первый взгляд ошибка кажется недопустимо большой. Однако сопоставив ее со скоростями падения соседних по величине фракций, учитываемых в механическом анализе, приходим к иному заключению. Так, частицы диаметром 0,05 мм падают в воде при 15° С со скоростью 2,029 мм/сек, а частицы диаметром 0,01 мм соответственно 0,081 мм/сек. Соотношение между этими величинами равно 25,05, или 2505%. Если ошибку, отмеченную выше в пипет-методе, в 17% отнести к разнице учитываемых величин, то она составит $\frac{17 \cdot 100}{2505} = 0,68\%$, что никак не может исказить результаты анализа. Кроме того, ошибка может быть еще уменьшена, если применять пипетку с несколькими отверстиями для засасывания дисперсии, расположенными в плоскости по окружности.

Механический анализ почвы с помощью гидростатических весов. Использование гидростатических весов для механического анализа почвы предлагалось многими авторами: Г. Ф. Нефедовым (1902),

Свен-Оденом (Oden Sven, 1915, 1916), Н. А. Фигуровским (1939), Маршаллом (Marshall, 1956) и др. Суть метода заключается в улавливании на определенную площадь и взвешивании под водой оседающих суспензий, причем должны быть строго фиксированы: путь оседания (h в *см*) и время взвешивания (t_1, t_2, t_3 в *сек* или *мин*), а также температура дисперсии; на основании этих данных в дальнейшем возможно рассчитать размер осевших фракций и содержание их в исходной дисперсии. Для означенной цели конструировались различные приборы, из которых особого внимания заслуживают конструкции, предложенные тремя последними авторами. На рисунке 18 показаны седиментометрические микровесы конструкции Н. А. Фигуровского. Мы не станем описывать эти приборы, так как считаем сам метод гидростатических весов для механического анализа почв — среды полидисперсной и гетерогенной — непригодным.

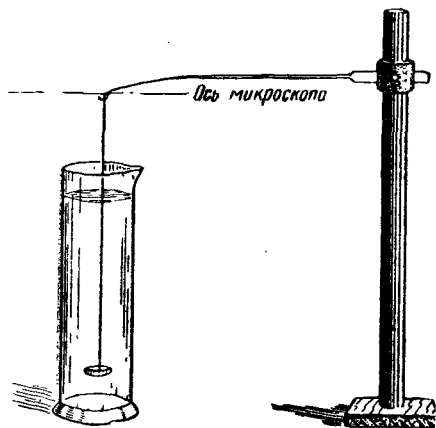


Рис. 18. Стеклопые седиментометрические микровесы (прибор с чашечкой) Н. А. Фигуровского

Назовем основные препятствия для использования этого метода.

1. При механическом анализе почв в водной среде мы имеем дело с фракциями от мелкого песка ($0,25-0,05$ мм)

до ила ($<0,001$ мм), причем в ил входят и коллоиды ($<0,0001$ мм). С помощью гидростатических весов нельзя учесть точно самые крупные и самые мелкие фракции. Учету крупных фракций препятствует быстрота их оседания в интервале времени, когда дисперсия еще не успокоилась после вливания ее в сосуд для анализа и перемешивания. Эту погрешность можно было бы частично исправить, погрузив чашечку или диск для взвешивания суспензий в жидкость на глубину не менее 25 см. Однако этого сделать нельзя, так как оседание частиц с диаметром в $0,001$ мм и удельным весом 2,65 на эту глубину при температуре 15°C затянулось бы более чем на 82 часа. По этой же причине нельзя учесть фракции $<0,001$ мм, так как срок их оседания продолжался бы неопределенно длительное время.

Отмеченные препятствия при механическом анализе почвы методом гидростатических весов для учета самых крупных и самых мелких фракций известны и авторам разбираемого метода. Свен-Оден в своей работе для примера приводит результаты анализа грубой глины из Дании, в котором с помощью его весов удалось

учесть лишь фракции диаметром от 1,5 до 30 *мк*. Не учтенными остались: фракции $< 1,5 \text{ мк}$ — 17,4% и фракции $> 30 \text{ мк}$ — 12,5% (цит. по Кину (Keen, 1933, стр. 48).

По Н. А. Фигуровскому, «основными требованиями, которые надо предъявлять к порошку, размеры частиц которого предстоит определить седиментометрическим методом, являются: 1) однородность порошка, 2) ограниченная полидисперсность порошка и 3) отсутствие в порошке растворимых примесей, в частности, примесей электролитов». И далее «под однородностью порошка понимают однородность его химического состава. Если порошок состоит из различных компонентов, то возникает серьезное затруднение при точном определении размеров частиц по скорости их оседания» (1939, стр. 109).

Так как почва — среда полидисперсная и гетерогенная, то естественно, что применение седиментометрического метода в почвенных исследованиях крайне ограничено. По данным В. Е. Корневской (1953), его можно использовать для получения приблизительных характеристик механических фракций почвы лишь в диапазоне 0,05—0,001 *мм*, причем суспензии с диаметром частиц $< 0,05 \text{ мм}$ необходимо готовить по Сабанину или другим способом. Фракции же с диаметрами частиц $> 0,05$ и $< 0,001 \text{ мм}$ нужно определять какими-либо другими методами. Все это настолько осложняет анализ, что использование его в почвенных лабораториях становится нецелесообразным. Утверждение академика Ребиндера о том, что метод профессора Фигуровского нашел широкое применение в почвенных лабораториях (см. предисловие к кн. Фигуровского, 1939), не соответствует действительности и вводит в заблуждение некоторых почвоведов-аналитиков.

2. Выше мы отметили, что метод гидростатических весов даже в диапазоне фракций с диаметрами 0,05—0,001 *мм* дает лишь грубо приблизительные величины (рис. 19). Это связано еще с одной погрешностью в методе, на которую впервые обратили внимание Коутс и Кроузер (Coutts, Crowther).

Под чашкой весов в дисперсии после оседания суспензий создается участок с меньшей плотностью дисперсии, нежели в боковом пространстве по периферии чашки. Разница в плотности дисперсии этих участков обуславливает появление диффузных токов, которые нарушают прямолинейное падение суспензий в жидкости — главное условие применимости теории Стокса.

Новейшим из известных нам приборов для механического анализа почв с помощью гидростатических весов является прибор Маршалла (Marshall, 1956), в котором чашка весов заменена поплавком обтекаемой формы. Размеры поплавка: диаметр — 2,5 *см*, объем — 35 *мл*; вес в воде — 3 *г*. Однако изложенные выше причины, исключающие широкое применение седиментометрического метода для целей механического анализа почв, не устранены в приборе Маршалла.

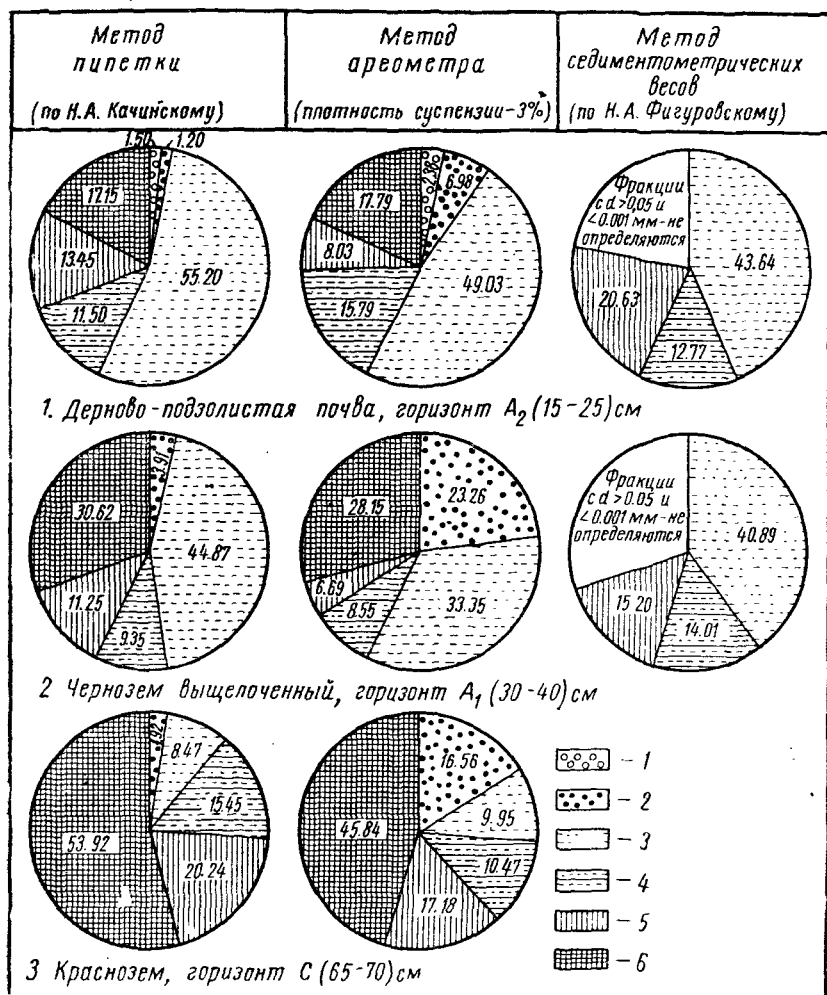


Рис. 19. Механический состав почв при различных методах анализа (в %). Подготовка образцов к анализу по методу Н. А. Качинского (анализировала В. Е. Кореневская):

1 — песок крупный и средний (1,0—0,25) мм; 2 — песок мелкий (0,25—0,05) мм;
 3 — пыль крупная (0,05—0,01) мм; 4 — пыль средняя (0,01—0,005) мм;
 5 — пыль мелкая (0,005—0,001) мм; 6 — ил (<0,001) мм

Метод механического анализа почвы на основе измерения плотности дисперсии

Чем больше механических элементов взвешено в жидкости (в нашем случае в воде), тем плотнее дисперсия, тем больше ее удельный вес. Если такую гомогенную после взбалтывания дисперсию оставить в покое, плотность ее, по мере оседания на дно сосуда суспензий и коллоидальных частиц, будет уменьшаться. Измеряя плотность дисперсии на определенной глубине h (см) через строго фиксированные интервалы времени ($t_1, t_2, t_3, \dots$) и зная температуру жидкости, по формуле Стокса можно рассчитать содержание в исходной дисперсии механических элементов различной крупности. Эта заманчивая по своей простоте идея привлекла внимание многих исследователей.

Ареометрический метод. Для проведения механического анализа почв рядом авторов начиная с 1917 г. использовались весы Мора (Pratolongo а. Nahn и др.), а позже аналогичные им различные поплавковые приборы (рис. 20, 21).

Наибольшее распространение среди поплавковых приборов в последние годы получили ареометры. Впервые метод ареометра был применен Буйюкосом (Bouyoucos, 1927) и Казагранде (Casagrande, 1934).

Сущность метода состоит в последовательном определении с помощью ареометра плотности дисперсии на глубине h (см) через заданные интервалы времени от 30 сек до 24 часов. Расчет механического состава почвы ведется с помощью специальной номограммы (в методе Казагранде *) или по формулам, как в работе Дейя (Day, 1956), который использует стандартный ареометр Американского общества исследований материалов со шкалой Буйюкоса. Последний метод расчета проще. В этом методе концентрация суспензии в граммах на литр вычисляется по формуле

$$C = R - R_i,$$

где R — отсчет ареометра в дисперсии;

R_i — отсчет ареометра, полученный при калибровке его в растворе гексаметафосфата натрия (50 мл 10-процентного раствора гексаметафосфата натрия плюс 950 мл воды). Процентное содержание фракции (P , %) находится по формуле

$$P = \frac{C}{C_0} 100,$$

где C_0 — навеска почвы в граммах, рассчитанная на литр воды при анализе.

* См. по этому вопросу работы Б. М. Гуменского (1935, 1949), А. Ф. Вадюниной и З. А. Корчагиной (1961).

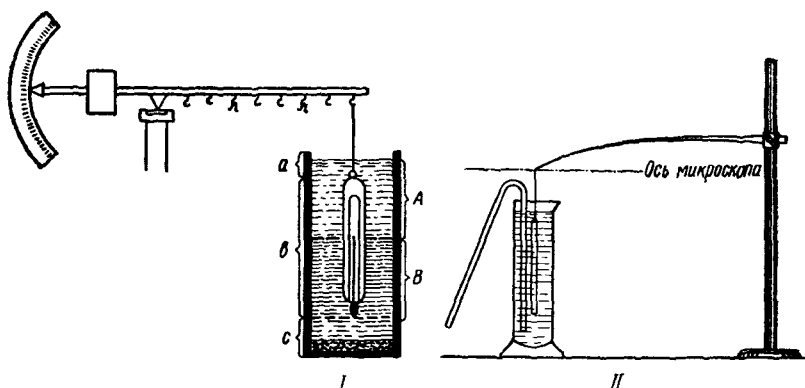


Рис. 20. Весы Мора в применении к седиментометрическому анализу (I) и поплавковый седиментометр Фигуровского (II)

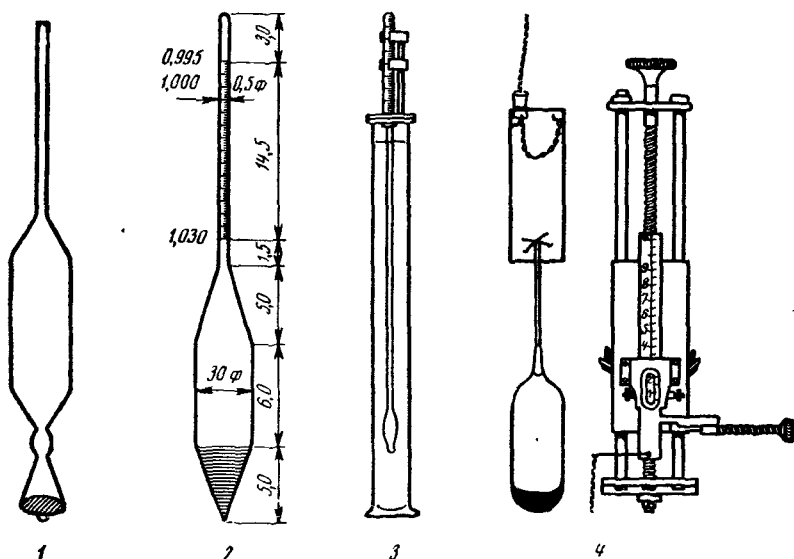


Рис. 21. Гидрометры различных систем:

1 — гидрометр по Буйюкосу (1925); 2 — ареометр по Казагранде (1935);
3 — гидрометр по Пури (1949); 4 — чейно-гидрометр (chaino — Hydrometer)
по Пури (1949)

Диаметры частиц (d) рассчитываются по формуле

$$d = \frac{\theta}{\sqrt{t}}, \quad (15)$$

где по Стоксу,

$$\theta = 1000 \sqrt{\frac{30\eta s}{g(\rho_s - \rho_l)}},$$

s — путь седиментации;

η — вязкость среды = 0,00807;

ρ_s и ρ_l — плотность частиц и среды, равные соответственно 2,650 и 0,99949;

g — ускорение силы тяжести, равное 980,7 см/сек;

t — время седиментации в мин.

Измерение рекомендуется производить при температуре 30° С. При иной температуре необходимо внесение поправки умножением полученных результатов на выражение $\sqrt{\frac{\eta}{\eta_{30}}}$, где η — вязкость воды при температуре опыта; η_{30} — вязкость воды при температуре 30° С.

В работе Дейя приводится таблица с величинами θ для различных отсчетов ареометра.

Простота метода механического анализа почвы с помощью поплавковых приборов, к сожалению, не сопровождается необходимой точностью работы по этому методу.

Основные ошибки в нем проистекают от следующих причин:

1. После взбалтывания дисперсии при учете крупных фракций ареометр погружается в колеблющуюся среду. Если срок отсчета (t) незначителен, как, например, при учете песчаной фракции, среда не успевает успокоиться. В этом случае исключено прямолинейное падение механических элементов, чем нарушается основное требование, предусмотренное формулой Стокса, и др. По этой причине песчаная фракция ареометрическим методом всегда учитывается неправильно.

2. Глубину нарастающего погружения ареометра в жидкость нельзя считать строго пропорциональной изменению плотности дисперсии, так как при этом погружается в жидкость не только луковица ареометра, но и его ствол, который при этом также испытывает потерю в своем весе (Фигуровский, 1939, стр. 80).

Еще более грубые ошибки отмечаются при пользовании приборами типа весов Мора, так как в этом случае поплавков размещается в нескольких различных по плотности зонах дисперсии (см. рис. 20, весы Мора).

3. На плечи ареометра садится часть суспензий, отяжеляющих его и тем искажающих истинные показания. Погрешность от этой причины возрастает по мере увеличения плотности дисперсии.

4. Плавающая ареометр совершает вращательные движения и может приближаться к стенке цилиндра, т. е. частью своего объема попадать в пограничный слой дисперсии, где быстрая падения суспензий отклоняется от нормальной. Этого можно избежать, снабдив сосуд для анализа приспособлением, центрирующим ареометр, но в этом случае возникает новая ошибка из-за трения ствола ареометра о направляющее колечко.

5. Под луковицей ареометра при оседании суспензий создается другая концентрация, меньшая, чем по периферии его, в силу чего возникают боковые диффузные токи, нарушающие прямолинейность падения суспензий. Это явление при использовании ареометра выражено слабее, нежели под чашкой седиментометрических весов, однако оно имеет место и усиливает погрешности анализа.

6. Точность учета различных фракций зависит от плотности дисперсии, причем увеличение или уменьшение плотности ее различно сказывается на точности учета крупных и мелких фракций. Так, если плотность исходной дисперсии равна 1%, то ко времени учета илистой фракции она настолько уменьшается, что ареометр «чувствует» ее неточно и отображает случайно. Эту неточность учета илистой фракции можно устранить, приняв плотность исходной дисперсии не в 1%, а в 3%, но в этом случае резко возрастут ошибки при учете крупных фракций — песка и крупной пыли.

При проверке ареометрического метода в лабораториях Почвенного института и МГУ (работы Е. И. Кочериной, А. Ф. Макаровой и Т. Н. Платовой, В. Е. Корневской) было установлено, что лучшие результаты по этому методу получаются при анализе почв средних по механическому составу, причем в случае плотности исходной дисперсии в 1% наиболее точно учитывается лёссовидная фракция. Ошибки резко возрастают при анализе песчаных и глинистых почв. Как видно из данных Корневской (см. рис. 19), расхождение в содержании илистой фракции и других фракций при сравнении результатов ареометрического метода с пипеточным может достигать 15% и более. В этом случае неточность ареометрического метода делается столь большой, что по данным анализа почва может попасть в другой класс по механическому составу, нежели при анализе пипет-методом. Так, например, почва, глинистая по результатам пипеточного анализа, может оказаться средним суглинком при ареометрическом анализе и т. п. (см. рис. 19).

Известен ряд попыток уточнить ареометрический метод. Так, Пури предлагает два гидрометра, которые, по его мнению, способствуют этой цели (см. рис. 21) (ареометры Пури, 1949). В первом из них значительно удлинен ствол ареометра. Это позволяет точнее учитывать крупные фракции, так как с возрастанием пути их оседания увеличивается интервал времени для первых отсчетов по шкале ареометра. Поэтому жидкость после взбалтывания sooner приходит в состояние покоя. Однако увеличение пути для

оседания суспензий сильно затягивает учет мелкой пыли (0,005—0,001 мм) и илистой фракции ($< 0,001$ мм).

О втором приспособлении в этом ареометре, при помощи которого центрируется его положение в цилиндре, мы говорили выше: оно имеет как положительное, так и отрицательное влияние.

Второй гидрометр, предложенный Пури (см. рис. 21), так называемый «цепной» гидрометр (chaino-hydrometer), отличается от всех ранее известных попыткой сочетать в нем быстроту определения плотности дисперсии гидрометрическим методом с точностью учета ее не объемным, а весовым путем (точность аналитических весов). Для этой цели гидрометр, погруженный в жидкость, подвешивается с помощью цепочки к системе передач, регистрирующих его вес в разные интервалы времени, всегда на одной и той же глубине. Глубина погружения ареометра фиксируется с точностью до долей миллиметра при помощи иглы в нижней части стального прямоугольника, закрепленного на его стволе.

Цепной гидрометр Пури позволяет точно регистрировать изменения в его весе по мере уменьшения плотности дисперсии, но он не снимает другие погрешности ареометрического метода, которые были отмечены выше.

Метод механического анализа почвы по Вигнеру (1918 г.). Метод механического анализа почвы по Вигнеру, как и ареометрический, основан на учете плотности дисперсии в сосуде оседания в различные интервалы времени. Для этой цели автором использована система двух сообщающихся сосудов (рис. 22).

В широкий сосуд *A* с продолжением *C* помещается испытуемая дисперсия; в узкий — *B* — дистиллированная вода. В силу различных плотностей дисперсии почвы и дистиллированной воды уровни жидкостей в сосудах *A* и *B*, в случае их соприкосновения в точке *H*, будут различны: уровень жидкости с меньшей плотностью будет выше. Плотность жидкостей принимается обратно пропорциональной высоте столба жидкости в сосуде. На этой основе производится расчет плотности дисперсии в сосуде осаждения.

Габариты прибора Вигнера таковы: трубка для осаждения суспензии *A* с продолжением *C* имеет длину 100—120 см. Отношение *A* к *C* примерно равно 4 : 1. Диаметр их 3,47 см, емкость трубки *A*—около 950 см³.

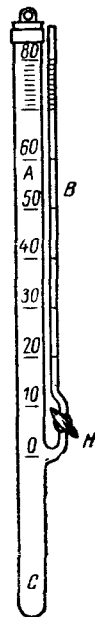


Рис. 22. Аппарат Вигнера для механического анализа почвы

Измерительная трубка *B*, которая ответвляется от трубки осаждения *A* и может изолироваться от нее краном *H*, имеет высоту,

равную трубке *A*. Диаметр измерительной трубки должен быть таким, чтобы в ней не проявлялся капиллярный эффект: практически он принимается равным 1 см.

Обе трубки выше места их соединения строго градуированы, причем наиболее точно (до 1 мм) градуированы верхние их части, в пределах которых производится отсчет разностей стояния менисков.

Перед анализом прибор, заполненный в пределах трубки *A* + *C* почвенной дисперсией и в пределах трубки *B* — дистиллированной водой, основательно встряхивается. При этой операции трубки закрываются тщательно подогнанными каучуковыми пробками и оборачиваются в вертикальной плоскости по кругу, в центре которого расположен вращающийся стержень с кольцевой шайбой, прикрепляющий прибор к массивной металлической стойке. После встряхивания прибор приводится в строго вертикальное положение, открывается кран *H* и регистрируется уровень жидкости в измерительной трубке через определенные интервалы времени (t_1, t_2, t_3).

В сосуде осаждения *A* уровень не измеряется: делается допущение, что при соотношении объемов трубок осаждения и измерительной приблизительно 10 : 1 колебание уровня жидкости в трубке осаждения будет незначительным и в окончательных отсчетах может быть учтено стандартной поправкой.

Располагая разницей уровней менисков жидкости в трубках для осаждения суспензий и измерительной, для каждого отрезка времени можно рассчитать плотность дисперсии в трубке для осаждения, а зная исходную плотность дисперсии, можно рассчитать также количество и процент осевших частиц за любой отрезок времени.

Имея путь осаждения (высота трубки *A*) и время осаждения фракций, находим скорости их падения (v , см/сек), а отсюда прямой переход к эффективному диаметру осевших фракций.

Даем расчет плотности дисперсии в трубке для осаждения по Вигнеру (Wiegner, 1918).

Обозначаем к началу опыта:

h_w — уровень воды в измерительной трубке (в см);

h_b — высота уровня почвенной дисперсии в трубке для осаждения;

S_m — удельный вес дисперсии при температуре опыта;

S_w — удельный вес воды при температуре опыта.

Поскольку высоты столбов жидкости в измерительной трубке для осаждения суспензий обратно пропорциональны удельным весам жидкостей сообщающихся систем, можно составить пропорцию:

$$\frac{h_w}{h_b} = \frac{S_m}{S_w}, \quad \text{откуда } S_m = \frac{h_w \cdot S_w}{h_b}. \quad (16)$$

Обозначив вес воды в трубке для осаждения суспензии через W , вес почвы через B и удельный вес твердой фазы почвы через S_b ,

найдем объем дисперсии в трубке осаждения:

$$\frac{W}{S_W} + \frac{B}{S_b} = \frac{(W+B)}{S_m} \quad (17)$$

В формуле (17) вместо S_m подставляем его значение из формулы (16), получим:

$$\frac{W}{S_W} + \frac{B}{S_b} = \frac{(W+B)h_b}{h_W \cdot S_W},$$

откуда

$$WS_b h_W + BS_W h_W = WS_b h_b + BS_b h_b$$

и

$$B = WS_b \frac{h_W - h_b}{S_b h_b - S_W h_W}.$$

Обозначив отношение высот жидкости в трубках для осаждения суспензий и в измерительной $\frac{h_b}{h_W}$ через v и разделив числитель и знаменатель третьего множителя в формуле на h_W , получим:

$$B = WS_b \frac{1-v}{S_b v - S_W} \quad (18)$$

Подобным же образом можно вычислить количество почвы, оставшейся в дисперсии (B_1) для любого момента времени от начала осаждения суспензии. Для этого необходимо лишь учесть в заданный момент отношение высот жидкости в трубках для осаждения и измерительной трубке:

$$\frac{h_{b1}}{h_{W1}} = v_1,$$

отсюда

$$B_1 = W_1 S_b \frac{1-v_1}{S_b v_1 - S_W} \quad (19)$$

Приняв исходное количество почвы в анализе за 100% и зная количество почвы, содержащееся в дисперсии в каждый данный момент, можно вычислить в процентах часть навески, еще оставшейся во взвешенном состоянии (x_1), а также часть почвы, уже осевшей (x_2):

$$x_1 = \frac{100B_1}{B} \% = \frac{100W_1 (1-v_1) (S_b v - S_W)}{W (1-v) (S_b v_1 - S_W)} \quad (20)$$

$$x_2 = 100\% - x_1 \% \quad (21)$$

Метод механического анализа, основанный на принципе Г. Вигнера, еще более прост, нежели ареометрический метод, однако он

* Считаем нужным отметить, что в сборнике работ Г. Вигнера («Избранные работы», Сельхозгиз, 1941), изданном под редакцией И. Н. Антипова-Каратаева, в разобранных нами расчетах (стр. 243—244) допущены грубые ошибки.

сопряжен с рядом неточностей, которые были известны и автору метода. Отметим главные из них:

1. Чтобы различия уровней жидкостей в трубках для осаждения суспензий и в измерительной при взаимодействии дисперсии с дистиллированной водой были точно регистрируемы, необходимы достаточно высокий столб жидкости в трубках и значительная концентрация суспензий. Этим обусловлена высота прибора в 100—120 см и применяемая плотность дисперсии в 3—6—12%.

Крупные габариты прибора затрудняют манипуляции с ним, особенно встряхивание дисперсии. Кроме того, в этих условиях затруднительно обеспечить единство и постоянство температур при анализе.

Важно также отметить, что путь (h) для осаждения суспензий, равный 80—100 см, крайне затягивает проведение анализа. Например, чтобы учесть фракцию с диаметром частиц $< 0,001$ мм, при величине h 80 см пришлось бы выжидать около 12 суток.

Нельзя признать нормальным и использование дисперсии с плотностью 6—12%. Хотя сам автор отмечает полную допустимость анализа при плотности дисперсии в 6% и лишь «едва заметное взаимодействие частиц» при плотности в 12%, из других исследований, о которых говорилось выше, мы знаем, что при плотности дисперсии больше 3% свободное падение механических элементов в жидкостях нарушается.

2. В начале анализа, когда открывается кран H (см. рис. 22), часть почвенной дисперсии проникает в измерительную трубку, чем нарушается правильность отсчета. Наоборот, по мере оседания суспензий, сопровождающегося уменьшением плотности дисперсии в трубке для осаждения, и опускания столба воды в измерительной трубке, часть дистиллированной воды из этой трубки поступает в трубку для осаждения. Дистиллированная вода, более легкая, чем дисперсия, устремляется вверх по трубке осаждения, нарушая прямолинейное падение суспензий.

Если первый дефект автор метода рекомендует исправлять доливанием воды в измерительную трубку еще до открывания крана H на высоту ожидаемого эффекта давления дисперсии, внедряющейся в трубку B , то погрешность, возникающая от проникновения дистиллированной воды в трубку для осаждения суспензий, остается некомпенсированной.

3. При отсчетах возможны погрешности до 1 мм, что, как указывает автор метода, может обусловить ошибку от 1,5 до 6% в зависимости от величины анализируемой навески.

Есть в этом методе и другие неточности, на которых мы не станем останавливаться.

Простота метода механического анализа почвы, основанного на принципе Вигнера, привлекла к нему внимание многих исследователей. Известен ряд попыток усовершенствовать этот метод: Оствальда и Хана (Ostwald Wo и Hahn F. V., 1922), Хана (Hahn F. V.,

1928), Гесснера (Gessner H., 1926, 1931) и др. Здесь мы лишь упомянем о приспособлении Гесснера, схематически изображенном на рисунке 23. Это приспособление, включающее автоматическое (с часовым механизмом) отсчетное устройство и объектив от кинопроекторного аппарата, позволяющий с пятикратным увеличением фотографировать кривую оседания суспензий, значительно уточняет регистрацию показаний прибора, но оно не касается других погрешностей метода, отмеченных нами выше.

Система механических анализов почвы и необходимость единого метода для производства массовых анализов. Универсального метода механического анализа почвы в научных исследованиях быть не может. В зависимости от объекта и цели исследования метод может меняться. Иногда, как справедливо указывает проф. Л. П. Розов (1936), нужно применять систему механических анализов. В частности, для пахотного и подпахотного слоев почвы в агрономических целях почти всегда целесообразно применять два метода анализа:

а) механический анализ почвы с предварительной химической подготовкой образцов к анализу;
б) микроагрегатный анализ почвы (в нашем понимании — без всякой химической подготовки образцов к анализу).

Данные анализа почв тяжелого механического состава по двум этим методам весьма достоверно характеризуют почвы в смысле потенциальной ее способности к оструктуриванию (подробнее см. об этом в настоящей главе, стр. 120).

А. Ф. Тюлиным выдвинута идея дробной пептизации почв при механическом анализе. Согласно этой идее при анализе не ограничиваются учетом валового содержания ила в почве, а дифференцируют его по степени подвижности, а значит, и активности, на коллоиды первой и второй групп. Этот подход позволяет допол-

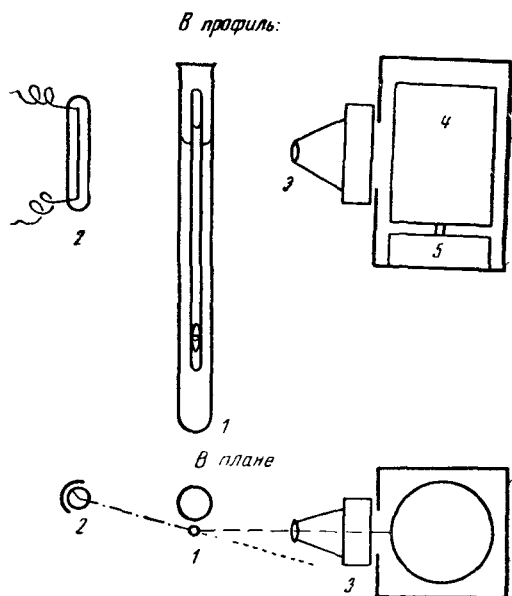


Рис. 23. Схема для фотографического регистрирования показаний прибора Вигнера (по Гесснеру):

1 — прибор Вигнера; 2 — источник света; 3 — фотоаппарат; 4 — барабан; 5 — часовый механизм

нительно охарактеризовать наиболее активную (дисперсную) часть почвы (Тюлин, 1936, 1938, 1941, 1946, 1948, 1950, 1955).

Одобрив принцип системы механических анализов почвы, как и принцип дробной пептизации почв при анализе, мы в то же время обязаны выделить те методы механического и микроагрегатного анализов почвы, которые следует рекомендовать как массовые в производственной работе. При этом исключительно важно достигнуть единства методов в работе как почвоведов, так и исследователей сопредельных наук. Это позволит обобщать материалы по анализу почв и грунтов во всесоюзном масштабе, что необходимо не только для почвоведения, но и для грунтоведения, геологии, географии, военного дела и др. Не правы те специалисты, которые доказывают необходимость своего метода анализа для каждой специальности и чуть ли ни для каждой почвенной зоны. О какой бы специальности ни шла речь — почва и грунт остаются одними и теми же. Нужен не разный метод их анализа, а соответствующая интерпретация данных механического анализа в целях агрономических, дорожного или аэродромного строительства и т. д. Конечно, диапазон анализируемых частиц может и должен быть разным. Например, для почвоведов не имеют существенного значения различия в крупности гальки или щебня, встречающихся в почве, поэтому он может ограничиться выделением их во фракцию крупнее 3 мм с последующим визуальным описанием этого материала. Иные требования у дорожника, строителя. Для них крупность каменистого материала и как части фундаментов сооружений, и как материала для составления оптимальных механических смесей или цемента-грунта, бетона имеют большое значение. Следовательно, им необходим дифференцированный анализ каменистой части почвы, что и предусмотрено классификациями В. В. Охотина (1933), Б. М. Гуменского (1949) и др. Однако подробные классификации каменистого материала не должны ограничивать классификацию мелкозернистой части почв по механическому составу. Эта (последняя) классификация должна быть единой для всех специальностей. Как первое приближение к истине, предлагаем метод механического анализа почвы и классификацию Н. А. Качинского. Их нужно (и это будет сделано в других работах) уточнить, улучшить. При этом надо идти не по пути преумножения методов и классификаций, а по пути их унификации и уточнения.

Основные замечания к варианту пипет-метода механического анализа почвы по Н. А. Качинскому. Подробно метод механического и микроагрегатного анализов описаны в книге Н. А. Качинского «Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения» (1958). Здесь мы изложим лишь несколько принципиальных положений.

Навеска почвы для анализа, взятая по методу средней пробы, варьирует от 10 до 30 г. Чем легче по механическому составу почва, тем большую нужно брать навеску. Это необходимо для точного учета илистой фракции в легких почвах. Практически рекомендуем: для глин и тяжелых суглинков навеску в 10 г; для средних суглинков — 15 г; для суглинков легких — 20 г; для супесей — 25 г и для песков — 30 г. При анализе в литровых цилиндрах это будет соответствовать плотности дисперсии 1, 1,5, 2, 2,5 и 3%. В этом интервале плотности дисперсии, как показали исследования Е. И. Кочериной (1952) и В. Е. Корневской (1952), наблюдается свободное падение механических элементов в воде.

В случае замены литровых цилиндров полулитровыми (что теоретически допустимо) величина навески почвы должна быть уменьшена вдвое.

Подготовка почвы к анализу производится путем отмывки карбонатов и других легкорастворимых соединений 0,05 н. HCl с последующим насыщением поглощающего комплекса почвы ионом натрия, причем 1 н. NaOH вводится в дисперсию почвы по емкости ее поглощения. Таким образом, в методе Качинского механическому анализу подвергаются лишь устойчивые, постоянные по своему составу механические элементы почвы, представленные силикатами, алюмо- и ферросиликатами, полуторными окислами железа и алюминия, органическими кислотами и др. «Потеря» почвы при обработке ее 0,05 н. HCl учитывается как сборная фракция и включается в 100% механического состава почвы. В таблице механического состава она помещается перед песком (см. табл. 17). При классификации почв по механическому составу в почвах, ненасыщенных основаниями, «потеря» приплюсовывается к фракции ила и таким образом попадает в «физическую» глину, а в почвах, насыщенных основаниями, она приплюсовывается к «физическому» песку.

Скорости падения механических элементов почвы в воде рассчитываются по формуле Стокса (см. выше) со строгим учетом удельного веса твердой фазы почвы (σ) и вязкости воды при данной температуре дисперсии (η).

Ниже приводятся плотность и вязкость воды по Ландольту-Бернштейну (Landolt-Börnstein, 1923) для диапазона температур, при которых практически наиболее часто приходится работать в лабораториях, и типичные величины удельных весов твердой фазы различных почв (табл. 16 см. стр. 114).

Пипетка Качинского — Федулова для отбора средней пробы дисперсии существенно отличается от ранее описанных приборов, предназначенных для этой же цели (рис. 24). Форма корпуса пипетки (А) овальная, что обеспечивает более совершенное омывание ее после сливания дисперсии в стаканчик. Нижний ствол короткий — 25 см. Это сообщает пипетке большую прочность. Для забора дисперсии приспособлен двухходовой кран (З), позволяющий сое-

Удельный вес твердой фазы различных почв *

Глубина, см	Легкие кварцевые почвы всех типов	Суглинистые и глинистые						солонцы
		подзолистые и серые лес- ные	черноземы обыкновен- ные и тучные	черноземы южные	каштановые почвы	бурые почвы и сероземы Кавказа	красноземы первичные, несмытые	
0—20	2,60—2,65	2,60	2,40	2,55	2,60	2,65	2,60	Величины брать по типу той почвы, в зоне которой они залегают
20—40	2,65	2,65	2,50	2,60	2,65	2,70	2,65	
40—100	2,65	2,70	2,65	2,65	2,70	2,70	2,75	
> 100	2,65	2,70	2,70	2,70	2,75	2,75	2,80	

* Мы сознательно воздерживаемся в схематической таблице от приведения удельных весов твердой фазы по генетическим горизонтам почвы, так как это сильно осложнило бы таблицу, не повысив значительно ее точности, поскольку удельный вес зависит не только от характера горизонта почвы, но и от химического и минералогического его состава.

Темпера- тура, °С	Плотность воды, г/см ³	Вязкость воды, см-1. г. сек-1
10,0	0,999727	0,01301
12,5	0,999466	0,01219
15,0	0,999126	0,01138
17,5	0,998713	0,01072
20,0	0,998230	0,01006
22,5	0,997682	0,009504
25,0	0,997071	0,008948
27,5	0,996400	0,008473
30,0	0,995673	0,007998

динять пипетку с аспиратором (I) или с воздухом. К пипетке приспособлена промывалка (С), соединяющаяся с пипеткой с помощью крана (У). В верхний ствол пипетки под краном У впаян капилляр-стопор, защищающий пипетку от стекания в нее избытка промывной воды после закрытия крана У.

Для измерения объема забираемой в пипетку дисперсии на верхнем стволе ее нанесено несколько делений, позволяющих сделать отсчет до 0,05 см³. Это избавляет аналитика от необходимости подгонять объем забираемой дисперсии всегда до одного и того же деления (до одной и той же величины). Пипетка и колба для промывания смонтированы на массивном штативе D. С помощью шайбы (N) и кольца (K) пипетку автоматически можно погружать в цилиндр с почвенной дисперсией на одну и ту же заданную глубину.

На основе большого опыта были установлены следующие глубины для отбора механических фракций почвы:

для частиц	< 0,050 мм	25 см
для частиц	< 0,010 мм	10 см
для частиц	< 0,005 мм	10 см
для частиц	< 0,001 мм	7 см

Глубины могут быть произвольными, но они должны удовлетворять двум требованиям: 1) до забора фракции в пипетку жидкость в цилиндре должна придти в состояние покоя, иначе будет нарушена прямолинейность падения механических элементов; 2) вместе с тем путь (h , см), который должны пройти фракции, падающие с определенной скоростью (v , мм/сек), не должен быть больше необходимого минимума, обеспечивающего успокоение жидкости в ци-

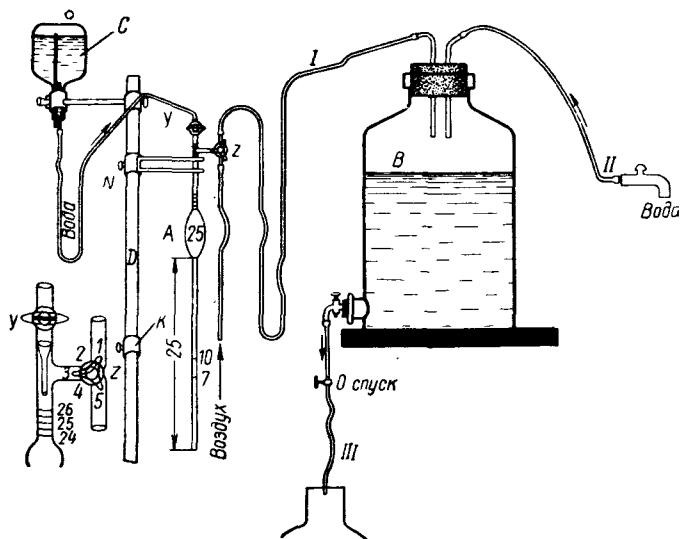


Рис. 24. Схема установки для определения механического состава почвы методом пипетки (Качинского — Федулова)

линдре, иначе время (t , сек) для отбора заданных фракций будет излишне растягиваться, а значит, будет возрастать и время, необходимое для выполнения анализа.

Расчет содержания механических фракций в процентах ведется по формуле

$$X = \frac{a \cdot 1000 \cdot 100}{bc} \%, \quad (22)$$

где X — содержание искомой фракции в процентах меньше какого-то нужного нам размера (например, $< 0,05$ мм; $< 0,01$ мм и т. д.);

a — вес фракции меньше искомого размера в граммах, найденный в анализе;

b — объем пипетки в см³;

c — вес абсолютно сухой навески, взятой для анализа.

Веса фракций определенного размера (0,25—0,05 мм; 0,05—0,01 мм; 0,01—0,005 мм; 0,005—0,001 мм) находятся добавочным расчетом, смысл которого станет ясен из приводимого ниже примера.

Пример 1. Абсолютно сухая навеска почвы — 9,4106 г.

2. Вес фракции размером 1—0,25 мм — 0,0226 г.

3. Потеря при обработке почвы HCl — 0,2832 г.

4. Вес фракций в 25 см³ дисперсии:

Размер фракций, мм	Вес фракций, г
<0,05	0,2121
<0,01	0,1461
<0,005	0,1210
<0,001	0,0770

5. Фракций в процентах веса абсолютно сухой почвы:

Размер фракций, мм	Фракция, %
1—0,25	$\frac{226 \cdot 100}{94106} = 0,24$
<0,05	$\frac{2121 \cdot 1000 \cdot 100}{94106 \cdot 25} = 90,15$
<0,01	$\frac{1461 \cdot 1000 \cdot 100}{94106 \cdot 25} = 62,10$
<0,005	$\frac{1210 \cdot 1000 \cdot 100}{94106 \cdot 25} = 51,48$
<0,001	$\frac{770 \cdot 1000 \cdot 100}{94106 \cdot 25} = 32,73$

6. Отсюда дробных фракций в процентах веса абсолютно сухой почвы:

Размер фракций, мм	Фракция, %
1—0,25	0,24
0,05—0,01	28,05
0,01—0,005	10,67
0,005—0,001	18,70
<0,001	32,73
<0,001 (с поправкой на 4 см ³ 1 н. NaOH)	32,73 — 1,60 = 31,13 *

7. Потеря от обработки почвы HCl: $\frac{2832 \cdot 100}{94106} = 3,01\%$.

8. Фракции размером 0,25—0,05 мм в процентах веса абсолютно сухой почвы: $100 - (0,24 + 28,05 + 10,67 + 18,70 + 31,13 + + 3,01) = 8,20\%$.

Тот же расчет можно произвести иначе: сперва вычислить все фракции (0,05—0,01 мм и др.) в граммах и затем в процентах к сухой навеске.

* Учитывая, что большинство почв в основном насыщено ионом Са, мы не вводим поправки на изменение веса анализируемой почвы в результате насыщения ее ионом Na. Значимость такой поправки заметно возрастает при анализе почв, насыщенных в основном ионом водорода.

Величина 4 см³ 1 н. NaOH взята условно для емкости поглощения почвы в 40 мг-экв. Как разъясилось во II главе, эта величина может быть и больше, и меньше, в зависимости от емкости поглощения почвы.

Для целей агрономической оценки почв надо знать не только крупность механических элементов почвы, но наличие и характер в почве микроагрегатов, образующихся из первичных механических элементов, причем важно установить прочность этих микроагрегатов — способность их противостоять размывающему действию воды. Характеристика суглинистых и глинистых почв с этой стороны дает важные предпосылки для оценки почвенной структуры, а также для суждения о динамике физических свойств почвы, особенно ее водопроницаемости.

Как указывалось в главе II, существует несколько вариантов микроагрегатного анализа почвы. Одним из наиболее известных вариантов является «международный» метод В. Данный метод не удовлетворяет нас в том смысле, что в нем рекомендуется как диспергатор аммиак. Кроме того, многократное механическое растирание почвы приближает его по этому признаку к обычным механическим анализам.

Рекомендуемый нами вариант микроагрегатного анализа почвы состоит в следующем.

10—30 г почвы (тем больше, чем почва легче по механическому составу), пропущенной при сухом просеивании сквозь сито в 1 мм, помещается в бутылку емкостью 500 см³. В бутылку вливают 250 см³ дистиллированной воды и почву оставляют размокать на 24 часа. После этого закупоренные резиновыми пробками бутылки помещают на мешалку с горизонтальными толчками и встряхивают в течение 2 часов с интенсивностью 200 толчков в минуту (100 оборотных ударов). Содержимое бутылки через сито с диаметром отверстий в 0,25 мм переносят в литровый цилиндр (как при механическом анализе), доливают до 1000 см³ и пипетируют, как было описано выше. Расчет фракций в процентах веса сухой почвы проводится так же, как при механическом анализе.

На рисунке 25 дается общий вид мешалки с горизонтальными толчками конструкции автора. На ней одновременно подвергаются взбалтыванию 16 проб. Преимущество этой мешалки — бесшумность ее работы при резких толчках в жидкости. При работе слышен лишь шум мотора да всплеск воды, которые также могут быть ослаблены помещением мешалки под стеклянный футляр. При мешалке имеется электрический регулятор скоростей, позволяющий проводить взбалтывание при односторонних ударах от 50 до 300 в минуту. При 200 ударах стандартная по микроагрегатному составу взвесь почвы, как установлено исследованиями А. Ф. Макаровой (1939), достигается через 2 часа.

Нужно отметить, что микроагрегатный анализ с дистиллированной водой применим не ко всем почвам. Работой А. Ф. Макаровой (1939) выявлено, что дистиллированная вода в этом анализе применима лишь к незасоленным почвам. Такие почвы, как чернозем

и подзолистая, будучи проанализированными с дистиллированной водой и с водной вытяжкой из анализируемой почвы (в обоих случаях), показали практически одни и те же результаты. Иначе ведут себя в анализе почвы засоленные: сильносолонцеватые, солонцы и солончаки. Микроагрегатный состав их, определенный с дистиллированной водой, всегда показывает значительно больший выход пыли и ила, нежели анализ с водной вытяжкой из той же почвы. Поэтому указанные почвы (при микроагрегатном анализе) необходимо анализировать с употреблением водной вытяжки. К аналогичным выводам ранее пришел Бурдель (Bourdelle. J., 1932).

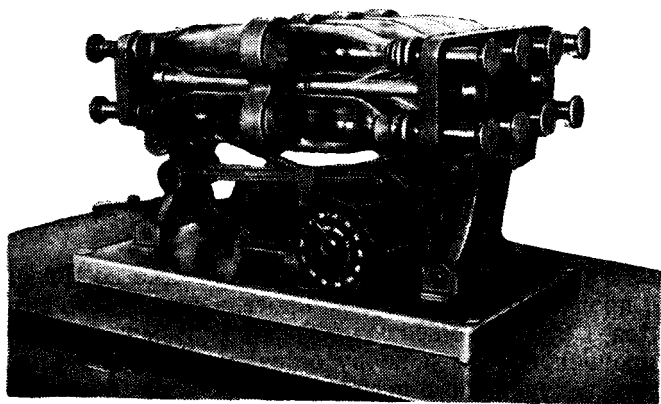


Рис. 25. Прибор для встряхивания почвенной дисперсии (конструкции Н. А. Качинского)

Водная вытяжка должна получаться из анализируемой почвы при отношении почвы к воде, равном 1 : 25. Для получения 1 л вытяжки требуется 40 г почвы. Вытяжка получается в тех же условиях, в каких ведется микроагрегатный анализ. В бутылки, емкостью несколько больше 1 л, 40 г почвы, пропущенной через сито в 1 мм, и 1 л воды выдерживаются 24 часа. Затем содержимое встряхивается вручную 5 мин; вытяжка отфильтровывается и употребляется для анализа. При анализе (см. выше) сперва используется 250 см³ вытяжки (для размачивания и встряхивания навески), а затем и остальная ее часть, которая доливается в литровый цилиндр после перенесения туда анализируемой дисперсии из колбы для встряхивания. Несколько кубических сантиметров жидкости, недостающих в цилиндре до литра, восполняются дистиллированной водой.

Здесь же следует отметить, что подмена водной вытяжки солевыми растворами, например Ca(NO₃)₂, как предлагают Демолон и Генин (Demolon A., Nenin S., 1936), недопустима. В этих случаях при всех почвах проявляется сильная коагуляция суспензии.

и иловатая фракция почвы, обнаруживаемая в анализах с водой и почвенной вытяжкой, совсем исчезает. Так что аналогии действия раствора $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ с почвенной вытяжкой, на которую рассчитывали Демолон и Генин, в данном случае не получается.

При учете результатов микроагрегатного анализа почвы нужно иметь в виду дефект, который имеется у этого анализа: принятие скоростей падения для микроагрегатов (по Стоксу) тех же, что и для механических элементов почвы, хотя очевидно, что скорости падения микроагрегатов будут меньше.

С. В. Астапов, проводивший по этому вопросу специальные исследования (1947), предложил в формуле Стокса при микроагрегатном анализе пользоваться коэффициентом не 0,22, а 0,13. Однако это предложение, частично исправляя имеющуюся ошибку, создает новую: коэффициент 0,13 рассчитан на основе учета падения в воде микроагрегатов, но ведь при анализе вместе с микроагрегатами падают и первичные механические элементы, для скоростей падения которых приложим коэффициент 0,22. Учитывая это, мы и при микроагрегатном анализе применяем формулу Стокса в неизменном виде, хотя и сознаем наличие при этом ошибки. В соответствии с отмеченным дефектом почва в результатах микроагрегатного анализа должна быть несколько переутяжелена.

КОЭФФИЦИЕНТЫ ДИСПЕРСНОСТИ И СТРУКТУРНОСТИ ПОЧВЫ

На основе данных механического и микроагрегатного анализов можно вычислить показатели дисперсности и структурности почвы, характеризующие потенциальную способность ее к оструктурированию.

Подход к решению этого вопроса таков. При микроагрегатном анализе выход мелких фракций, особенно ила (частиц $< 0,001$ мм), всегда будет меньше, чем при механическом анализе. Однако разница в величинах выхода ила в обоих случаях для разных почв сильно колеблется и будет тем меньше, чем легче почва распыляется в воде без каких-либо добавочных химических воздействий (например, в солонцах). Следовательно, по соотношению ила, полученного в обоих анализах, можно судить о прочности микроагрегатов (а значит, и структуры) почвы. Исходя из этих положений, в 1932 г. Качинским было предложено вычислять фактор дисперсности почвы, или степень ее распыляемости в воде, под которыми понимается процентное отношение ила (частиц $< 0,001$ мм) «микроагрегатного» к илу «механическому»:

$$K = \frac{100 \cdot a}{b} \% \quad (23)$$

Пр и м е р 1. Почва содержит иловатых частиц при микроагрегатном анализе (а) 5%;

2. при механическом анализе (b) — 25%;

$$3. \text{ Фактор дисперсности } (K) = \frac{a \cdot 100}{b} = \frac{5 \cdot 100}{25} = 20\%.$$

Чем выше «фактор дисперсности», тем менее прочна микроструктура, а значит, и структура почвы. Укажем, например, что «фактор дисперсности» мощных, тучных и обыкновенных глинистых и суглинистых черноземов не выходит за пределы 10%, в дерново-подзолистых и каштановых почвах он обычно колеблется в пределах 10—20%, тогда как в столбчатом горизонте злостных солонцов может подниматься до 60—80%. В настоящее время эта характеристика широко используется в почвенных работах *.

Обратной величиной «фактору дисперсности» является «фактор структурности», характеризующий устойчивость агрегатов против распыления в воде, предложенный Фагелером (Vageler P., 1932). Он вычисляется по соотношению выхода глины из почвы при двух анализах: а) при механическом анализе с диспергированием почвы Li_2CO_3 и растворимым стеклом и б) при микроагрегатном анализе с дистиллированной водой, лишенной CO_2 . Оба анализа проводятся в кетгеновском промывном цилиндре.

Формула для вычисления такова:

$$\text{фактор структурности} = \frac{100 \cdot (\text{глина I} - \text{глина II})}{\text{глина I}}, \quad (24)$$

где глина I — выход глины при механическом анализе;

глина II — выход глины при микроагрегатном анализе.

Аналогичные вычисления «фактора структурности» рекомендует и Леммерман (Lemmerman O., 1934), но механический анализ почвы он проводит с применением $\text{Li}_2(\text{COO})_2$.

Структурный коэффициент рекомендуется и в работе академика А. Н. Соколовского (1936).

Фактор структурности растет вместе с водопрочностью микроагрегатов и характеризует потенциальную способность почвы к оструктуриванию. Количественно, как нетрудно видеть из формулы, он равен 100% без «фактора дисперсности» Качинского, т. е. если «коэффициент дисперсности» равен, скажем, 10%, то фактор структурности будет равен $100\% - 10\% = 90\%$. Таким образом, найдя одну из этих величин, легко получить и вторую.

В приведенных формулах для вычисления коэффициентов используется содержание в почве ила или глины при различных анализах. Иначе вычисляют «степень агрегатности» Бэвер и Роадес (Baver L. D. a. Rhoades H. F., 1932). Их формула внешне имеет

* Определение показателя дисперсности почвы предложены также в работах Middleton'a (1930), А. С. Вознесенского (1937) и Voujoucos'a (1937).

такое же выражение, как и формула Фагелера, именно:

$$K = \frac{(a-b) \cdot 100}{a}, \quad (25)$$

но входящие в нее величины здесь другие: K — «степень агрегатности»; a — количество необратимых агрегатов размером $> 0,05$ мм при микроагрегатном анализе, выполняемом по Копецкому (Кареску J., 1914); b — количество механических элементов (при механическом анализе) размером $> 0,05$ мм.

Данная формула логически связана с двумя разобранными выше. Если в формулах Качинского, Фагелера и др. расчет ведется по илу, полученному в результате распыления микроагрегатов, то в формуле Бэвера и Роадеса учитываются микроагрегаты, устоявшие против раздробления в воде. В этой формуле, как и в формулах Фагелера, Леммермана и Соколовского, повышение «степени агрегатности» будет означать улучшение водопрочности микроагрегатов.

Не считая разобранные формулы совершенными, мы все же рекомендуем их к использованию, так как они дают количественную характеристику микроструктуры и позволяют судить о потенциальной способности почвы к образованию водопрочных агрегатов.

Поясним еще раз кратко на примере значимость разобранных характеристик. Пусть имеем две почвы. «Фактор дисперсности» первой 3%, а второй — 60%, тогда фактор структурности первой $100\% - 3\% = 97\%$, второй — $100\% - 60\% = 40\%$.

Это будет означать, что первая почва имеет весьма водопрочные микроагрегаты, а вторая — микроагрегаты, легко распадающиеся в воде.

В отношении микроструктуры мы можем на основании этих коэффициентов утверждать, что первая почва располагает высокими данными для образования структуры и для этой цели нуждается лишь в рациональной агротехнике. Вторая же почва должна содержать в себе щелочные катионы, способствующие ее распылению. Наряду с нормальной агротехникой, такая почва нуждается в специальных мелиорациях по улучшению структуры и свойств вообще.

Иной подход к вычислению «фактора структурности» предлагается в работе А. Ф. Вадюниной (1946), где он вычисляется на основании результатов только механического анализа. Автор обоснованно делит механические элементы почвы на активные (в смысле клеящей их способности) диаметром $< 0,005$ мм и пассивные — диаметром $> 0,005$ мм.

$$\text{Фактор структурности } K = \frac{c}{d} \cdot 100\%, \quad (26)$$

где c — количество механических элементов диаметром $< 0,005$ мм для гумусовых горизонтов и $< 0,001$ мм для подгумусовых горизонтов; d — количество механических элементов диаметром $> 0,005$ мм.

Чем выше процентное отношение первых фракций ко вторым, тем больше возможностей для образования структуры почвы.

Следует подчеркнуть, что все разобранные формулы применимы к почвам тяжелого механического состава, начиная от средних суглинков и тяжелее. В суглинках легких, а тем более в супесях и песках значимость структуры в известной мере утрачивается, так как эти почвы вследствие высокого содержания песчаных фракций обладают благоприятными физическими свойствами (имеются в виду порозность, рыхлость, водопроницаемость, влага завядания) и не будучи оструктуренными.

Метод Вадюниной для вычисления «фактора структурности» имеет преимущество перед другими, так как для вычисления требуются лишь результаты механического анализа почвы, но этот же метод уступает всем остальным в том смысле, что он не применим к почвам засоленного и особенно солонцового ряда, где илистая фракция, в силу насыщенности ее ионом натрия, коагулирует обратно.

Кроме того, в формуле Вадюниной, как нам кажется, за активный ил во всех случаях должны быть приняты фракции одного и того же размера. Основываясь на свойствах фракции (см. табл. 4), рекомендуем к активному илу относить фракции $< 0,001$ мм.

Учитывая цели агротехники, рекомендуем парные определения механического и микроагрегатного состава производить для пахотного и подпахотного слоев или для двух верхних горизонтов целинных почв. Это позволяет дополнительно охарактеризовать водопрочность микро- и макроструктуры почвы, а также потенциальную способность ее к оструктурированию.

В таблицах наряду с «фактором дисперсности» почвы по Качинскому целесообразно приводить «фактор структурности» по Вадюниной: вычисленные на основе разных принципов эти характеристики взаимно дополняют одна другую, причем рост «фактора дисперсности» почвы логически должен сопровождаться падением «фактора структурности».

В заключение разбора вопросов о механическом и микроагрегатном анализе почвы приведем таблицу 17 как образец записей для окончательных результатов анализа.

Из этой таблицы, помимо механического состава почв, на основе «фактора дисперсности» и «фактора структурности» выявляется различная потенциальная способность их к оструктурированию.

КЛАССИФИКАЦИЯ ПОЧВ ПО МЕХАНИЧЕСКОМУ СОСТАВУ

О принципах построения классификации

Конечной целью изучения механического состава почв является выработка классификации почв по механическому составу с учетом

Механический и микроагрегатный состав почвы в процентах на сухую навеску

(анализировала А. Ф. Макарова)

Почва	Горизонт, глубины, см	Анализ	Потеря от обработки 0,05 н. НСl	Диаметр фракций, мм			Диаметр фракций, мм						Фактор дисперсности по Качинскому * $\frac{100 \cdot a}{b} \%$	Фактор структурности по Вадюниной ** $\frac{c}{d} \cdot 100\%$
				> 1	1—0,25	0,25—0,05	0,05—0,01	0,01—0,005	0,005—0,001	<0,001	<0,01	>0,05		
Чернозем обыкновенный тяжелосуглинистый иловато-пылеватый. Заволжье	A ₁ , 0—8	Механический Микроагрегатный	4,49	—	—	1,9	34,6	10,5	15,7	32,8	59,0	1,9	7,6	52,3
			Нет	—	—	35,50	45,3	9,1	7,6	2,5	19,2	35,5	—	—
Дерново-подзолистая легкоглинистая иловато-пылеватая. Свердловская область	A ₁ , 0—10	Механический Микроагрегатный	0,11	—	1,3	8,7	39,2	18,6	21,2	10,9	50,7	10,0	14,7	12,2
			Нет	—	2,2	30,4	43,0	11,7	11,1	1,6	24,4	32,6	—	—

* a — количество ила (фракция < 0,001 мм) при микроагрегатном анализе; b — количество ила (фракция < 0,001 мм) при механическом анализе.

** c — сумма фракций < 0,005 мм при механическом анализе; d — сумма фракций > 0,005 мм при механическом анализе.

всех их свойств. Прежде чем перейти к разбору этого вопроса, остановимся на принципах, положенных в основу классификаций.

В ряде предложенных до сих пор классификаций (Аттерберг, Земятченский, Охотин и некоторые другие) делается допущение, что почва в целом в той или иной мере повторяет сумму свойств входящих в нее механических фракций. Правда, Земятченский и Охотин рядом экспериментов показывают, что сложение различных механических элементов не дает простого сложения их свойств.

При оценке физических свойств различных механических элементов почвы упускается из виду или недооценивается их минералогический состав и химические свойства, которые, однако, в сильнейшей степени влияют на физические свойства механических элементов почвы в целом.

Сопоставляя свойства почвы со свойствами механических ее элементов, авторы классификаций недоучитывают значимость структуры почвы или грунта, а между тем в настоящее время можно признать бесспорным, что при одном и том же механическом составе, но при различном структурном состоянии почва будет обладать резко различными физическими и другими свойствами.

Приведем несколько иллюстраций к пояснению высказанных положений. Так, по Аттербергу, Кочериной, Личмановой, Воронину, коллоидный ил обладает наихудшей водопроницаемостью, наивысшей капиллярностью и предельно медленным передвижением воды по капиллярам. Но мы знаем, что тот же ил при надлежащем качественном его составе (обогащенность гумусом типа гуминового комплекса, насыщенность кальцием или железом) является действенным фактором структурообразования, и, следовательно, наличие его должно обусловить наилучшие водные свойства почвы.

Прямая связь между свойствами механических элементов и свойствами почвы в целом отмечается лишь для почв легкого механического состава (пески, супеси) и для тяжелых полностью обесструктуренных почв и грунтов. В тяжелых структурных почвах она наблюдается лишь для свойств, обуславливающих величину поверхности почвы, как-то: гигроскопичность, максимальная гигроскопичность, теплота смачивания, емкость поглощения. Но и здесь нужно помнить, что поверхностная энергия почвы, наряду со степенью дисперсности, в сильнейшей мере зависит от химической природы механических элементов, что наглядно демонстрируется приведенными ниже данными:

1) о количестве H_2O , сорбируемой различными минералами, в мг на 1 г вещества (по данным Андерсона, 1922):

Минералы	Частицы	
	1—50 мк	<1 мк
Мусковит	50,9	358,1
Ортоклаз	0,0	167,3
Кварц	0,0	8,7

2) о теплоте смачивания различных минералов, размолотых на коллоидной мельнице, в малых калориях на 1 г вещества (по данным В. Н. Димо, 1946):

Бентонит	14,080
Мусковит	2,663
Микроклин	0,155
Кварц	0,0

Различие сорбционной способности одинаковых по величине и форме, но разных по химическому составу механических элементов почвы обусловит даже при одинаковой их укладке различный эффективный диаметр пор, а следовательно, различную их водо- и воздухопроницаемость, водоподъемную способность и пр.

Значение химического состава механических элементов для свойств почвы демонстрируем еще графиком (рис. 26). Взяты чернозем и солонец одинакового механического состава, однако липкость и твердость этих почв совершенно различны: липкость солонца в два-три раза, а сопротивление расклиниванию — в десятки раз больше, чем у чернозема.

Отсутствие аддитивности свойств механических элементов и почвы в целом можно продемонстрировать на многих примерах.

В таблице 18 приведены механический состав и водопроницаемость различных почв. Данные таблицы наглядно показывают, что совершенно бесперспективно искать какую-либо постоянную корреляцию для такого свойства, как, скажем, водопроницаемость почвенного ила или физической глины, взятых порознь, и тем же свойством для почвы в целом. То же самое нужно сказать о скважности, влагоемкости, водоподъемной способности и некоторых других свойствах. Данные таблицы 18 говорят об обратной зависимости: содержание физической глины и ила в приведенных почвах растет от дерново-подзолистой почвы к краснозему, однако водопроницаемость почв в том же направлении не только не уменьшается, а резко возрастает, что связано с хорошей оструктуренностью приазовского чернозема и особенно краснозема *.

Длительный опыт параллельного изучения механического состава и физических свойств многих почв приводит к заключению, что наиболее неблагоприятные (в агрономическом смысле) физические свойства почвы обуславливают фракции размером от 0,01 до 0,005 мм. Эти фракции в расчлененном состоянии не обладают положительными физическими свойствами песка и в то же время они являются «пассивной» частью при образовании почвенной структуры. Почвы, имеющие в преобладании эту фракцию (особенно почвы, не насыщенные основаниями) обычно сильно припады, малоструктурны, плохо водо- и воздухопроницаемы. При

* Связь физико-механических свойств почвы с их структурой отмечается во многих работах, из которых особого внимания заслуживают работы М. Х. Пигулевского (1936).

Механический состав и водопроницаемость различных почв

Почва	Горизонт, глубина, см	Механический состав, % абсолютно сухой почвы								Водопроницаемость, в первый час впиталось воды, мм
		потери при обработке почвы 0,05 и. НСІ	размер фракций, мм							
			> 1	1—0,25	0,25—0,05	0,05—0,01	0,01—0,005	0,005—0,001	< 0,001	
Дерново-подзолистая суглинистая крупнопылеватая. Стерня ржи. Собакино—опытное Московской обл.	Ац, 0—10	1,36	0,9	12,0	9,8	41,2	11,7	13,7	9,3	54,5
Чернозем приазовский карбонатный глинистый крупнопылевато-иловатый. Стерня озимой пшеницы. Ст. Верблюд Ростовской обл.	Ац, 0—8	7,29	0,0	0,04	0,0	28,6	9,9	18,6	35,6	709,8
Краснозем глинистый пылевато-иловатый. Чайная плантация. Анасеули *, Грузия	Ац, 0—10	—	0,0	3,8	2,5	11,5	10,1	31,4	40,7	900,0

* Данные анализа краснозема заимствованы из работы М. К. Дараселия (1939).

пахоте они оказывают высокое тяговое сопротивление. При классификации почв по механическому составу в агрономических

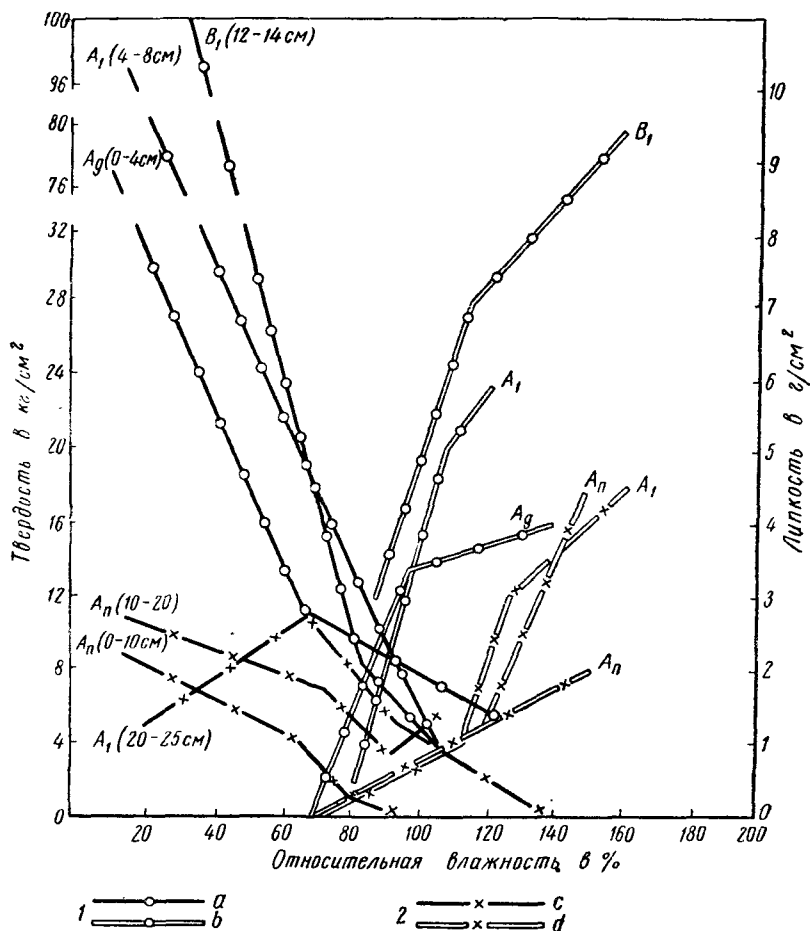


Рис. 26. Динамика твердости и липкости почв:

- 1 — солонец ореховато-глибистый легкоглинистый крупнопылевато-иловатый; целина, Куваево, Свердловской обл.; а — твердость; б — липкость;
2 — чернозем слабосолонцеватый легкоглинистый крупнопылевато-иловатый; пшеница яровая по клеверу, Куваево; с — твердость, d — липкость

целях фракции средней пыли (0,01—0,005 мм) должно уделяться значительное внимание.

Из сказанного выше о зависимости свойств механических элементов, помимо их размеров, от минералогического состава и химической природы и свойств почв — от этих факторов и степени их структурности вытекает необходимость разработки нескольких классификаций почв по ме-

ханическому составу хотя бы для таких резко отличных рядов почв, как почвы таежной зоны, зональные почвы степей и пустынь, почвы солонцового типа.

Классификация Н. М. Сибирцева. Наиболее распространенной классификацией почв по механическому составу (в агрономических целях) в дореволюционной России была двучленная классификация Сибирцева, приспособленная к данным механического анализа почвы по методу Шене. Классификация строится на соотношении в почве «физической глины» и «физического песка». В данные термины в разное время Сибирцев вкладывал разное понятие. Так, в 1899 г. он пишет: «Пользуясь механическим анализом, можно считать за физическую глину те частичные элементы почвы, диаметр которых не выше 0,001 мм (ил)».

В 1901 г. он дает другое определение: «В составе почвенного мелкозема различают обыкновенно «пыль» (Staub), т. е. частицы 0,05—0,01 мм диаметром, и ил (Schlamm), который часто называют «глиной» (частицы <0,01 мм в диаметре)... Этот последний термин употребляется как термин физический, т. е. им обозначаются составные части почвы, имеющие физические свойства глины: способность впитывать влагу, давать в сыром состоянии вязкую массу, сыпаться и прочее».

П. С. Коссович (1903), ссылаясь на Сибирцева, указывает третью границу между «физическим» песком и «физической» глиной: к «физической» глине он относит частицы <0,005 мм.

В дальнейшем в практике почвоведения утвердилось понятие о «физической глине» как о частицах <0,01 мм. Учитывая в почве содержание этих частиц, Сибирцев предложил следующую, широко известную шкалу для классификации почв по механическому составу (1901). Текст классификации дается по Сибирцеву, без всяких изменений.

Почвы	Соотношение «физической» глины и «физического» песка
Глинистые	От 1 : 1 до 1 : 1/2
Тяжелые суглинистые	От 1 : 2 до 1 : 3
Средние суглинистые	Около 1 : 4
Легкие суглинистые	От 1 : 5 до 1 : 6
Супесчаные	От 1 : 7 до 1 : 10
Глинистые пески	Содержание глины в 15— 30 и даже 50 раз ме- нее содержания песка

Следует отметить, что приведенная классификация Сибирцева не устанавливает точных границ для выделения почв различного механического состава. Так, для глин указывается соотношение глины и песка от 1 : 1 до 1 : 1/2; для тяжелого суглинка — соответственно от 1 : 2 до 1 : 3 и т. д. Неясно, к какой категории будут относиться почвы в интервалах отношений от 1 : 1 до 1 : 2, а также при отношении, большем чем 1 : 1/2. Последующая практика отнесла

сти почвы к глинистым и ввела подобные же уточнения в отношении всех остальных градаций.

Классификация Сибирцева прочно вошла в почвенные работы и удерживалась в некоторых областях Советского Союза, особенно на Украине, до тридцатых годов.

Классификация А. Н. Сабанина, В. В. Геммерлинга и И. П. Жалдинского. А. Н. Сабанин, предложив свой сифонный метод механического анализа почвы, вынужден был несколько отойти от классификации Сибирцева и совместно с В. В. Геммерлингом и И. П. Жалдинским * предложил свою классификацию почв по механическому составу. В этой (неопубликованной) классификации были повышены нормы содержания «физической» глины для отнесения почв в категорию суглинков и глин до пределов, близких к тем, какие мы предлагаем для почв, не насыщенных основаниями. В частности, к глинам относились почвы с содержанием «физической» глины свыше 50%. Вызвано это было новой (более интенсивной) подготовкой почв к механическому анализу. Кроме того, в классификации учитывалось, что вследствие всасывающей силы сифона в него попадают суспензии с глубин ниже заданного в анализе уровня. Поэтому результаты анализов по методу Сабанина дают некоторое переутяжеление почв (засасывание во фракцию «физической» глины некоторой доли «физического» песка).

Если шкала Сибирцева нашла широкое применение при использовании результатов анализа по Шене и Копецкому, то шкала Сабанина широко использовалась при анализе по его методу и, в частности, применялась в работах В. В. Геммерлинга по обследованию почв бывших Пензенской и Уфимской губерний и в работах С. А. Захарова, М. М. Филатова по изучению почв бывшей Московской губернии.

Классификация Г. М. Тумина и С. А. Захарова. Стремясь детализировать шкалы Сибирцева и Сабанина, Г. М. Тумин и С. А. Захаров предложили заменить их трехчленной шкалой. Тумин рекомендовал учитывать соотношение фракций: <0,01 мм (физическая глина); от 0,01 до 0,1 мм (песчаная пыль) и от 0,1 до 3 мм (песок). Механический состав почвы выражается отношением — глина: песчаная пыль: песок, в котором глина принимается за единицу.

С. А. Захаров предложил классифицировать почвы по механическому составу на основе соотношения фракций: <0,01 мм (физическая глина); от 0,01 до 0,05 (пыль) и 0,05—3 мм (песок), причем в названии почвы по механическому составу на первое место ставится наименьшая по содержанию фракция, на второе — средняя по содержанию и на последнее — фракция, процентное содержание которой в почве наиболее высокое.

Обе названные трехчленные шкалы дают более развернутую качественную характеристику почвы; однако в словесном опре-

* Сообщено нам проф. В. В. Геммерлингом.

делении механического состава почв по этим шкалам отсутствуют точные количественные характеристики. Например, по трехчленной шкале проф. Захарова в названии почвы «пылевато-песчано-глинистая» мы будем знать, что больше всего в ней глины, а меньше всего пыли, но строго количественные характеристики здесь отсутствуют. Чтобы их узнать, нужно познакомиться с результатами анализов, но в этом случае трехчленная характеристика почвы становится излишней, так как результаты анализа дадут более подробную характеристику. При двухчленных формулах Сибирцева и Сабанина в каждом определении почвы по механическому составу заключена определенная количественная характеристика почвы в отношении двух важнейших групп механических элементов.

Существенным недостатком всех четырех названных классификаций является отсутствие в них наиболее «активной» части почвы — ила (частиц с диаметром $< 0,001$ мм).

Классификация В. В. Охотина. В последние десятилетия, когда в аналитической почвенной практике методы анализа почв Шене и Сабанина были заменены пипеточным методом, с учетом средней и мелкой пыли, а также ила, а почва к анализу стала подготавливаться химическими способами, появилась необходимость в замене классификаций Сибирцева и Сабанина иной, в которой бы учитывались особенности новых методов работы и результаты анализов по этим методам.

Для изучения грунтов и оценки их в строительных целях известны классификации первой Всесоюзной конференции по научно-исследовательским вопросам дорожного строительства (1931), В. В. Охотина (1933) и др. Классификация Охотина строится на соотношении механических элементов в грунте: $< 0,005$; $0,005—0,25$ и $0,25—2$ мм (табл. 19). Она нашла положительную оценку в дорожном почвоведении. Иногда проявляется тенденция использовать ее и в агрономических целях. Однако ставить знак равенства при оценке грунта как строительного материала и при оценке почвы как средства труда в сельскохозяйственном производстве нельзя. Земятченский и Охотин, оценивая грунтовые смеси, приплюсовывают в классификационной шкале среднюю пыль ($0,01—0,005$ мм) к песку. По указанным выше соображениям в агрономических целях этого сделать нельзя, как нельзя согласиться с автором, когда он эту фракцию называет «лёссовидной». Высокое содержание в почве средней пыли сообщает ей ряд свойств тяжелых почв, как связность в сухом состоянии, припадливость и вязкость в сыром, низкую водопроницаемость и др. Это отрицательное влияние усугубляется бесструктурностью или пониженной структурностью почв с высоким содержанием средней пыли. Аналогичные наблюдения делал еще Сибирцев. Позже для фракций $0,02—0,002$ мм то же отмечал Аттерберг, поэтому прав был Сибирцев, когда при классификации почв в агрономических целях он среднюю и мелкую пыль приплюсовывал к «физической» глине.

Классификация грунтов по гранулометрическому составу В. В. Охотина

Номенклатура грунта	Процент частиц		
	<0,005 мм (глины, по Охотину)	0,005—0,25 мм (пыли, по Охотину)	0,25—2 мм (песка, по Охотину)
Тяжелая глина Глина Пылевая глина	> 60 60—30 > 30	— — Больше, чем каждой из двух других фракций грунта	— — —
Тяжелый суглинок Пылеватый тяжелый суглинок	30—20 30—20	— Больше, чем песчаных	Больше, чем пылевых —
Средний суглинок Пылеватый средний суглинок	20—15 20—15	— Больше, чем песчаных	Больше, чем пылевых —
Легкий суглинок Пылеватый легкий суглинок	15—10 15—10	— Больше, чем песчаных	Больше, чем пылевых —
Тяжелая супесь Пылеватая тяжелая супесь	10—6 10—6	— Больше, чем песчаных	Больше, чем пылевых —
Легкая супесь Пылеватая легкая супесь	6—3 6—3	— Больше, чем песчаных	Больше, чем пылевых —
Песок Пылеватый песок	< 3 < 3	— Больше, чем песчаных	Больше, чем пылевых —

Классификация Н. А. Качинского. Возникла необходимость новой классификации в агрономических целях. Доводы к изменению классификационных шкал Сибирцева и Сабанина следующие:

1. При химическом методе подготовки почвы к механическому анализу выход «физической» глины в целом и в том числе ила (частиц $< 0,001$ мм) будет значительно выше, чем при прежнем методе подготовки (кипячение почвенной навески с водой и растирание ее).

2. Использование для определения скоростей падения механических элементов в воде формулы Стокса обуславливает получение почвенных характеристик, резко отличных от ранее получавшихся по формуле Шене (см. табл. 9).

Применительно к описанному методу механического анализа в 1938 г. автором была предложена новая классификация почв по механическому составу. В 1943 и 1958 гг. эта классификация уточнена.

В основу подразделения почв на пески, супеси, суглинки и глины в 1938 г. было взято соотношение частиц больше или меньше 0,01 мм, выделяемых при кислотно-щелочной подготовке образцов пипетметодом, применительно к скоростям падения механических элементов в воде, определяемым по формуле Стокса.

Для решения вопроса об оставлении или изменении этой границы в настоящее время нами сделана сводка имеющихся в литературе материалов о свойствах механических элементов почвы (Аттерберга, Вильямса, Мазуренко, Расселя и Галля, Дикого, Беляковой, Роде, Морозова, Мельникова, Розанова, Ткачука и др.). Кроме того, дополнительно были проведены всесторонние исследования свойств механических элементов дерново-подзолистой суглинистой почвы (Е. И. Кочерина, 1954), серой лесной земли (А. И. Личманова, 1962), основных почвенных типов светлокаштанового почвенного комплекса (А. Д. Воронин, 1959), типичного серозема (Яо Сянь-Лян, 1960). Часть данных из работ этих исследователей приведена в таблицах 3, 4, 5 и на рисунках 1, 2, 3.

Из приведенных материалов следует, что свойства механических элементов, изменяясь при уменьшении диаметра механических элементов, претерпевают особенно резкие изменения на границах 0,01; 0,005 и 0,001 мм.

Первую из этих границ (0,01 мм) и оставляем как границу между «физическим песком» (частицы с диаметром $> 0,01$ мм) и «физической глиной» (частицы с диаметром $< 0,01$ мм).

На основании соотношения содержания частиц в почве этих крупностей предлагаем (применительно к данным анализа по методу Качинского) основную шкалу классификации почв по механическому составу (табл. 20 и рис. 27).

Шкала составлена для трех объединений почв: а) — подзолистого типа почвообразования; б) — степного типа почвообразования, красноземов и желтоземов и в) — для солонцов и сильно

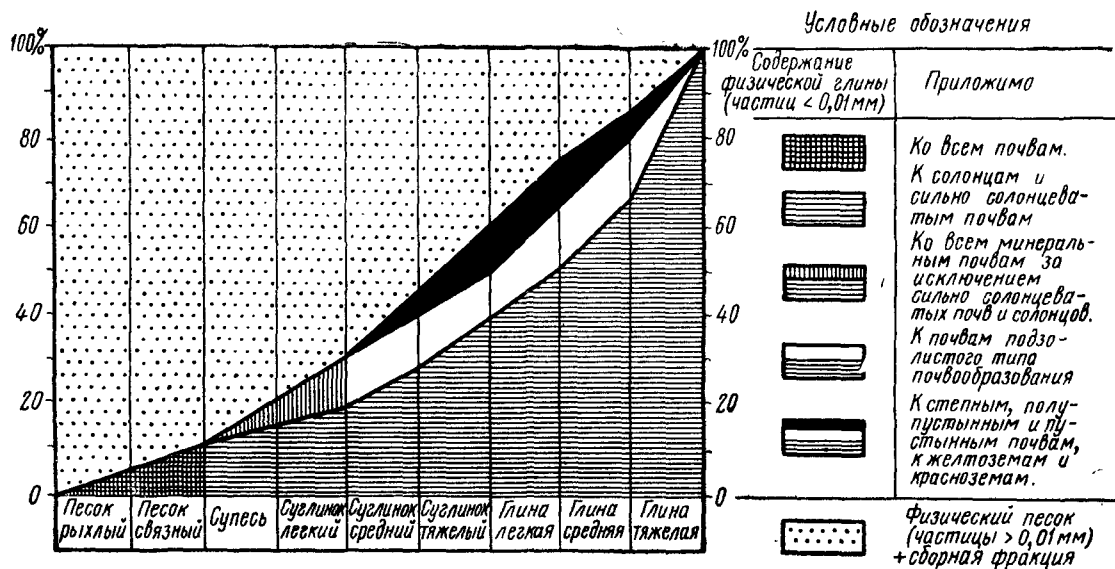


Рис. 27. Классы почв по механическому составу в зависимости от содержания в них физической глины в процентах веса сухой почвы

солонцеватых почв. Чем выше потенциальная способность почв к структурообразованию и чем рыхлее их сложение, тем больше они должны содержать физической глины по сравнению с другими почвами, чтобы быть отнесенными к тому или иному классу по механическому составу. Поэтому степные зональные почвы, красноземы и желтоземы, как более структурные, в разделах классификации для суглинков и глин содержат больше физической глины, нежели почвы подзолистого типа, а подзолистые почвы — больше, нежели почвы солонцового ряда.

Таблица 20

Классификация почв по механическому составу (разработана Н. А. Качинским)

Часть 1. Основная шкала

Содержание физической глины (частиц < 0,01 мм), %			Содержание физического песка (частиц > 0,01 мм), %			Краткое название почвы по механиче- скому составу
Почвы						
подзоли- стого типа почвооб- разования	степного типа поч- вообразо- вания, краснозе- мы и жел- тоземы	солонцы и сильно солонце- ватые почвы	подзоли- стого типа поч- вообразо- вания	степного типа поч- вообразо- вания, краснозе- мы и жел- тоземы	солонцы и сильно солонце- ватые почвы	
0—5 5—10 10—20 20—30 30—40 40—50 50—65 65—80 > 80	0—5 5—10 10—20 20—30 30—45 45—60 60—75 75—85 > 85	0—5 5—10 10—15 15—20 20—30 30—40 40—50 50—65 > 65	100—95 95—90 90—80 80—70 70—60 60—50 50—35 35—20 < 20	100—95 95—90 90—80 80—70 70—55 55—40 40—25 25—15 < 15	100—95 95—90 90—85 85—80 80—70 70—60 60—50 50—35 < 35	Песок рыхлый Песок связный Супесь Суглинок легкий Суглинок средний Суглинок тяжелый Глина легкая Глина средняя Глина тяжелая

Примечание. В результатах анализа для почв, не насыщенных основаниями, потеря при обработке почвы от 0,05 и. HCl приплюсовывается к «физической глине»; для почв, насыщенных основаниями, она приплюсовывается к «физическому песку».

Если в почве есть гравий (1—3 мм), он включается в 100%, причисляясь к песку. Вторая цифра в графах всюду дана «включительно».

Как правило, солонцы ранее проявляют свойства тяжелой почвы при меньшем содержании глинистых частиц, нежели рядом залегающая несолонцеватая почва. Особенно сильно это сказывается в отношении таких свойств, как водопроницаемость, липкость и вязкость в сыром состоянии, твердость и трещиноватость — в сухом (см. рис. 25, 26). В соответствии с этим оптимальная влажность для обработки солонцов всегда ниже, а удельное сопротивление их при пахоте всегда выше, чем у несолонцеватых почв того же почвенного комплекса.

Поэтому в предлагаемой классификации кривая содержания «физической глины» различных по механическому составу солонцов

лежит ниже аналогичных кривых для почв степного и подзолистого типов почвообразования (см. рис. 27). Различие в классификации по механическому составу между солонцами и почвами степного типа почвообразования начинается с супесей, тогда как для почв подзолистого типа почвообразования оно выявляется лишь в суглинках средних. Единая кривая для всех почв наблюдается в песках, где слабо сказывается влияние глинистой фракции.

В предлагаемой классификации «потери» почв при обработке их 0,05 н. НСІ включены в 100% навески. В почвах, не насыщенных основаниями, она складывается в основном из подвижных форм железа и алюминия, частично SiO_2 , поэтому ее нужно включить в илстую фракцию ($<0,001$ мм). В почвах, насыщенных основаниями, карбонатных и засоленных, при практической невозможности разнести «потерю» по отдельным фракциям, ее следует вводить в 100% навески под рубрикой «сборная фракция», а при классификации почв приплюсовывать к «физическому песку», так как наличие карбонатов и растворимых солей не усиливает, а снижает «глинистость» почв.

Проценты содержания песка и глины в почве округлены до пяти- и десятков в целях облегчения запоминания шкалы.

В целях оттенения в механическом составе соотношения фракций гравия, песка, пыли и ила в классификационную таблицу введено понятие «преобладающих» фракций. Выделяют фракции: гравелистая (1—3 мм); песчаная (0,05—1,0 мм); крупнопылеватая (0,05—0,01 мм); пылеватая (0,01—0,001 мм) и иловатая ($<0,001$ мм).

В дальнейшем мы предлагаем две категории классификационных шкал, отображающих с различной детальностью механический состав почвы.

В подробной классификации (табл. 21) учитывается соотношение всех вышеназванных фракций механических элементов. Пусть черноземная почва содержит: «физической глины» — 80%, ила — 45%, пыли (средней и мелкой) — 25%, пыли крупной — 20%, песка — 10%. В этой почве первой преобладающей фракцией будет ил, на втором месте по количеству будет пыль; на третьем месте — пыль крупная и песок. Эту почву по механическому составу мы назовем глина средняя, пылевато-иловатая. Второй пример: пусть подзолистая почва названа по механическому составу суглинком тяжелым, иловато-крупнопылеватым. Это означает, что физической глины (частиц $<0,01$ мм) в почве — 40—50%; преобладающая фракция — крупная пыль; на втором месте по величине — ил, на третьем — все остальные фракции.

Данная подробная шкала может быть рекомендована: а) при картировании опытных участков и участков Госсорсети; б) при крупномасштабных исследованиях в почвенно-мелиоративных целях, при обследовании территорий под специальные куль-

Классификация почв по механическому составу

Часть II

Номенклатура почв по механическому составу на основе соотношения механических элементов $>0,01$ и $<0,01$ мм, а также с учетом содержания преобладающих фракций

Классы почв по механическому составу	Разновидности почв по механическому составу
Глины тяжелые	Пылевато-иловатые (п.-и.) Иловато-пылеватые (и.-п.)
Глины средние и легкие	Пылевато-иловатые (п.-и.) Иловато-пылеватые (и.-п.) Крупнопылевато-иловатые (к.-п.-и.) Иловато-крупнопылеватые (и.-к.-п.)
Глина легкая	Пылеватая (п.) Крупнопылеватая (кр.-п.) Иловато-песчаная (и.-песч.)
Суглинки тяжелые и средние	Пылевато-иловатые (п.-и.) Иловато-пылеватые (и.-п.) Крупнопылевато-иловатые (к.-п.-и.) Иловато-крупнопылеватые (и.-к.-п.) Пылеватые (п.) Крупнопылеватые (к.-п.) Песчано-иловатые (песч.-и.) Песчано-пылеватые (песч.-п.) Иловато-песчаные (и.-песч.) Пылевато-песчаные (п.-песч.)
Суглинки легкие	Крупнопылеватые (к.-п.) Иловато-песчаные (и.-песч.) Пылевато-песчаные (п.-песч.) Песчаные (песч.) Гравелисто-песчаные (гр.-песч.)
Супеси	Крупнопылеватые (к.-п.) Иловато-песчаные (и.-песч.) Пылевато-песчаные (п.-песч.) Песчаные (песч.) Гравелисто-песчаные (гр.-песч.)

Классы почв по механическому составу	Разновидности почв по механическому составу
Пески связные	Мелкозернистые (м.-з.) Мелкозернистые крупнопылеватые (м.-з.-к.-п.) Мелкозернистые иловато-песчаные (м.-з.-и.-песч.) Среднезернистые (с.-з.) Среднезернистые-гравелистые (с.-з.-гр.)
Пески рыхлые	Мелкозернистые (м.-з.) Среднезернистые (с.-з.) Крупнозернистые (к.-з.) Мелкозернистые гравелистые (м.-з.-гр.) Среднезернистые гравелистые (с.-з.-гр.) Крупнозернистые гравелистые (к.-з.-гр.)

Примечания. Глина легкая, суглинки тяжелые и средние «пылеватые» второй преобладающей фракцией имеют крупную пыль (0,05—0,01 мм).

Глина легкая, суглинки тяжелые и средние крупнопылеватые второй преобладающей фракцией имеют пыль (0,01—0,001 мм).

Суглинки легкие и супеси крупнопылеватые второй преобладающей фракцией имеют песок (0,05—0,01 мм).

Суглинки легкие и супеси «песчаные» второй преобладающей фракцией имеют крупную пыль (0,05—0,01 мм).

В песках крупнопылеватых преобладает лёссовидная фракция (0,05—0,01 мм); второй фракцией будет песчаная (0,05—1 мм).

Пески мелкозернистые, среднезернистые и крупнозернистые преобладающей фракцией имеют песок соответствующей крупности; на втором месте — пыль крупная.

Пески мелкозернистые, среднезернистые и крупнозернистые гравелистые преобладающей фракцией имеют песок соответствующей крупности; на втором месте — гравий.

туры (свекла, хлопчатник, чай, цитрусовые, виноградники, садовые культуры), при всех почвенных съемках, начиная с масштаба 1 : 25 000 и крупнее.

В краткой шкале используются основные номенклатурные подразделения почв по механическому составу, приведенные в таблице 20, с тем, однако, отличием, что «глины легкие» и «глины средние» объединяются в категорию «глин» с оставлением подразделения «глин тяжелых». Глины могут быть пылеватые и иловатые. Все категории суглинков подразделяются на пылеватые суглинки и опесчаненные в зависимости от преобладания фракций песка (1—0,05 мм) или крупной пыли (0,05—0,01 мм). Преобладание остальных фракций в терминологии не оттеняется. Супеси делятся на пылеватые, песчаные и гравелистые; пески — на крупнозернистые, среднезернистые и мелкозернистые в зависимости от преобладания той или иной фракции. Каждая из этих категорий песков может быть песком гравелистым.

Шкала применяется при ориентировочном определении механического состава почвы в поле (упрощенными приборами и методами) и при составлении мелкомасштабных карт.

При использовании любой из двух названных шкал классификация почв по механическому составу для почв каменистых должна сопровождаться указаниями на степень их каменистости. Ниже приводится классификация почв по каменистости:

Частицы > 3 мм, %	Степень каменистости	Тип каменистости
< 0,5	Почва некаменистая	Устанавливается по характеру скелетной части.
0,5—5,0	Слабокаменистая	
5—10	Среднекаменистая	
> 10	Сильнокаменистая	Почвы могут быть валунные, галечниковые, щебенчатые.

При характеристике каменистости почв учитывается:

а) почва некаменистая — каменистого материала < 0,5%; почва в отношении обработки считается нормальной;

б) почва слабокаменистая — каменистого материала 0,5—5%; при условии что этот материал представлен мелким щебнем или галькой, почва обрабатывается нормально, но при этом будет наблюдаться ускоренный износ рабочих поверхностей орудий обработки, особенно лемехов;

в) почва среднекаменистая — каменистого материала 5—10%; для нормальной обработки почвы необходимо вычесывание крупного каменистого материала; замечание по п. б остается в силе;

г) почва сильнокаменистая — каменистого материала > 10%; для возделывания однолетних культур требуются тяжелые мелиорации по выбору и удалению каменистого материала с поля.

Во всех случаях окатанный каменистый материал при обработке почвы менее вредоносен, нежели щебнистый.

Под многолетние культуры, особенно под садовые и плодовые, где для обработки почвы используются специальные орудия и где сами обработки применяются значительно реже, нежели под однолетние культуры, возможно эффективное использование сильно каменистых почв с содержанием каменистого материала (если он не представлен крупными глыбами) до 70% и более.

Многочисленные примеры эффективного использования таких каменистых почв под сады и виноградники можно наблюдать в горных районах Средней Азии, на Кавказе, Балканах, Швейцарии и в других местах *.

* В 1956 г. во Франции, на древней террасе реки Роны севернее города Авинона, мы познакомились с отлично развитым виноградником, выращенным

Каменистость отмечается в почвенной карте по фону механического состава.

Опыт классификации почв по предлагаемым шкалам и сопоставление полученных классификационных названий с характеристиками почв, даваемыми опытным почвоведом в поле, показывают высокое соответствие характеристик, получаемых в обоих случаях (по этому вопросу учтены анализы для нескольких тысяч образцов).

Зарубежные классификации почв по механическому составу. В зарубежном почвоведении классификации почв по механическому составу менее дифференцированы, нежели в СССР. В западноевропейских странах они в большинстве случаев составлены с использованием классификаций механических элементов почвы по Аттербергу. В последние годы в странах народной демократии широко применяется и наша классификация.

Для примера приведем классификации: чехословацкую (1923—1948, табл. 22), швейцарскую (табл. 23) и немецкую (табл. 24).

Т а б л и ц а 22

Классификации почв по механическому составу В. Новака
(Чехословакия, 1923—1948 гг. Главная шкала)

Содержание фракции < 0,01 мм, %		Название почв по механическому составу
Классификация 1923 г.	Классификация 1938—1948 гг.	
> 70	> 75	Глина тяжелая
50—70	60—75	Глина легкая
30—50	45—60	Суглинок тяжелый
	30—45	Суглинок средний
20—30	20—30	Песчаный суглинок
10—20	10—20	Суглинистый песок
0—10	0—10	Песок

П р и м е ч а н и е. Классификация доктора Новака 1923 г. опубликована в 1926 г. *; классификация его 1938—1948 гг. не опубликована и любезно предоставлена нам автором в рукописи.

* Dr. Václav Novák. Úvahy o systémech bonitace půdy. Praha, 1926, 33—34

на крупном аллювиальном галечнике, количество мелкозема в котором составляло лишь 24%. С поверхности галечник кварцитовый, ниже — полевые шпаты, авгиты, роговые обманки. Галечник удобрялся мелкоземом, который, будучи смешанным с минеральными туками, вносился под кусты винограда. Обработка этих почв производилась оборотным плугом, у которого лемех заменен мощным ломом, передвигающимся во втулке. Конец лома расклепан на долотообразный клин. По мере износа конца лома — лемеха — он продвигается по втулке, чем восстанавливается сработавшая часть.

Таблица 23

Классификация почв по механическому составу Вигиера
(Швейцария, 1926)

Фракции, %			Название почвы по механическому составу
2—0,05 мм	0,05—0,01 (0,02) мм	<0,01 (0,02) мм	
< 20	< 20	> 75	Глина тяжелая
< 20	~ 20	75—60	Глина
< 30	~ 20	60—50	Глина легкая
< 30	40—20	50—40	Суглинок тяжелый
< 30	50—30	40—20	Суглинок
< 30	40—20	40—20	Опесчаненный суглинок
< 50	30—10	20—10	Супесь
> 50	20—10	< 10	Песок

Таблица 24

Классификация почв по механическому составу
(ГДР, Государственная комиссия по оценке земель, 1953).

Механические элементы <0,01 мм %	Название почвы по механическому составу	Условное обозначение механического состава
> 60	Глина	T
60—45	Тяжелый суглинок	LT
44—30	Средний суглинок	L
29—24	Опесчаненный суглинок	SL
23—19	Сильно оглиненный песок	LS
18—14	Оглиненный песок	IS
13—10	Слегка оглиненный песок	SI
< 10	Песок	S

Как видно из таблиц 22 и 23, чехословацкая и немецкая классификации очень близко подходят к основной классификационной шкале для почв степного типа почвообразования (см. табл. 20).

Для классификации почв по механическому составу в зарубежных странах иногда пользуются методом треугольника Гиббса — Розебома, который в почвенных работах именуется часто как треугольник Фере (см. Гесснера — Gessner H., 1931; Кирица — Chiriță K. D., 1955, и др.).

ОФОРМЛЕНИЕ ДАННЫХ МЕХАНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПОЧВЫ

Данные механического анализа графически оформляются следующими методами.

Метод дифференциальной кривой. По оси абсцисс откладываются логарифмы эффективных диаметров механических элементов, раз-

меры которых в этом случае удобнее выражать в микронах. По оси ординат откладывается процентное содержание каждой фракции. Этот метод для изображения механического состава индивидуального образца мы считаем наиболее показательным (рис. 28).

Метод кумуляционной (интегральной) кривой. По оси абсцисс, как и в предыдущем случае, откладываются логарифмы эффективных диаметров механических элементов. По оси ординат откладываются (следуя от крупных фракций к мелким) процентное содержание самой крупной фракции, а далее — суммы процентного содержания каждой фракции плюс процентное содержание всех предшествующих фракций. Конечная сумма самой мелкой фракции плюс все предыдущие фракции составит 100% (см. рис. 28).

Метод циклограммы. Механический состав образца откладывается по кругу, площадь которого и длина окружности принимаются за 100%. Процентное содержание фракций, следуя от крупных к мелким или наоборот, откладывается по окружности. Каждый отрезок дуги соединяется с центром круга. Секторы, соответствующие процентному содержанию отдельных фракций, закрашиваются или заштриховываются условными значками (см. рис. 19).

Метод треугольника Гиббса — Розебома предложен для изображения тройных смесей американским ученым Дж. Гиббсом в 1876 г. и голландским химиком Б. Розебомом в 1894 г.

Используется равносторонний треугольник, который обладает тем свойством, что сумма перпендикуляров, опущенных на его стороны, из любой точки D , взятой внутри его, равна высоте этого треугольника ($h_1 + h_2 + h_3 = H$) (рис. 29, I). Если высоту равностороннего треугольника принять за единицу или за 100%, то высоты каждого из трех перпендикуляров можно выразить в долях единицы или в процентах, при этом наблюдается равенство: $h_1 : h_2 : h_3 = \triangle ADC : \triangle ABD : \triangle BCD$, так как основания этих треугольников равны между собой.

Для изображения методом треугольника механического состава почвы 100% ее фракций нужно разбить на три группы: песок (0,05—1 мм), пыль (0,001—0,05 мм) и ил (<0,001 мм). Процентное содержание любых двух фракций нужно выразить в виде перпендикуляров к двум сторонам треугольника (к каждой стороне — один перпендикуляр) в долях от высоты треугольника H (рис. 29, II). Через вершины этих двух перпендикуляров проводятся прямые линии, параллельные сторонам треугольника, к которым восстановлены перпендикуляры. Пересечение двух этих линий даст точку D , которая характеризует механический состав почвы. Если эту точку соединить с вершинами равностороннего треугольника, то он будет разделен на три треугольника, высоты которых (и площади) будут пропорциональны процентному содержанию в почве фракций: песчаной, пылевой и илистой.

Если равносторонний треугольник разбить прямыми линиями, параллельными его сторонам, на сеть ромбов и треугольников,

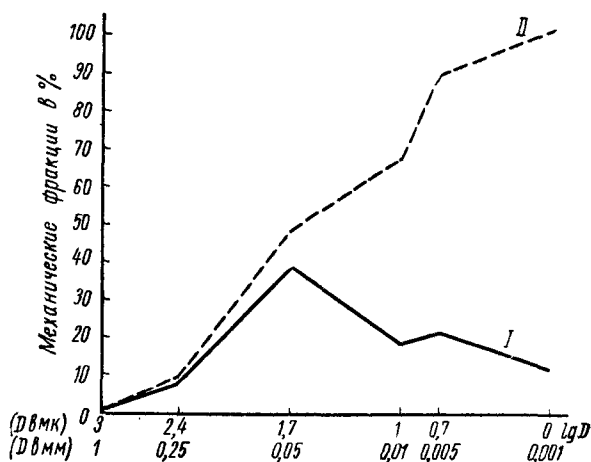


Рис. 28. Методы изображения результатов механического анализа почвы:

I — дифференциальная кривая; II — кумуляционная кривая; дерново-подзолистая легкосуглинистая иловато-пылеватая почва, Свердловская область

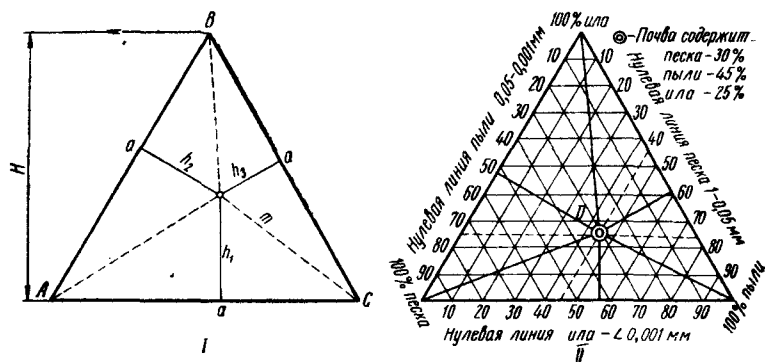


Рис. 29. Изображение механического состава почвы методом треугольника Гиббса — Розебома

О точности механического анализа почвы

Учитывая классификационные подразделения почв по механическому составу, считаем достаточным выражать данные механического анализа в целых процентах *. Для гарантии правильности целых процентов можно рекомендовать в таблицах приводить и десятки доли процента.

В целях согласования данных различных исследований — почвенных, геологических, географических и др. — необходимо в массовых анализах принять единый метод механического анализа почвы и единую классификацию почв по механическому составу.

БОНИТИРОВКА ПОЧВ ПО МЕХАНИЧЕСКОМУ СОСТАВУ

При бонитировке почв принимаются во внимание все ее свойства: химические, физико-химические, физические, физико-механические и биологические. Большое значение при этом имеет и их механический состав, так как он в значительной мере предопределяет химические и особенно физические и физико-механические свойства почвы, а косвенно и все остальные свойства. Общеизвестно, что тяжелые по механическому составу почвы от природы всегда более богаты питательными для растений веществами, нежели почвы легкие, но вместе с тем, если они бесструктурны, физические свойства их носят отрицательный характер: они плохо водо- и воздухопроницаемы, отличаются высоким сопротивлением при обработке и пр. Чаше лучшим комплексом свойств обладают почвы среднего механического состава — суглинки средние и тяжелые.

Кроме того, следует учитывать, что в разных климатических и почвенных зонах роль механического состава преломляется по-разному. Например, в черноземной зоне, где основная угроза растениям проистекает от засухи, тяжелый механический состав способствует плодородию почв, так как глинистые почвы более влагоемки и могут накопить в себе больший запас воды. Хорошая комковато-зернистая структура их обеспечивает и хорошую водопроницаемость. Наоборот, в заболоченных районах, например, в подзоне подзолисто-глеевых почв культурные растения страдают от избытка воды и недостатка воздуха. Здесь положительные свойства приобретают более легкие по механическому составу почвы — супеси, легкие суглинки, а иногда и пески.

Сопоставив многочисленные данные опытных станций и экспедиций о различных их свойствах и механическом составе с урожаями сельскохозяйственных культур на тех же почвах по зонам, можно предложить как первый опыт бонитировочную шкалу почв по механическому составу для различных почвенных зон. Шкала

* Исключение для песков, в которых учитывается ил.

Примерная бонитировка различных почв по механическому составу с учетом запаса в них питательных веществ, водного, воздушного и теплового режимов степени и трудности их окультуривания для хлебных злаков

(оценка дается в пределах каждой почвенной зоны европейской части СССР и Закавказья по десятибалльной системе)

Зона	Подзона	Почвы по механическому составу и оценка их по десятибалльной системе						
		глини- стые	тяжелосу- глинистые	среднесу- глинистые	легкосу- глинистые	супесча- ные	песчаные мелкозер- нистые связные	песчаные крупно- зернистые рыхлые
Подзолистая	Подзолисто-глеевые почвы Собственно-подзолистые почвы Дерново-подзолистые почвы	4	6	8	10	8	5	3
		5	6	8	10	7	5	3
		6	7	10	8	6	4	2
Серая лесная	Для всех подзон	8	10	9	7	6	4	2
Черноземная	Черноземы тучные, мощные и обыкновенные	10	9	8	6	4	3	1
Черноземная	Черноземы южные (маломощные) и провинции черноземов приазовских и предкавказских	9	10	8	7	5	3	1
Каштановая	Темиокаштановые почвы Каштановые и светлокаштановые почвы	8	10	9	7	6	3	1
		7	9	10	8	6	3	1
Бурая	Для всех подзон	7	8	10	7	5	2	1
Сероземы	Для всех подзон	8	10	9	7	5	3	2
Красноземы, желтоземы и желтоземно- подзолистые почвы	Красноземы и желтоземы Желтоземно-подзолистые почвы	10	9	7	6	4	—	—
		8	9	10	9	6	4	2

составлена по десятибалльной системе: лучшие по механическому составу почвы для данной почвенной зоны оцениваются баллом 10; самые худшие почвы для тех же условий оцениваются баллом 1.

ЛИТЕРАТУРА

К введению

Антипов-Каратаев И. Н. Учение о почве как полидисперсной системе и его развитие в СССР за 25 лет (1917—1942). «Почвоведение», № 6, 1943.

Антипов-Каратаев И. Н. Учение о почве как полидисперсной системе и его развитие в СССР за 25 лет (1917—1942). «Почвоведение», № 7, 1943.

Сабанин А. Н. Краткий курс почвоведения. М., 1909, стр. 2.

К главе I

Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, т. XXIV, стр. 35, 1931.

Афонин М. И. Слово о пользе, знании, собирании и расположении черноземе, особливо в хлебопашестве. М., 1771, стр. 14, 16.

Высоцкий Г. Н. Гидрологические и геобиологические наблюдения в Велико-Анадолу. «Почвоведение», № 3, 1899, стр. 165—182; «Почвоведение», № 1, 1900, стр. 22—39.

Докучаев В. В. О почвенных зонах вообще и вертикальных зонах в особенности. В кн.: «К учению о зонах природы». СПб., 1899, стр. 18.

Докучаев В. В. Лекции о почвоведении. Полтава. Экономическое бюро Полтавского Губернского земства, 1901, стр. 45.

Девн Гумфри. Основания земледельческой химии. Изд. Имп. ВЭК общ. СПб., 1832.

Домострой Сильвестровского извода. СПб., 1902, стр. 44, 45.

Изманильский А. А. Как высохла наша степь. Полтава, 1893 г.

Изманильский А. А. Влажность почвы и грунтовая вода. Полтава, 1894 г.

Качинский Н. А. Физика почвы в работах VII Международного конгресса почвоведов. Вестн. Моск. ун-та, № 3, 1961, стр. 41—72.

Качинский Н. А. Идеи М. В. Ломоносова в науке о почве. Вестн. Моск. ун-та, № 5, 1961, стр. 26—33.

Ключевский В. Курс русской истории. Ч. II, 2-е изд. Гос. изд-во М.-Л., 1923, стр. 275.

Коссович П. С. Краткий курс общего почвоведения. 2-е пересмотренное издание, СПб., 1916, стр. 220—242.

Костычев П. А. Почвоведение. М.-Л., 1946.

Костычев П. А. О борьбе с засухами в черноземной области посредством обработки полей и накопления на них снега. СПб., Изд. А. Ф. Девриена, 1893, стр. 1—80; 2-е изд.—1889, 3-е — 1905 г., 4-е — 1907 г., 5-е — 1911 г., 6-е — 1912 г.

Лебедев А. Ф. Передвижение воды в почвах и грунтах. Симферополь, 1917; 1926 г.—Бюллетени почвоведов, № 2—4.

Линковский Я. А. Критический разбор мнений ученых об условиях плодородия земли, с применением общего вывода к земледелию. СПб., 1846, стр. 25, 84, 94, 104, 109, 113, 114.

Ломоносов М. В. Первые основания металлургии или рудных дел, Прибавление второе. О слоях земных. Полное собрание сочинений. Т. V. Тр. по минералогии, металлургии и горному делу. 1741—1763 гг. М.-Л., Изд. АН СССР, 1954.

Оттоцкий П. В. Грунтовые воды, их происхождение, жизнь и распределение. СПб., 1905.

Павлов М. Г. Курс сельского хозяйства. Т. II. М., 1837, стр. 192.
Павлов М. Г. Русский земледелец. Кн. I. 1838, стр. 11—23.
Павлов М. Г. Курс сельского хозяйства. Т. I (Предисловие). М., 1837, стр. 11.

Павлов М. Г. Речь о побудительных причинах совершенствовать сельское хозяйство в России преимущественно перед другими отраслями народной промышленности и о местах, существенно к тому относящихся, произнесенная в торжественном собрании Императорского Московского Университета июля 4 дня 1823 года. Изд. Моск. Импер. Унйверситета. Университетская типография.

Писцовые книги Московского государства. Под редакцией Н. В. Калачева. Ч. I, Изд. Императорского русского географ. общ-ва, СПб., 1877.

Русский биографический словарь. Т. «Павел — Петр», СПб., 1902.

Сибирцев Н. М. Почвоведение. В. III, отд. IV. СПб., 1901, стр. 30.

Davy H. Elemente der Agrikulturchemie. Deutsch. Berlin, 1814.

Schumacher W. Die Physic des Bodens in ihren theoretish. u. praktisch. Beziehungen Zur Landwirtschaft. Berlin, 1864.

Schübler G. Grundsätze der Agrikulturchemie. Leipzig, 1830, В II.

Schübler G. Grundsätze der Agrikulturchemie. Leipzig, 1838.

Thaer A. Grundsätze der rationellen Landwirtschaft. Neue Ausgabe. Berlin, 1880.

Wollny E. Forschungen aus dem Gebiete der Agrikulturphysik. Heidelberg, (1878—1898).

К главе II

Антипов-Каратаев И. Н. Почва как полидисперсная система и методы определения дисперсности твердой фазы почвы (преимущественно высокодисперсных ее фракций). Сб.: «Современные методы исследования физико-механических свойств почв», т. IV, вып. 1, 1945.

Астапов С. В. Мелиоративное почвоведение (Практикум). М., 1958, стр. 5—42.

Вадюнина А. Ф. Физический режим подзолистой почвы в зависимости от способов обработки ее. Уч. зап. МГУ, Почвоведение, 1946, вып. 101.

Вадюнина А. Ф. и Корчагина З. А. Методы определения физических свойств почвы грунтов (в поле и лаборатории). М., 1961, стр. 9—61.

Воронин А. Д. Некоторые свойства фракций механических элементов комплекса почв светлокаштановой подзоны. Вест. Моск. ун-та, № 4, 1958, стр. 93—102.

Гедройц К. К. Ультрамеханический состав почвы и зависимость его от рода катиона, находящегося в почве в поглощенном состоянии; известкование как мера улучшения ультрамеханического состава почвы. СПб., «Опытная агрономия», т. XXII, 1921—1923.

Глушков В. Г. Осаждение породы из взвешенного состояния и новые способы подробного механического анализа. «Отчет гидрометрической части ОЗУ в Туркестанском крае за 1911 г.», т. 1, 1812, стр. 413—416.

Горбунов Н. И. Задачи изучения глинистых и сопутствующих им высокодисперсных минералов почвы. Изд. АН СССР, «Проблемы почвоведения», № 1, 1962.

Качинский Н. А. Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения. М., Изд. АН СССР, 1958.

Кочерина Е. И. Некоторые химические и физические свойства отдельных механических фракций дерново-подзолистой почвы. «Почвоведение», № 12, 1954.

Личманова А. И. Некоторые свойства механических фракций светло-серой лесной почвы. «Почвоведение», № 6, 1962, стр. 58—69.

Охотин В. В. Гранулометрическая классификация грунтов на основе их физических и механических свойств. Изд. НИИ Автогужевых дорог и дорожных сооружений, 1933.

- Сабанин А. Н. Механический анализ почв с малыми навесками. М., «Вестн. сельского хозяйства», т. VII, 1907.
- Сергеев Е. М. Общее грунтоведение. Изд. МГУ, 1952, стр. 184—187.
- Сибирцев Н. М. Почвоведение. Ч. II и III. Варшава, 1899, стр. 105.
- Сибирцев Н. М. Почвоведение. В. III, отд. IV. СПб., 1901, стр. 30.
- Соколовский А. Н. К познанию почвенных коллоидов. «Опытная агрономия», 1921—1923, т. XXII.
- Тюлин А. Ф., Коровкина А. В. Различное качество почвенных водопорочных агрегатов в зависимости от грунтового состава вторичных частиц менее 0,01 мм. «Почвоведение», № 3, 1950.
- Яо Сянь-Лян. Сравнительное изучение илистой фракции типичного серозема при различных способах подготовки почв к механическому анализу. «Почвоведение», № 9, 1960, стр. 94—101.
- Atterberg A. A. Die mechanische Bodenanalyse und Klassifikation der Mineralböden Schwedens. Internat. Mitt. f. Bodenkunde, 1912, Bd. II, H. 4, 312—342.
- Atterberg A. A. Die Plastizität und Bindigkeit liefernden Bestandteile der Tone. Internat. Mitt. f. Bodenkunde, 1913, Bd. III, H. 4, 291.
- Baver L. D. a. Rhoades H. F. Aggregate analysis as an aid in the study of soil structure relationships. Journal Amer. Soc. Agron., 1932, vol. 24, N11, 920—930.
- Baver L. D. Soil physics. Second edition. N.-Y., 1948, 1956.
- Bouyoucos G. J. The hydrometer as a new and rapid method for determining the colloidal content of soils. Soil Sci., 1927, vol. XXIII, N4, p. 319—330.
- Chiriță Const D. Pedologie generală. Bucuresti, 1955, p. 138—144.
- Day Paul R. Report of the Committee on physical analyses. Soil Sci. Soc. America Proc., 1956, vol. 20, N2.
- Gessner H. Die Schlämmanalyse. Leipzig, 1931.
- Копецкий Joseph. Die Bodenuntersuchung zum Zwecke der Drainagearbeiten mit besonderer Berücksichtigung eines kombinierten Schlämmapparates. Prag. 1901. Derselbe; Internat. Mitt. f. Bodenkunde, 1914, Bd. IV, H. 2/3, S. 199.
- Lemmerman O. Methode für die Untersuchung des Bodens, Teil II, Berlin 1934.
- Marshall T. Y. A plummet balance for measuring the size distribution of soil particles. Australian Journ. Appl. Sci., 1956, vol. 7, N2, 142—147.
- Musierowicz A. Glebosnawstwo ogolne, Warszawa, 1956, str. 142—147.
- Novak V. Vorbehandlung der Bodenproben zur mechanischen Bodenanalyse.
- Тр. II Междунар. конгресса почвоведов. I комиссия. Физика почв, М., 1932.
- Ostwald Wo.— Grundriß d. Kolloidchemie. J. Aufl., Dresden, 1909. 3. Aufl., 1911.
- Puri A. N. D. Siph. D. Soils, their physics and chemistry. N.-Y., 1949, p. 246, 249.
- Stokes G. G. Trans. Cambr. Philos. Soc., vol. 8, p. III, NXXII, 287, (1845); vol. 9, p. II, NX, 8 (1850). Math. and Physic. Papers, I, 75; 3, 59, 1880.
- Vageler P. Der Kationen und Wasserhaushalt des Mineralbodens. Berlin, 1932, s. 312.
- Wiegner G. u. Melo M. D. Über eine neue Methode der Schlämmanalyse. Die Landwirtschaftlichen Versuchsstation. 1918, Bd. XCL, H. 1 u 2.

УДЕЛЬНЫЕ И ОБЪЕМНЫЕ ВЕСА ПОЧВЫ

Среди «основных» свойств почвы особое место занимают удельные и объемные ее веса. Следует выделять четыре их категории: а) удельный вес твердой фазы или твердого субстрата почвы; б) удельный вес скелета почвы; в) объемный вес скелета почвы и г) объемный вес собственно почвы.

В такой последовательности мы их и охарактеризуем.

УДЕЛЬНЫЙ ВЕС ТВЕРДОЙ ФАЗЫ ИЛИ ТВЕРДОГО СУБСТРАТА ПОЧВЫ

(*d*) — отношение веса твердой фазы почвы к весу воды в том же объеме при 4° С:

$$d = \frac{P}{P_1}, \quad (27)$$

где *d* — удельный вес твердой фазы почвы;

P — вес твердой фазы почвы в определенном объеме (без скважин);

*P*₁ — вес воды в том же объеме при 4° С. По старой терминологии отношение $\frac{P}{P_1}$ называлось «истинным удельным весом

почвы» (с немецкого — «das spezifisches Gewicht des Bodens»).

Этот термин не отвечает содержанию формулы 27, так как в нее входит вес не всей почвы, а лишь одной из трех ее фаз — именно твердой фазы, что и выражено в современном термине — удельный вес твердой фазы почвы.

Как было показано во II главе, твердая фаза почвы представлена первичными и вторичными минералами, органическими веществами и гуматами. Очевидно, что удельный вес твердой фазы почвы будет зависеть от характера химического и минералогического ее составов. В таблице 26 приводим величины удельных весов различных минералов и органических соединений, входящих в состав материнских пород и почв.

Так как в минеральных почвах чаще преобладают кварц, полевые шпаты, каолинит, удельный вес которых колеблется в пределах

Удельный вес твердой фазы различных компонентов пород и почв

(сводная таблица по данным различных авторов)

Минералы, органические компоненты	Удельный вес	Минералы, органические компоненты	Удельный вес
1. Перегной, различные торфа, лесные подстилки	1,25—1,80	10. Лабрадор	2,64—2,80
2. Гипс	2,30—2,35	11. Доломиты	2,80—2,90
3. Кварц	2,65	12. Мусковиты	2,76—3,00
4. Каолинит	2,60—2,65	13. Биотиты	2,70—3,10
5. Ортоклаз	2,54—2,57	14. Роговые обманки и авгиты	2,90—3,40
6. Микроклин	2,55	15. Турьиты	3,54—3,74
7. Плаггиоклазы	2,67—2,74	16. Лимониты	3,50—3,95
8. Кальцит	2,71	17. Бурый железняк	3,45—4,00
9. Тальк	2,60—2,70	18. Красный железняк (гематит)	5,1—5,2
		19. Гранаты	3,15—4,30

2,54—2,74, то и удельный вес твердой фазы малогумусных почв в поверхностных горизонтах варьирует от 2,5 до 2,65. В глубинных иллювиальных горизонтах, как, например, в иллювиальном горизонте подзолистых почв, а также в красноземах, где возрастает количество железистых соединений, удельный вес, как правило, возрастает, достигая величин 2,70—2,75—2,80. Наоборот, в высокогумусных почвах, например, в обыкновенных и тучных черноземах, в горнолуговых почвах в перегнойно-аккумулятивном их горизонте удельный вес твердой фазы снижается до величин 2,40—2,30.

В таблице 27 приводим величины удельного веса твердой фазы различных почв по их профилю.

На основе приведенных данных можно отметить несколько закономерностей в изменении удельного веса твердой фазы почвы. Как видно из таблицы, во всех почвах наименьший удельный вес отмечается в верхнем гумусовом горизонте, причем он тем меньше, чем больше в почве гумуса. Например, из приведенных в таблице почв наибольшей гумусностью (до 9% в пахотном слое) отличается чернозем обыкновенный, удельный вес твердой фазы его в этом горизонте наименьший — 2,42. По мере движения в глубь почвы, особенно в иллювиальных горизонтах, где скапливаются железистые соединения и другие тяжелые минералы, удельный вес заметно возрастает до величин 2,70—2,75. А в красноземах и желтоземах, где горизонт С особенно обогащен полуторными окислами железа, величина удельного веса закономерно возрастает, достигая 2,80 и 2,85. Все же, по сравнению с другими физическими характеристиками почвы (как это будет показано ниже), удельный вес твердой фазы почв варьирует в узких пределах и в наименьшей степени

Удельный вес твердой фазы различных почв *

Дерново-подзолистая тяжелосуглинистая. Стерня ржи. Мос- ковская область, Собаккино-опытное		Серая лесная глини- стая земля. Стерня ржи. Рязанская область. Старож- лово-опытное		Чернозем обыкновен- ный, сыртовой глини- стый. Стерня пше- ницы. Куйбышевская область. Поселок Воронцовский		Каштановая солонце- вая глинистая почва. Стерня пше- ницы. Ростовская область, Конзавод 162	
горизонты, глубины в см	удель- ный вес	горизонты, глубины, в см	удель- ный вес	горизонты, глубины, см	удель- ный вес	горизонты, глубины, см	удель- ный вес
$A_{п.}$ 0—18	2,60	$A_{п.}$ 0—20	2,60	$A_{п.}$ 0—19	2,42	$A_{п.}$ 0—22	2,58
A_2 18—30	2,68	A_2 20—36	2,66	A_1 19—38	2,52	B_1 22—42	2,65
B_1 30—55	2,70	B_1 36—68	2,69	B_1 38—62	2,60	B_2 42—58	2,65
B_2 55—85	2,72	B_2 68—90	2,71	B_2 62—79	2,69	C_1 58—98	2,72
B_3 85—150	2,70	C_1 90—150	2,70	C_1 79—126	2,71	C_2 98—167	2,75
B_4 150—200	2,70	C_2 150—200	2,70	C_2 126—200	2,74	C_3 167—200	2,70

подвержен динамике во времени. По этому показателю его и относят к основным физическим «константам» почвы, хотя, конечно, и эта величина в процессе выветривания горных пород и почвообразования постепенно меняется.

Не вдаваясь в технические детали** отметим принцип определения удельного веса твердой фазы почвы. Определяется он пикнометрически. Пикнометр—прибор для точного определения объема жидкости и твердых тел. Точность отсчета объема в пикнометре обеспечивается во-

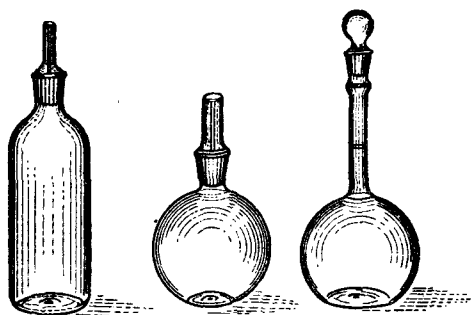


Рис. 31. Пикнометры для определения удельного веса твердой фазы почвы

лосным окончанием его «горла» или волосным капилляром в пробке. На рисунке 31 показаны различные формы наиболее употребительных пикнометров. Более удобным является цилиндрический пикнометр: он устойчив и при массовых определениях большее количе-

* Табличные материалы в данной и других таблицах, приводимые без указаний авторов, взяты из экспедиционных материалов кафедры физики и мелнорации почв биолого-почвенного факультета Московского государственного университета.

** Об этом см. в кн. А. Ф. Вадюниной и З. А. Корчагиной «Методы исследования физических свойств почв и грунтов». М., 1961, стр. 97—105.

ство таких пикнометров можно загрузить в вакуум-эксикатор для откачивания (удаления) из почвы воздуха.

Обычно употребляются пикнометры объемом 50 и 100 см³. Перед определением удельного веса, необходимо проверить объем пикнометра не менее как трижды и в дальнейшем пользоваться средней величиной.

Последовательность определения и вычисления удельного веса твердой фазы почвы такова: вес пикнометра, вес пикнометра с водой при данной температуре, вес воды в пикнометре, объем воды, объем пикнометра, гигроскопическая влажность анализируемой почвы, вес пикнометра + воздушно-сухая почва, вес пикнометра + абсолютно сухая почва, вес абсолютно сухой почвы в пикнометре, вес пикнометра + почвы + долитой воды до полного объема пикнометра, вес и объем долитой воды в пикнометре, объем почвы в пикнометре и, наконец, удельный вес твердой фазы почвы в пикнометре (путем деления веса почвы в пикнометре на объем почвы в пикнометре).

Этот анализ требует большой тщательности. Необходимо полностью удалить из почвы и воды воздух. Эта операция особенно затруднительна, так как корни и другие органические остатки из навески почвы не удаляются, а лишь измельчаются с помощью ножиц.

Необходимо соблюдение постоянства температуры при анализе. Анализ выполняется обязательно с контролем (две-три повторности).

Особых замечаний требует определение удельного веса твердой фазы засоленных почв. Вопрос заключается в несоответствии в данном случае веса почвы, идущей в анализ, и ее объема, если определение проводится с водой. В этом случае в навеску почвы соли входят, но они не учитываются в объеме, так как растворяются в воде. Это приводит к сильному завышению удельного веса твердой фазы засоленных почв. Чтобы избежать этой погрешности, в анализе необходимо использовать инертные неполярные жидкости, не растворяющие соли, как бензин, ксилол, керосин и др. Так как неполярные жидкости не смешиваются с водой, то в анализе нужно использовать абсолютно сухую почву.

Возможные ошибки в работе с водой при анализе засоленных почв иллюстрируем в таблице 28.

Как видно из данных таблицы, различие в величинах удельного веса, определенного с использованием воды и бензина, дости-

Таблица 28

Удельный вес твердой фазы
хлоридосульфатного глинистого
солончака (степь Богаз
в Азербайджане)

Горизонты, глубина в см	Удельный вес при определении	
	почва—вода	почва—бензин
A, 0—10	2,75	2,67
B, 10—20	2,71	2,66
C, 25—35	2,73	2,66
C, 35—45	2,74	2,60

Таблица 29
Удельный вес твердой фазы различных почв в зависимости от примененной в анализе жидкости
(по М. В. Чапеку, 1933)

Почва	Удельный вес твердой фазы					
	вода	керосин	бензин	бензол	ксенол	в среднем для неполярных жидкостей
Кварцевый песок	2,6515	2,6547	2,6513	2,6500	2,6504	2,6516
Подзол суглинистый (Горки, Московская область)	2,6364	2,6100	—	2,6047	—	2,6074
Чернозем обыкновенный глинистый (Каменная степь)	2,5572	2,4532	2,4529	2,4576	2,4585	2,4555
						0
						0,4219
						1,6189

гает 0,05—0,14 — разница весьма высокая, если учесть, что удельный вес твердой фазы почв определяется с точностью до 0,01—0,02.

Следует однако отметить, что при использовании в анализе неполярных жидкостей, мы, устраняя ошибку, проистекающую от растворения солей в воде, вводим в анализ новую, хотя и меньшую, ошибку в связи с различной адсорбцией воды и инертных жидкостей почвою.

Согласно правилу В. Тарасова (1924), жидкости гидрофильными порошками (в том числе почвой) поглощаются прямо пропорционально их диэлектрической постоянной, а гидрофобными порошками — обратно пропорционально той же величине (обращение правила Тарасова, по П. Ребиндеру, Л. Краюшкину, Б. Ильину, 1929).

Диэлектрическая постоянная воды (равная 81) во много раз больше той же характеристики неполярных жидкостей (бензола, бензина, керосина и др.), диэлектрическая постоянная которых колеблется в пределах 2—2,6. Следовательно, эти жидкости будут наиболее слабо адсорбироваться почвой и слабо сжимать ее, хотя в силу низкого их поверхностного натяжения хорошо смачивают поверхность почвы. Следствием этих различий является сжатие системы почва + вода и отсутствие такого сжатия почвы под неполярными жидкостями (табл. 29).

Как видно из таблицы 29, песок противостоит сжатию его адсорбированной водою, а почвы, тяжелые по механическому составу,

ву и особенно богатые гумусом, как чернозем, достигают высокой степени сжатия — свыше $1,6 \text{ см}^3$ на 100 г почвы, что приводит к различию удельных весов твердой фазы почвы до 0,1 и больше. На этом основании Цункер (1930) и некоторые другие исследователи рекомендуют проводить определение удельного веса твердой фазы всех почв под неполярными жидкостями, чтобы избежать процесса сжатия системы — почва + вода. Однако такое решение вопроса было бы неправильным, так как в природе почвы всегда содержат в себе адсорбированную воду, и, следовательно, состояние сжатости почвенных частиц является естественным их состоянием.

Что же касается ошибки, возникающей при определении удельного веса твердой фазы засоленных почв под инертными жидкостями, то ее можно устранить следующим образом. Наряду с определением удельного веса твердой фазы солончака, нужно определить его для той же породы, на которой сформировался солончак, но вне засоления, причем определение нужно сделать как под неполярной жидкостью, так и под водой. Сравнение удельных весов породы при этих определениях покажет степень возрастания удельного веса почвы под водой по сравнению с инертной жидкостью, и это позволит внести поправку на сжатие в удельный вес твердой фазы солончака, определенный под бензином или другой неполярной жидкостью. Пусть удельный вес солончака, найденный под бензином, равен a , и незасоленной породы, на которой сформировался солончак, равен: при определении под водой — b и под бензином — c . Очевидно, после поправки на «сжатие» удельный вес солончака (d) будет:

$$d = \frac{ab}{c}. \quad (28)$$

В случае отсутствия в распоряжении аналитика незасоленной породы ее можно заменить промытым водой образцом солончака.

Учитывая потребную точность определения удельного веса твердой фазы почв (до 0,01), практически целесообразно использовать неполярные жидкости в анализах при содержании солей в почве свыше 1%.

В заключение данного раздела отметим, что величина удельного веса твердой фазы почвы входит в ряд расчетных формул, например в формулу для определения порозности почвы, в формулу для вычисления скорости падения механических элементов почвы в жидкостях и в др. Косвенно по величине удельного веса твердой фазы можно приближенно судить о содержании органических веществ в почве, о степени ее глинистости, о содержании тяжелых минералов и пр.

УДЕЛЬНЫЙ ВЕС СКЕЛЕТА ПОЧВЫ

Под удельным весом скелета почвы понимают отношение веса твердого остова почвы (включая скважины) в абсолютно сухом

состоянии к весу воды в том же объеме при 4° С. По старой терминологии эта характеристика почвы называлась кажущимся удельным весом почвы (с немецкого — *scheinbares Gewicht des Bodens*). Этот термин не соответствует современному пониманию почвы, так как под почвой понимается здесь снова лишь твердый ее субстрат в естественном сложении, а в нашем понимании почва — это сочетание трех ее фаз: твердой, жидкой, газообразной плюс живое население. В 1923 г. Н. А. Качинским был предложен термин — удельный вес скелета почвы. Проводилась аналогия с животными, с растениями, где под скелетом понимается твердый остов организма, сообщающий ему ту или другую определенную форму. Следует отметить, что в почвенных работах иногда скелетом почвы или скелетной ее частью называют каменистый материал, содержащийся в почве, но понятие скелета в этом смысле неудачно, так как камни в почве, за исключением первичных почв на скальных породах, отнюдь не характеризуют общий их вид, общий остов почвы и ее сложение.

Общепотребителен также термин — объемный вес почвы, однако его часто ошибочно путают с удельным весом скелета почвы или, по старой терминологии, с кажущимся удельным весом почвы. Объемный вес почвы — это именованная величина, обозначающая вес твердой фазы почвы определенного объема при абсолютно сухом ее состоянии, например вес 1 см^3 , 1000 см^3 , 1 м^3 , и тогда он получает обозначение: 1 г/см^3 ; 1 кг/л ; 1 т/м^3 и т. д. Удельный же вес скелета почвы — это отвлеченная величина: отношение весов абсолютно сухой почвы в естественном ее сложении и в определенном объеме к весу воды в том же объеме при 4° С. Здесь наблюдается совпадение численной характеристики двух понятий, но нет совпадения их по существу так же, как нет совпадения понятий плотность тела и вес тела в определенном объеме, хотя численно они равны.

Как покажем ниже, удельный вес скелета почвы, как и объемный ее вес, широко используются для характеристики почвы и в производственных работах, поэтому естественно, что методам определения данных величин в почвоведении издавна уделяется большое внимание. Известны буровой, фиксажный, метод вытеснения жидкостей, вазелиновый, песчаный и другие методы определения удельного веса скелета почвы. Наиболее старым, лучше разработанным и чаще применяемым в почвенной практике является буровой метод. Принципиальную основу его мы здесь и охарактеризуем.

Буровой метод определения удельного веса скелета почвы

Сущность бурового метода определения удельного веса скелета почвы или объемного ее веса сводится к взятию и взвешиванию определенного объема почвы, по возможности в ненарушенном

ее сложении. Параллельно учитывается влажность почвы в том же слое или в том же образце, чтобы иметь возможность рассчитать вес абсолютно сухой почвы P в заданном объеме, например в 100 см^3 , в литре и т. д. Зная вес почвы при естественном ее сложении в заданном объеме (v), находим удельный вес скелета почвы (d_1):

$$d_1 = \frac{P}{v}. \quad (29)$$

Цель всех исследователей бурового метода при изучении объемного веса почвы, как и удельного веса скелета почвы, сводилась к решению следующих задач: а) выяснить необходимый размер вырезаемого образца почвы; б) выяснить варьирование удельного веса скелета почвы на изучаемой территории, чтобы установить необходимый контроль в работе; в) обеспечить наибольшую точность в работе, т. е. обеспечить выемку образцов почвы без нарушения естественного их сложения; г) попытаться дать конструкцию бура, с помощью которого можно было бы вырезать образцы почвы с разных ее глубин, не закладывая почвенного разреза, т. е. простым бурением.

Предложены десятки конструкций почвенных буров «для взятия образцов почв с ненарушенной структурой» и новые конструкции предлагаются едва ли не каждый год. Первые буры были созданы еще в XIX в. Наиболее старыми из них являются: призма Джонса (1885) и буры русских агрономов Н. В. Бурмачевского (1888) и А. А. Измайльского (1894). Позже сконструированы буры: П. Баракова (1903); Е. Раманна (Е. Ramann, 1911), Г. Ф. Нефедова (1913), Е. И. Копецкого (Кореску, 1914), В. В. Геммерлинга (1915), А. Г. Дояренко (1921), Краусса (Krauss G., 1923), Н. А. Качинского (1924), П. А. Некрасова (1925), В. А. Желиговского (1925), П. И. Андрианова (1925), Е. Б. Повелла (Е. В. Powell, 1926), А. Ф. Лебедева (1928), В. П. Попова (1928), А. М. Панкова С. В. Зонна (1929), Е. Г. Петрова (1929), А. В. Лаврова (1929) и многие другие, в большинстве случаев повторяющие или варьирующие конструкции своих предшественников. На рисунке 32 показано несколько конструкций таких буров.

Н. А. Качинским в 1925 г. произведено сравнение в производстве буров различных конструкций *. Работа всеми бурами производилась одновременно на различных угодьях дерново-подзолистой почвы. В работе каждым буром был применен высокий контроль (10 повторностей), что позволило обработать полученные материалы по методам вариационной статистики с получением среднего арифметического (M), срединной ошибки ($\pm m$), коэффициента вариации (V) и показателя точности опыта ($\pm P$) **.

* См.: Н. А. Качинский. О почвенных бурах для взятия образцов с ненарушенной структурой. «Почвоведение», 1925, № 4.

** См.: Н. А. Качинский. Изучение физических свойств почвы в корневых систем растений при территориальных почвенных исследованиях. М., 1927 и 1930.

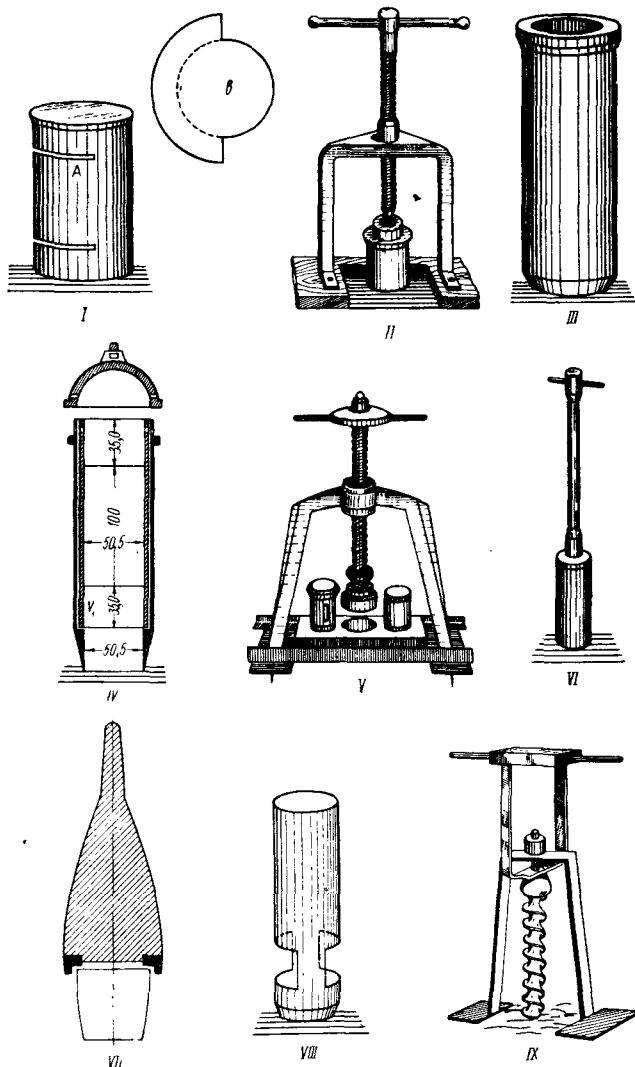


Рис. 32. Приборы для взятия образцов почвы с ненарушенным сложением:

I — бур Н. В. Бурмачевского: *A* — цилиндр для вырезания образца почвы через щели в цилиндре *A*; *II* — бур А. А. Измаильского с винтовым прессом для вдавливания цилиндра в почву; *III* — бур П. Ф. Баракова; *IV* — бур Е. И. Копецкого с тремя вкладными внутрь его стальными цилиндрами высотой 35, 100 и 35 см; к буру имеется штанга для глубокого бурения; *V* — бур В. В. Геммерлинга с вкладным стеклянным цилиндром и винтовым прессом для вдавливания бура в почву; *VI* — бур со штангой А. Г. Дояренко; *VII* — бур Г. Крауса с приспособлением для вдавливания в почву; *VIII* — бур А. Ф. Лебедева; почва берется в нижнюю часть цилиндра до выреза в трубе, верхний цилиндр служит рукояткой; *IX* — бур В. А. Желиговского — погружается в почву путем обтачивания почвенной колонки специальным приспособлением («коронкой» бура)

Такой метод работы позволил установить основные закономерности точности работы с бурами различных конструкций, условия их применения, необходимые размеры отбираемых бурами образцов почвы, целесообразные параметры конструируемых приборов. Выводы по этим вопросам сводятся к следующему.

Чем меньше по объему бур, тем легче им работать, поэтому нужно применять буры самых малых размеров, которые, однако,



Рис. 33. Взятие образца почвы различными бурами:

1 — бур высокий, узкий, режущее кольцо без зазора; образец почвы спрессован; 2 — бур низкий, широкий, режущее кольцо с зазором. Образец почвы взят нормально

обеспечивают необходимую точность в работе. На почвах зацелинившихся (целина, залежь), «устоявшихся» в своем сложении (стерня), требуемая точность в работе, при достаточном контроле в определениях, вполне может быть обеспечена буром объемом 100 см^3 . На почвах мягких, недавно вспаханных или прокультивированных, для которых характерны крупные поры, размер бура должен быть увеличен до 500 см^3 .

Как показывает практика, удельный вес скелета почвы (тоже объемный вес) сильно варьирует даже в пределах одной и той же почвы и одного и того же горизонта, особенно в пахотном слое. Этому способствует наличие в почве крупных пор, трещин, дендрин, червороин и пр., поэтому определения следует производить с контролем: в поверхностном горизонте с пятикратной повторностью; в нижележащих горизонтах — с тройной.

Всякий бур в какой-то степени деформирует почву. Для уменьшения деформации нужно режущее кольцо бура делать уже, нежели остальной просвет цилиндра. (Это так называемый внутренний зазор бура.) В этом случае устраняется трение вырезаемого образца почвы о внутренние стенки цилиндра и тем самым ослабляется деформация почвы. Для достижения этой же цели необходимо применять буры низкие, но с широким диаметром. На рисунке 33 показано преимущество низкого бура с широким диаметром и с внутренним зазором.

Наибольшая деформация почвы при вырезании образца буром, как показали исследования М. Х. Пигулевского (1925), отмечается перед режущей его частью. Из этого следует, что повторное взятие образцов из одной и той же скважины с разных глубин почвы рекомендовать нельзя, так как в этом случае в бур будет попадать почва, спрессованная при отборе образцов из вышележащих горизонтов. Из этого также следует, что для взятия образцов почвы с «ненарушенным сложением» нельзя применять штанговые буры, как бур Копецкого, Дояренко, Андрианова и др. (см. рис. 32).

Наконец, последнее требование к почвенным бурам для взятия образцов с ненарушенным сложением касается простоты их конструкции. Бур должен быть настолько прост по конструкции, чтобы его можно было изготовить в несложных слесарных и токарных по металлу мастерских. Как пример сложной конструкции бура укажем на бур профессора В. А. Желеговского (см. рис. 32). Бур его конструкции с обтачиванием специальными ножами почвенной колонки, на которую одновременно надвигается цилиндр для взятия этой колонки, в совершенстве удовлетворяет требованию легкости работы и отсутствию прессования почвы, но из-за большой конструктивной сложности он в производство не вошел.

В заключение разбора бурового метода определения удельного веса скелета почвы даем описание прибора (бура) Качинского, который нашел широкое применение в почвенных исследованиях (рис. 34).

Прибор включает два стальных цилиндра (1 и 2) для взятия образцов почвы с ненарушенным строением. Габариты малого цилиндра: диаметр режущего кольца — 56 мм; диаметр остальной части цилиндра — 57 мм; высота его 40 мм; объем вырезаемого образца почвы — 100 см³. Габариты большого цилиндра: диаметр режущего кольца — 87 мм; диаметр остальной части цилиндра — 88 мм; высота его — 84 мм. Объем вырезаемого образца почвы 500 см³. К большому цилиндру приспособлены две крышки для закрывания образца на тот случай, если образец не переносится в специальные банки, а взвешивается в самом цилиндре (см. рис. 33, пометка 2 слева). В прибор входят: станок-направитель (3) с шомполом (шомпол стоит на станке) и молоток (6) для погружения малого цилиндра в почву; мастерок и нож (4) (нож на фото не показан) для выемки бурика из почвы, очистки цилиндра от приставшей земли и обрезания почвенного образца вровень по верхней и нижней плоскостям обреза цилиндра; совок, на котором производится перенос почвенного образца из бурика в банку; дубовый молоток (6); алюминиевая банка с крышкой (7) для хранения и взвешивания образца, взятого буриками; малый алюминиевый стаканчик (8) для хранения и взвешивания образца почвы при определении ее влажности на той глубине, с которой взят образец для учета удельного веса скелета почвы; ящик с запасными банками, в которые переиосится почва из бурика.

Весь прибор компактно собран в специальном футляре.

Многочисленные определения удельного веса скелета почвы описанным прибором показали легкость работы с ним и высокую точность получаемых результатов.

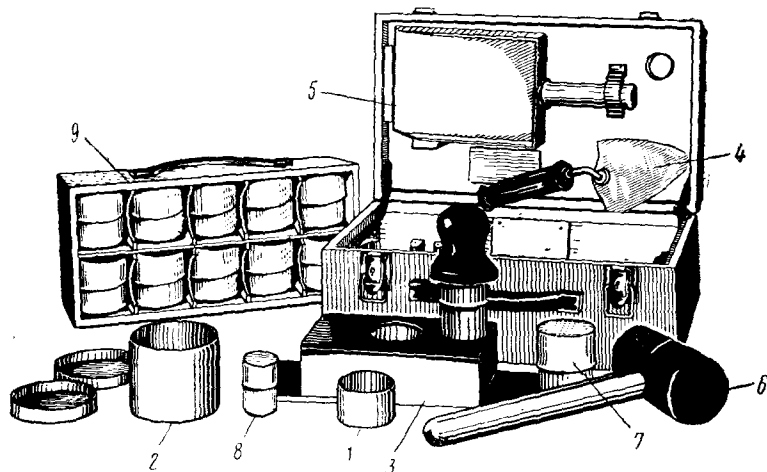


Рис. 34. Прибор для взятия образцов почвы с ненарушенным сложением (Н. А. Качинского):

Определение удельного веса этим прибором по горизонтам почвы производится на широких ступенях открытых почвенных шурфов. Повторные образцы берутся «письмом» по углам и в центре метрового квадрата. Закладка открытых шурфов со ступенями не осложняет данного исследования, так как такие шурфы необходимы и для других работ, как описание разреза, взятие монолитов и образцов для лабораторных исследований, определение водопроницаемости и влагоемкости почвы и пр.

Техника работы с прибором подробно описана в нашей книге «Изучение физических свойств почвы и корневых систем растений».

Другие методы определения удельного веса скелета почвы

Фиксажный метод. В некоторых специальных случаях необходимо определить удельный вес скелета почвы в образцах малого размера и обладающих такой формой, когда их нельзя точно вырезать буром, например слой так называемой плужной подошвы. В этих случаях можно воспользоваться фиксажным методом, который начиная с 1909 года предлагался рядом ученых: Б. Е. Броун, Мак Интаир и В. Ф. Гри (B. E. Brown, W. H. Intire, W. F. Gree, 1909—1910); Ц. Ф. Шой (C. F. Schaw, 1917); М. Х. Пигулевский

и Е. Ф. Зеберг, 1925; М. Б. Герленд и Р. С. Смит (М. В. Harland and R. S. Smith, 1928).

Сущность метода состоит в том, что испытуемый образец почвы пропитывается при нагревании какой-либо фиксажной массой, например парафином, смесью парафина с нафталином или с нафталином и спермацетом. После остывания фиксажной массы она закрепляет, как бы цементирует, почвенный образец. В таком состоянии его можно резать, пилить, строгать. Можно из него вырезать ту часть (например, плужную подошву), которая исследователя интересует и для нее определить объемный вес или удельный вес скелета почвы.

В варианте фиксажного метода, по Пигулевскому и Зебергу, в качестве фиксажной массы используется смесь парафина, нафталина и спермацета. Объем зафиксированного образца определяется пикнометрически. После установления объема фиксажная масса отгоняется в аппарате Сокслета с использованием в качестве экстрагирующих веществ петролейного эфира или сероуглерода. Очищенный от фиксажной массы образец почвы высушивается при 105°C и взвешивается. Зная вес образца и объем его, находят удельный вес скелета почвы.

Определение объемного веса почвы путем погружения ее в жидкость. Абсолютно сухой образец почвы погружается в жидкость. Объем образца учитывается трояко: а) в специальных приборах — волюменометрах; б) по объему вытесненной образцом жидкости; в) по потере в весе образца, погруженного в жидкость.

Если жидкость не смачивает почву, например ртуть, то объем кусочка почвы или агрегата можно определять в натуральном его виде; в противном случае почва обязательно фиксируется, как было отмечено выше, или покрывается водонепроницаемой пленкой из коллодиума, резинового клея и пр.

Волюменометры — приборы, позволяющие точно учесть небольшой объем твердого тела, например структурной отдельности почвы. Поясним это на примере волюменометра Фростеруса и Фрауэнгофера (Frosterus В. и Н. Fraunhofer, 1925) (рис. 35). Сосуд *В* в приборе, включая трубки от крана *а* до крана *б* имеет определенный объем, который устанавливается путем заполнения этого сосуда ртутью через воронку *А* и двухходовой кран *а*. Если сосуд *В* заполнить ртутью ниже уровня его отъемной крышки, поместить на ртуть испытуемый запарафинированный образец почвы, закрыть плотно крышку и через воронку *А* добавить ртуть с учетом всего объема сосуда *В*, то через кран *б* в воронку *С* стечет количество ртути, равное по объему почвенному образцу. Внизу рисунка показаны различные позиции двухходового крана *а* для соединения воронки *А* с воронкой *С* и с сосудом *В*.

Значительно проще определение объема почвенного образца производится в волюменометрах Виленского и Крохиной. Каждый из этих приборов включает две равные по объему колбы, соеди-

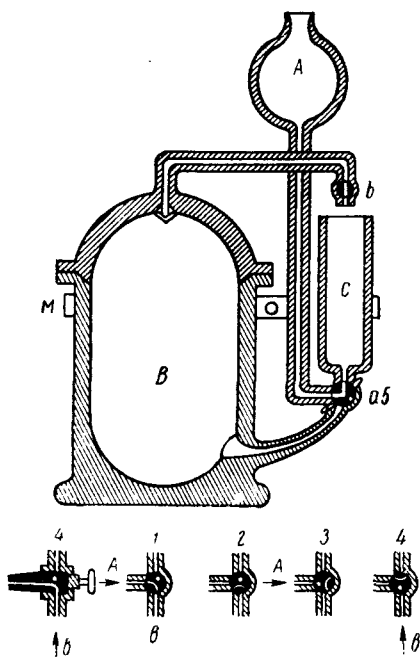


Рис. 35. Волюменометр Фростеруса и Фрауэнгофера для определения объема почвенного образца

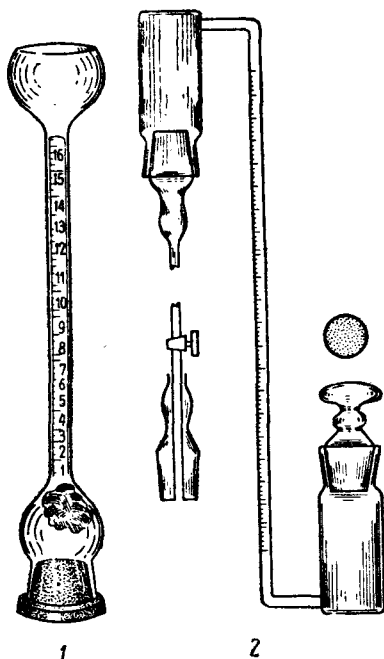


Рис. 36. Волюменометры Крохиной (1) и Виленского (2)

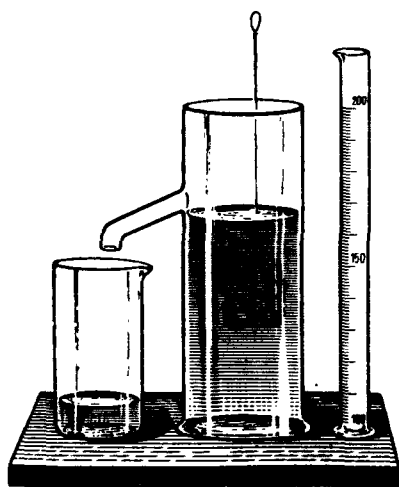


Рис. 37. Прибор А. М. Панкова для определения объема почвенного образца

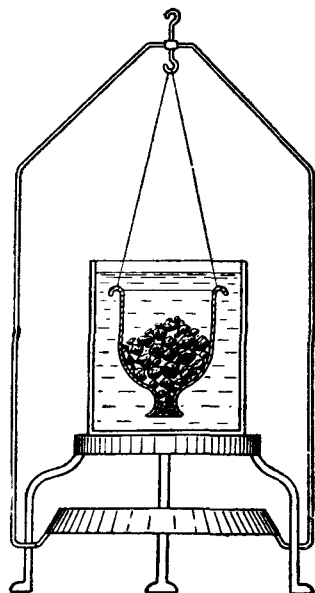


Рис. 38. Приспособление М. Н. Польского к чашечным весам для определения объемного веса почвенных агрегатов

ненные мерной трубкой (рис. 36). Если наполнить ртутью одну колбу и часть мерной трубки до определенной высоты, а затем в одну колбу поместить почвенный образец и перевернуть прибор так, чтобы колбы поменялись местами (верх — низ), то на мерной трубке, соединяющей колбы, будет отмечено приращение столба ртути, равное объему почвенного образца. Точность работы с прибором Крохиной — $0,1 \text{ см}^3$, а с прибором Виленского — $0,01 \text{ см}^3$.

Н. А. Димо и А. М. Панков использовали для определения объема небольших по размерам почвенных образцов стеклянные цилиндры с боковым краном (рис. 37). Цилиндр устанавливается строго вертикально и наполняется водой до уровня крана. Затем в него опускается запарафинированный образец почвы. Через кран стечет количество воды, равное объему почвенного образца. В конечный результат определения вносится поправка на объем пленки из парафина.

В последние десятилетия в почвоведении уделяется большое внимание качественной оценке почвенных агрегатов — их механической прочности, водопропускности и порозности (А. Ф. Тюлин, С. Н. Рыжов, Н. А. Качинский, М. Н. Польский и др.). При определении порозности агрегатов необходима величина удельного веса их скелета или объемный вес. Обычно его определяют путем взвешивания запарафинированных агрегатов в этиловом спирте, который хорошо смачивает поверхность парафина и, следовательно, вытесняет приставший к образцу воздух. Если фиксирование агрегатов производить в перегретом парафине при $150\text{--}170^\circ \text{C}$, то пленка его, образующаяся на поверхности агрегатов, столь тонка, что практически не требуется при определении объема агрегатов внесения поправки на объем, занимаемый пленкой. Простое, но остроумное устройство для этого анализа предложено М. Н. Польским, с помощью его можно определять порозность агрегатов даже при диаметре зерна в 1 мм (рис. 38).

В заключение обзора методов определения удельного веса скелета почвы и объемного ее веса отметим еще два метода — «вазелиновый» и «песчаный». Эти методы предложены Израэльсоном (O. W. Israelson, 1918), Вильямом и Эрбом (Frear William a. E. S. Erb, 1928), Бекеттом (S. N. Beckett, 1928), К. С. Кириченко (1929), Ф. Зейдельманом (1957) и др. Техника метода проста: в пахотном слое или исследуемом горизонте ножом на нужной глубине вырезается ямка призматической формы. Вынутая из ямки почва строго количественно переносится в банку для взвешивания. Образовавшееся углубление заполняется из мерного цилиндра техническим густым вазелином или чистым мелкозернистым песком. По расходу вазелина или песка учитывается объем почвы. После сушки в лаборатории устанавливается ее вес и вычисляются удельный вес скелета и объемный вес. В почвенной практике нашел успешное применение «песчаный» метод на каменистых почвах, где работа буровым методом исключена.

Использование удельного веса скелета почвы

Удельный вес скелета почвы и его аналог — объемный вес, — характеризующие плотность почвы, широко используются в почвоведении, земледелии, в мелиорации почв. Они четко характеризуют профиль почвы, выявляя в ней уплотненные иллювиальные горизонты, рыхлость или уплотненность пахотного слоя. На основе удельного веса рассчитывается порозность почвы, запас в ней питательных веществ, гумуса в т/га , запас воды в почве в мм водного столба или $\text{м}^3/\text{га}$ и др. От плотности почвы нужно отличать ее твердость, под каковой понимается сопротивление почвы сдавливанию или расклиниванию, выражаемое в кг/см^2 . Приводим несколько примеров типичных величин удельного веса скелета различных почв (табл. 30).

Таблица 30

Удельный вес скелета различных почв

Дерново-подзолистая тяжело-суглинистая. Стерня ржи. Москов- ская область, Соба- кино-опытное		Серая лесная глини- стая земля. Стерня ржи. Рязанская об- ласть, Старожелово- опытное		Чернозем обыкновен- ный сырцовый, гли- нистый. Стерня пше- ницы. Куйбышевская область, поселок Воронцовский		Каштановая солонце- ватая глинистая поч- ва. Стерня пшеницы. Ростовская область, Коззавод 162	
горизонты, глубины, см	удель- ный вес скеле- та поч- вы	горизонты, глубины, см	удель- ный вес скеле- та поч- вы	горизонты, глубины, см	удель- ный вес скеле- та поч- вы	горизонты, глубины, см	удель- ный вес скеле- та поч- вы
$A_{\text{п}}$, 0—18	1,33	$A_{\text{п}}$, 0—20	1,29	$A_{\text{п}}$, 0—19	1,03	$A_{\text{п}}$, 0—22	1,25
A_2 , 18—30	1,58	A_2 , 20—36	1,43	A_1 , 19—38	1,11	B_1 , 22—42	1,31
B_1 , 30—55	1,63	B_1 , 36—68	1,49	B_1 , 38—62	1,17	B_2 , 42—58	1,41
B_2 , 55—85	1,64	B_2 , 68—90	1,50	B_2 , 62—79	1,37	C_1 , 58—98	1,52
B_3 , 85—150	1,71	C_1 , 90—150	1,56	C_1 , 79—126	1,58	C_2 , 98—167	1,69
B_4 , 150—200	1,78	C_2 , 150—200	1,52	C_2 , 126—200	1,52	C_3 , 167—200	1,56

Как следует из приведенных данных, во всех почвах удельный вес скелета возрастает в нижних горизонтах. Это обусловлено тремя причинами: а) уменьшением гумусности в нижних горизонтах (а гумус способствует рыхлости почвы); б) процессом иллювиальности, в силу которого в нижних горизонтах почвы в порах накапливаются вмытые вещества, увеличивая плотность этих горизонтов; в) многовековым давлением вышележащих горизонтов на нижние. Степень уплотнения нижних горизонтов тем сильнее, чем ярче выражен иллювиальный процесс и чем выше удельный вес твердой фазы вмываемых продуктов. Например, в дерново-подзолистой почве сильнее, нежели в других, приведенных в таблице,

почвах выражены процессы элювиальности и иллювиальности, и вымываемые продукты содержат тяжелые минералы, железистые соединения. И удельный вес скелета этой почвы в иллювиальных подгоризонтах достигает наивысшей величины 1,78, тогда как в серой лесной земле, где те же процессы выражены слабо, самый большой удельный вес скелета почвы достигает 1,56 в горизонте С₁.

В черноземе четко выражен иллювиальный процесс по извести (гор. С₁), а в каштановой почве — по извести и растворимым солям (гор. С₁, С₂, С₃).

В самом поверхностном горизонте имеем нисходящий ряд величин удельного веса скелета почвы: дерново-подзолистая (1,33) — серая лесная (1,29) — каштановая (1,25) — чернозем (1,03). Здесь наблюдается обратная корреляция, содержание гумуса в пахотном слое этих же почв изменяется в обратном порядке: 2,52—2,95—3,98—9,14%.

В подпахотных горизонтах почв величина удельного веса их скелета довольно стабильна. Она изменяется лишь в процессе набухания при увлажнении и растрескивания при высыхании почвы. Что касается самого верхнего горизонта почв, то в нем удельный вес скелета, помимо зависимости от влажности почвы, изменяется в широких пределах от обработки, от степени оструктуренности почвы, от угодья, которым представлено данное поле, от наличия или отсутствия леса, от промораживания сырой почвы. Н. А. Качинский дает такую оценку величин удельного веса скелета для почв суглинистого и глинистого механического состава (табл. 31).

Таблица 31

Оценка удельного веса суглинистых и глинистых почв

Удельный вес скелета почвы	Оценка	Удельный вес скелета почвы	Оценка
< 1	Почва вспушена или богата органическим веществом, например, дернина в полевых и лесных почвах. То же, мерзлая сырая почва в пахотном слое	1,3—1,4	Пашня сильно уплотнена
		1,4—1,6	Типичные величины для подпахотных горизонтов различных почв
		1,6—1,8	Сильно уплотненные иллювиальные горизонты, преимущественно подзолистых почв и солодей; горизонт С красноземов
1,0—1,1	Типичные величины для культурной свежеспаханной пашни		
1,2	Пашня уплотнена		

Для песчаных полевых почв характерны величины 1,3—1,5. В дерновом горизонте садовых и лесных песчаных почв удельный вес скелета почвы может уменьшаться до величины 1,2—1,3.

АБСОЛЮТНЫЙ ВЕС ПОЧВЫ

Под абсолютным весом почвы понимается вес почвы в единице объема, включая все ее фазы (твердую, жидкую и газообразную) в естественном состоянии и сложении. В связи с динамичностью влажности почвы абсолютный вес ее также сильно изменяется во времени.

Определяется абсолютный вес почвы буровым методом, как было описано выше. Образец почвы, взятый буром при естественной влажности, взвешивается. Вес делится на объем, и абсолютный вес почвы выражается в $г/см^3$, $кг/л$, $т/м^3$.

Гаммаскопический метод определения плотности почвы

В последние годы в связи с развитием химии и физики изотопов делаются попытки использовать радиоактивные вещества для определения влажности и плотности грунта (Van Bavel, W. R. Gardner, Don Kiskham, А. И. Данилин, В. А. Емельянов и др.). Пока эти методы еще недостаточно разработаны и в широкую почвенную практику не вошли. Здесь мы отметим лишь сущность теоретического подхода к определению плотности почвы или грунта (абсолютный вес почвы) с использованием гамма-лучей.

Гамма-лучи при прохождении через почву или грунт подвержены рассеиванию. Причина рассеивания — столкновение гамма-фотонов с электронами атомов почвы, в силу чего часть фотонов выбрасывается обратно в пространство, окружающее источник гамма-излучения. Чем плотнее почва или грунт, тем больше электронов содержится в единице ее объема, тем, следовательно, сильнее будет степень рассеивания (поглощения) гамма-лучей. Зная величину рассеивания, можно путем пересчета определить плотность грунта (абсолютный вес почвы). Для этой цели в США, Англии, СССР сконструирован ряд приборов. Например, в СССР испытывается прибор А. И. Данилина типа ИВП-64*, который частично изменен В. А. Емельяновым в части устройства коллиматора в контейнере. В качестве источника излучения гамма-лучей используются Co^{60} с периодом полураспада 5,32 года, дающий излучение с энергией 1,33 и 1,17 mV , или препарат радия с интенсивностью 4—5 *мюри*.

Схема определения такова. В почве закладываются две скважины на расстоянии одна от другой 30—40 *см*. В одну скважину помещают источник излучения гамма-лучей, в другую — счетчик для учета степени рассеивания (поглощения) гамма-лучей почвой. Абсолютный вес почвы (d_v) рассчитывается в $г/см^3$ по формуле

$$d_v = \frac{LnI_0 - LnI_n}{\sigma l}, \quad (30)$$

где Ln — натуральный логарифм;

* Д а н и л и н А. И. Измерение влажности почвы при помощи гамма-лучей. «Почвоведение», 1957, № 7.

I_0 — интенсивность гамма-излучения над поверхностью почвы в *имп/сек*;

I_n — интенсивность гамма-лучей, учтенная счетчиком после прохождения их через заданный слой почвы (l см) на глубине залегания испытуемого горизонта почвы n см;

σ — линейный коэффициент рассеивания (поглощения лучей почвой);

l — расстояние между скважинами в см;

k — коэффициент, учитывающий влияние на счетчик рассеянного излучения, близкий к 1, поэтому иногда опускается.

Как явствует из описанной схемы, гаммаскопическим методом учитывается абсолютный вес почвы (суммы всех ее фаз: твердой, жидкой, газообразной + живое население). Кажущаяся простота метода на практике пока не оправдывается. Необходимое оборудование для работы довольно сложно. Для определения нужно закладывать в почву скважины для датчика гамма-излучения и для счетчика, что не легче, а сложнее, нежели определение абсолютного веса почвы обычным буровым методом. Еще более сложно использование гаммаскопического метода для определения удельного веса скелета почвы (или объемного веса ее скелета), когда необходима постоянная заранее известная ее влажность. Кроме того, нужно помнить, что работа с радиоактивными веществами требует специальных предосторожностей по охране здоровья работающих.

Абсолютный вес почвы, помимо причин, обуславливающих величину удельного веса скелета почвы, зависит от влажности почвы в момент его определения: чем выше влажность почвы, тем он больше.

Абсолютный вес почвы необходим в ряде случаев при энергетическом балансе и оценке почвенных работ, например при нормах и оценке земляных выработок, энергетическом балансе вспашки и пр.

В заключение главы предлагаем решить следующие задачи:

1. Удельный вес скелета пахотного слоя 1,25; мощность пахотного слоя 20 см; влажность почвы на абсолютно сухую ее навеску 25%. Сколько воды на гектар в m^3 содержится в пахотном слое и какому водному столбу в мм эта вода соответствует?

2. Мощность пахотного слоя 25 см; удельный вес его скелета 1,30. В поглощающем комплексе почвы содержится Na^+ 0,2% к весу почвы. Сколько нужно внести в почву гипса ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), чтобы Ca^{++} гипса мог заместить в поглощающем комплексе почвы поглощенный Na^+ на половину его содержания или полностью?

3. Вычислить содержание гумуса в метровом слое почвы на гектар по следующим показателям:

Мощность горизон- тов почвы, см	Содержание гу- муса, %	Удельный вес скелета почвы
A_1-0-35	10,12	1,10
$B_1-35-50$	4,56	1,25
$B_2-50-80$	1,08	1,40
$C_1-80-100$	0,65	1,48

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ПОРОЗНОСТЬ ПОЧВЫ

Всякая почва обладает пористостью. Сумма всех пор или скважин в почве, отнесенная в % к ее объему, характеризует общую порозность или скважность почвы:

$$P\% = \frac{v_1}{v_2} \cdot 100, \quad (31)$$

где P — общая порозность почвы в %; v_1 — суммарный объем пор в почве в $см^3$; v_2 — объем почвы в $см^3$.

Значимость порозности в почвенных процессах исключительно велика. В порах размещаются и передвигаются вода и воздух. В порах на поверхности твердых частиц идет мобилизация питательных веществ. В порах размещаются корни, микроорганизмы и все другое живое население почвы. Поэтому можно утверждать, что от количества и качества пор в значительной мере зависит почвенное плодородие.

ОБЩАЯ ПОРОЗНОСТЬ ИЛИ СКВАЖНОСТЬ ПОЧВЫ

Величина общей порозности находится в функциональной зависимости от удельных весов твердой фазы и скелета почвы.

Из физики известно, что произведение объема на плотность тела при данной его массе величина постоянная. Отсюда

$$dv = d_1 v_1,$$

где d — удельный вес твердой фазы почвы;

v — объем твердой фазы почвы;

d_1 — удельный вес скелета почвы;

v_1 — объем скелета почвы.

Из приведенного равенства следует:

$$v = \frac{d_1 v_1}{d},$$

и порозность (P) в абсолютных величинах равна

$$P = v_1 - v = \frac{v_1 d - v_1 d_1}{d} = \frac{v_1 (d - d_1)}{d} \text{ см}^3,$$

а P в % к объему почвы равна:

$$P\% = \frac{v_1(d-d_1)}{dv_1} 100 = \frac{(d-d_1)}{d} 100. \quad (32)$$

Общую порозность почвы можно определить и прямым путем непосредственно в эксперименте. Здесь возможны два подхода:

а) путем заполнения в определенном объеме почвы всех ее пор жидкостью, например водой; б) путем вытеснения воды из какого-либо мерного сосуда после затопливания в нем образца почвы с ненарушенным сложением и с известным общим объемом. Первый принцип поясняем на рисунке 39.

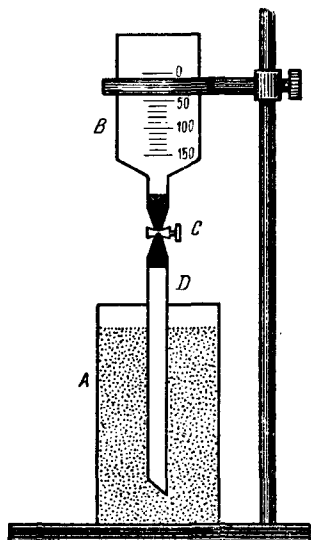


Рис. 39. Приспособление для определения общей порозности почвы путем заполнения пор водой

Прибор состоит из двух частей: цилиндра (А) и делительной воронки (В), которая ниже крана (С) снабжена цилиндрической трубкой (D), доходящей почти до дна цилиндра А и закрытой снизу сеткой. В цилиндр А при постоянном уплотнении насыпается испытуемый материал (песок или мелкозем). Воронка В наполняется водой до нулевой отметки. После этого кран С открывается и вода медленно впускается в цилиндр А до тех пор, пока зеркало ее не покажется на поверхности почвы. Зная объем цилиндра А и наружный объем погруженной в него части трубки D, по разности находим объем грунта в стакане А, равный v . А расход воды в $см^3$ из делительной воронки за вычетом внутреннего объема

$$P\% = \frac{100v_1}{v}. \quad (33)$$

трубки D укажет валовой объем пор в грунте в $см^3$ (v_1). Порозность (P) равна

Этот расчет справедлив для абсолютно сухого грунта. В случае сырой почвы необходимо знать ее влажность в объемных процентах. В этом случае для вычисления общей порозности грунта необходимо к расходу воды в $см^3$ из делительной воронки В прибавить объем воды в $см^3$, заключенный в испытуемом объеме грунта.

В целях учета общей порозности в образце почвы с ненарушенным сложением удобней прибегнуть к методу вытеснения воды из мерного цилиндра. Для этого можно использовать цилиндр Панкова (см. рис. 37). Цилиндр заполняется водой, избыток которой стекает через сливной отросток в стакан. После этого в цилиндре остается постоянный объем воды. Стекающая в стакан вода устраняется. Испытуемый абсолютно сухой образец почвы

определенного объема, взятый с ненарушенным сложением, строго количественно переносится в цилиндр, причем при переносе не только допустимо, но и желательно его раздробить, чтобы при смачивании из почвы легче удалялся воздух. Для этой же цели нужно после переноса почвы в цилиндр выждать такое время, пока из почвы не перестанут выделяться пузырьки воздуха.

Вода, стекая при этом из цилиндра в стакан и измеренная в мензурке, покажет в см^3 объем твердой фазы почвы в испытуемом образце. Зная исходный общий объем почвы в ненарушенном ее состоянии и объем твердой фазы почвы, по разности находим объем пор в см^3 и вычисляем его в процентах к объему образца.

Эту же операцию определения общей порозности почвы можно произвести в обычном мерном цилиндре, где учет объема твердой фазы почвы в испытуемом ее объеме, взятом с ненарушенной структурой, будет найден по разности объемов воды в цилиндре до погружения в нее почвенного образца и после погружения. Определение в мерном цилиндре может быть даже более точным, чем в приборе Панкова, так как в цилиндре допустимо перемешивание стеклянной палочкой почвы с водой для удаления из почвы воздуха, чего нельзя делать при работе с прибором Панкова.

Для непосредственного определения общей порозности почвы сконструирован ряд приборов — порозиметров, которые здесь описывать не станем.

Та или другая порозность в почве зависит от характера ее сложения или от укладки в ней первичных механических элементов и агрегатов *. Для простоты расчета исходят из схемы так называемой идеальной почвы, все механические элементы которой имеют шарообразную форму и равную величину. Можно представить себе разный характер укладки в почве таких механических элементов, но мы для вычисления порозности произведем расчет для двух крайних форм укладки шаров: самой рыхлой, когда шары укладываются по типу куба (рис. 40, I), и самой плотной — по типу додекаэдра (рис. 40, II) **.

В первом случае каждый шар, будучи окружен другими по трем осям координат (5), касается с шестью соседними шарами: четыре видны в профиль по осям x и y ; два будут по оси z (один спереди и один позади профиля). Во втором случае (при плотной укладке) каждый шар в массе других шаров (7) будет соприкасаться с двенадцатью шарами: шесть из них видны в профиль и шесть других показаны пунктиром — три спереди рисунка и три позади; между шарами видны образовавшиеся скважины, которые в сумме

* Сложение почвы, зависящее от ее порозности и твердости, нужно отличать от строения почвенного профиля, под каковым следует понимать совокупность всех морфологических свойств почвы, описываемых применительно к почвенным горизонтам.

** Рисунок дается в профиль.

представляют собою порозность идеальной почвы, которую легко рассчитать.

Если в каждой точке касания двух шаров провести касательные плоскости, то при рыхлой укладке (см. рис. 40, I), каждый шар окажется вписанным в куб, а при плотной укладке он будет вписан в додекаэдр. Порозность почвы при этом в первом случае будет равна разности объема куба и вписанного в него шара, во

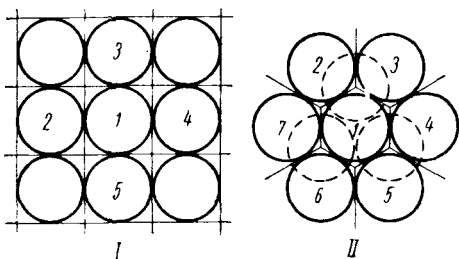


Рис. 40. Порозность «идеальной» почвы при рыхлой укладке механических элементов (по типу куба — см. I) и при плотной укладке (по типу додекаэдра — см. II). Схема просматривается в профиль

втором — разности объемов додекаэдра и вписанного в него шара. Произведем расчет.

Так как ребро куба равно диаметру шара, то порозность при рыхлой укладке в абсолютных объемных величинах будет равна:

$$P = (2r)^3 - \frac{4}{3} \pi R^3 = 3,811r^3,$$

или в процентах к объему почвы (к объему куба):

$$P\% = \frac{3,811 \cdot r^3}{8r^3} 100 = 47,64\%.$$

Порозность во втором случае равна объему додекаэдра без объема шара:

$$P \text{ см}^3 = \left(\frac{20r}{\sqrt{250+110} \cdot \sqrt{5}} \right)^3 \cdot \frac{15+7\sqrt{5}}{4} - \frac{4}{3} \pi r^3 = 1,360r^3; \quad (34)$$

$$P\% = 1,36r^3 : \left(\frac{20r}{\sqrt{250+110} \cdot \sqrt{5}} \right)^3 \cdot \frac{15+7\sqrt{5}}{4} = 24,51\% *. \quad (35)$$

Таким образом, общая порозность почвы в случае сложения их из элементарных механических зерен должна колебаться в пределах 24,51—47,64%. В данном случае расчет, сделанный по схеме «идеальной» почвы, очень хорошо соответствует природным явлениям: в природе порозность раздельночастичных песков действительно укладывается примерно в рамки 24—48%.

В почвах, тяжелых по механическому составу, — структурных — общая порозность обычно выше порозности песков, так как образуется сложная система пор как внутри агрегатов, так и между ними. Если исходить опять из схемы «идеальной» минеральной почвы, то наиболее вероятны три комбинации: а) самая высокая общая порозность, когда механические элементы — шары внутри агрегатов — уложены рыхло, по типу куба, и агрегаты меж-

* Soyka—Forsch. a. d. Gebiet d. Agrikulturphysik; Bd. 8 (1885). S. I. u. f.

ду собой уложены так же. В этом случае общая порозность почвы

$$P_a = 47,64 + \frac{52,36 \cdot 47,64}{100} = 72,58;$$

б) средняя по величине общая порозность, если механические элементы внутри агрегатов уложены плотно по типу додекаэдра, а сами агрегаты уложены рыхло — по типу куба. Общая порозность

$$P_6 = 47,64 + \frac{[52,36 \cdot 24,51]}{100} = 60,47;$$

в) низкая порозность тяжелых почв, когда и механические элементы внутри агрегатов и сами агрегаты между собой уложены плотно — по типу додекаэдра. Порозность в этом случае —

$$P_s = 24,51 + \frac{75,49 \cdot 24,51}{100} = 43,01.$$

Нужно сказать, что и в этом случае диапазон скважностей для тяжелых по механическому составу почв от 43,01% (плотные почвы) до 72,58% (сильно рыхлая почва) получился весьма правдоподобным, хотя свежеспаханные структурные почвы часто имеют порозность > 72%, а уплотненные вымыванием иллювиальные горизонты, например глинистого подзола, характеризуются порозностью < 40 и даже < 30%.

В таблице 32 приводим общую порозность уже не «идеальных», а естественных почв разного типа.

Таблица 32

Общая порозность почв разного типа, %

Дерново-подзолистая тяжелосуглинистая. Стерня ржи. Москов- ская область, Соба- кино—опытное		Серая лесная глини- стая земля. Стерня ржи. Рязанская область. Старожило- во—опытное		Чернозем обыкновен- ный сыровый. Стерня пшеницы. Куйбышевская область, поселок Воронцовский		Каштановая солонце- ватая глинистая почва. Стерня пше- ницы. Ростовская область, Коизавод 162	
горизонты, глубины, см	общая пороз- ность	горизонты, глубины, см	общая пороз- ность	горизонты, глубины, см	общая пороз- ность	горизонты, глубины, см	общая пороз- ность
$A_{п, 0-18}$	48,84	$A_{п, 0-20}$	50,38	$A_{п, 0-19}$	57,44	$A_{п, 0-22}$	51,55
$A_2, 18-30$	41,05	$A_2, 20-36$	46,25	$A_1, 19-38$	55,95	$B_1, 22-42$	50,57
$B_1, 30-55$	39,67	$B_1, 36-68$	44,61	$B_1, 38-62$	55,00	$B_2, 42-58$	46,79
$B_2, 55-85$	39,70	$B_2, 68-90$	44,65	$B_2, 62-79$	49,07	$C_1, 58-98$	44,12
$B_3, 85-150$	36,67	$C_1, 90-150$	42,22	$C_1, 79-126$	41,69	$C_2, 98-167$	38,55
$B_4, 150-200$	34,08	$C_2, 150-200$	43,70	$C_2, 126-200$	44,52	$C_3, 167-200$	42,96

Если сопоставить приведенные в таблице 32 величины порозности с величинами удельного веса скелета почвы в таблице 30, то выявим между двумя этими характеристиками почвы высокую степень обратной корреляции: чем больше удельный вес скелета почвы, тем ниже ее порозность. В то же время наблюдается пря-

мая корреляция между содержанием в почве гумуса и общей порозностью. В соответствии с этим в пахотном слое характеризуемых почв порозность возрастает от дерново-подзолистого почвенного горизонта к серому лесному, каштановому и чернозему.

В профиле почв отмечается одна и та же закономерность: уменьшение порозности почв в глубинных горизонтах. Это связано с отсутствием или малым содержанием гумуса в этих горизонтах и со слабой их оструктуренностью. Здесь сказывается также многовековое давление верхних горизонтов на нижние и частичная их спрессованность. Значительной причиной заниженной порозности глубинных горизонтов является иллювиальный процесс, в силу которого в эти горизонты вымываются продукты выноса из горизонтов вышележащих. Вымытые частицы, располагаясь в порах нижних горизонтов, снижают их порозность. Чем сильнее выражен иллювиальный процесс, как, например, в дерново-подзолистом почвенном горизонте, тем меньше порозность почвенного горизонта. По этому признаку можно установить горизонт максимального вымывания, так как ниже его обычно скважность несколько возрастает (см., например, в табл. 32 в сером лесном почвенном горизонте гор. С₂ и в каштановом почвенном горизонте гор. С₃).

Общая порозность глубинных горизонтов почвы более или менее постоянна, так как даже при набухании почва не имеет пространства для расширения. В поверхностном же горизонте она изменяется в довольно широких пределах в зависимости от степени оструктуренности, от обработки, от культуры, занимающей поле, или от целинной растительности, от степени смоченности почвы и длительности увлажнения. Так, на одной и той же дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве в Собакино - опытном Московской области в одно и то же время нами была зафиксирована общая порозность на глубине 0—10 см в лесу смешанном (гор. А₁)—67%, на свежеспаханном раннем поле — 65%, на часто унавоживаемом поле под сахарной свеклой — 58%, на стерне ржи — 51%, на многолетней залежи — 49%, на монокультуре (три года овес по овсу)—45%.

Резко возрастает порозность зимой при замерзании влажной почвы (табл. 33). В этом случае вода, передвигающаяся в парообразной и жидкой форме из нижних горизонтов в верхние, замерзает здесь, увеличивая свой объем примерно на 9%. Лед распирает скважины, образуя трещины для новых порций поступающей снизу воды. Таким путем в поверхностном слое почвы, где она может свободно расширяться вверх, порозность за морозный период возрастает на 15—20% к объему почвы, а влажность ее в 1,5—2 раза превышает общую влагоемкость почвы в талом состоянии (см. табл. 33). С этим процессом связано вредное явление, так называемое «выпирание озимей».

На основании общей скважности можно судить о степени уплотнения пахотного слоя или горизонта (табл. 34).

Таблица 33

Динамика влажности, удельного веса скелета и общей порозности дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы
(Собакино-опытное, Московская область. Залежь многолетняя)*

Сроки наблюдения	Горизон- ты, глуби- ны, см	Абсолютная влажность почвы, % на сухую навеску					Удельный вес скелета почвы					Общая порозность, % объема почвы				
		M	m (±)	P (±)	$\frac{M_1-M_2}{\sqrt{m_1^2+m_2^2}}$	W%	M	m (±)	P (±)	$\frac{M_1-M_2}{\sqrt{m_1^2+m_2^2}}$	W%	M	m (±)	P (±)	$\frac{M_1-M_2}{\sqrt{m_1^2+m_2^2}}$	W%
1927 г.	A ₀ — па- хотный (2,5— 12,5 см)															
15/VI		30,8	0,51	1,66			1,33	0,02	1,58			48,88	0,82	1,68		
					4,5	100,0				2,22	97,2				2,18	96,9
30/VIII		28,1	0,31	1,10			1,23	0,04	3,25			52,75	1,62	3,07		
					10,67	100,0				1,9	94,9				1,71	91,2
10/XI		39,3	1,0	2,54			1,15	0,01	0,87			55,66	0,40	0,72		
					3,82	100,0				2,50	98,8				2,14	96,7
13/XII		35,1	0,45	1,28			1,23	0,03	2,44			52,86	1,23	2,33		
					6,84	100,0				8,1	100,0					
1928 г.																
31/I		50,7**	2,23	4,40			0,89	0,03	3,37			65,69	1,31	1,99		
					1,03	69,1				2,22	97,2				7,11	100,0
21/III		47,8	1,72	3,60			0,97	0,02	2,06			62,80	0,88	1,40		
7/V		35,5	0,47	1,32			1,20	0,01	0,83			53,81	0,46	0,85		
12/VII		31,7	0,40	1,26			1,16	0,01	0,86			55,54	0,52	0,94		

Сроки наблюдения	Горизонты, глубины, см	Абсолютная влажность почвы, % на сухую навеску					Удельный вес скелета почвы					Общая порозность, % объема почвы				
		M	m ($\pm$)	P ($\pm$)	$\frac{M_1^2 - M_2}{\sqrt{m_1^2 + m_2^2}}$	$W\%$	M	m ($\pm$)	P ($\pm$)	$\frac{M_1 - M_2}{\sqrt{m_1^2 + m_2^2}}$	$W\%$	M	m ($\pm$)	P ($\pm$)	$\frac{M_1 - M_2}{\sqrt{m_1^2 + m_2^2}}$	$W\%$
1927 г.	A_2 — подзоли- стый (17— 27 см)															
16/VI		17,9	0,37	2,07			1,63	0,01	0,61			38,71	0,44	1,14		
					3,62	100,0				1,82	93,0				2,01	95,6
31/VIII		16,2	0,29	1,79			1,59	0,02	1,26			40,24	0,62	1,54		
					11,67	100,0				2,73	90,3				3,18	99,9
11/XI		23,2	0,53	2,28			1,53	0,01	0,65			42,56	0,39	0,92		
					2,11	96,4				0,45	34,5				0,28	22,6
14/XII		21,7	0,47	2,17			1,52	0,02	1,32			42,82	0,78	1,82		
					3,83	100,0				0	0				0,20	16,0
1928 г.																
22/III		19,4	0,38	1,96			1,52	0,02	1,32			42,98	0,59	1,37		
8/V		20,7	0,56	2,71			1,58	0,01	0,63			40,45	0,44	1,09		
13/VII		19,5	0,39	2,20			1,50	0,02	1,33			43,68	0,87	1,99		

* Обозначения в таблице: M — среднее арифметическое; m — срединная ошибка; P — показатель точности исследования; $W\%$ — шанс вероятности. Срединная ошибка, при десятикратной повторности в определениях (n) рассчитана по формуле: $m = \pm \sqrt{\frac{\Sigma D^2}{(n-1)n}}$; Σ — знак суммирования; D — отклонения варианта от M .

** Подчеркнутые цифры характеризуют мерзлую почву.

Оценка порозности на основании общей скважности

Общая порозность почвы в вегетационный период для почв суглинистых и глинистых, %	Качественная оценка порозности	Общая порозность почвы в вегетационный период для почв суглинистых и глинистых, %	Качественная оценка порозности
55—65	Культурный пахотный слой — отличная	Порозность агрегата	
Свыше 70	Почва вспушена — избыточно пористая	Свыше 50	Наилучшая
50—55	Удовлетворительная для пахотного слоя	45—50	Хорошая
< 50	Неудовлетворительная для пахотного слоя суглинистых и глинистых почв	40—45	Удовлетворительная
		< 40	Неудовлетворительная
		< 30	Весьма плохая
25—40	Характерна для уплотненных иллювиальных горизонтов — чрезмерно низкая		

П р и м е ч а н и е. Общая порозность культурной песчаной почвы — 45—50%.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ПОРОЗНОСТЬ ПОЧВЫ

Выше мы говорили об общей порозности почвы, и, как явствует из приведенных примеров, значение ее для оценки свойств почвы велико. Но ведь общая порозность даже одной и той же величины может складываться из пор самых различных размеров и формы. В почвах есть трещины, крупные поры землероев, ходы истлевших корней (дендрины), есть поры средние по величине, измеряемые миллиметрами, и есть тонкие поры, микропоры диаметром в несколько микрон или даже миллимикрон. Очевидно, что от размеров и формы пор будут в сильнейшей степени зависеть водные, воздушные, тепловые и биологические свойства почвы. Поэтому издавна в почвоведении делались попытки расклассифицировать почвенные поры по их величине и по свойствам. Еще в 1864 г. в книге «Физика почвы» («Die Physik des Bodens») Шумахер предложил делить почвенную порозность на общую, капиллярную и некапиллярную. Под общей порозностью понималась совокупность в почве всех пор, выраженных в объемных процентах к объему почвы. К капиллярным порам относился объем пор, в котором задерживается вода после избыточного увлажнения почвы и стекания из нее свободной гравитационной воды, или поры почвы, заполняемые водой по капиллярам при соприкосновении почвы с зеркалом подпирающей ее воды. Наконец, некапиллярные поры измеряются разностью между порозностью общей и капиллярной. В непереувлажненной почве они заняты обычно воздухом.

Концепция Шумахера о классификации пор была воспринята многими исследователями и через работы Г. Вигнера и А. Г. Дояренко прочно вошла в почвенную и агрономическую литературу. В самые последние годы ею пользуется известный физик почвы США Бевер (Baver L. D., 1948—1955).

В 1930 г. Фагелер (Vageler P.), в 1931 г. Секера (Sekera F.) и в 1934 г. Качинский развили понятие об активных и неактивных порах в почве. Такое деление построено на различных категориях почвенной влаги. Классификацию форм воды в почве мы даем в VII главе. Здесь же лишь кратко отметим, что в почве есть вода свободная — гравитационная, передвигающаяся под влиянием силы тяжести, есть вода капиллярная, передвигающаяся под влиянием менисковых сил и отчасти силы тяжести, и, наконец, есть вода, адсорбированная почвой в силу ее поверхностной энергии. Эта последняя категория воды удерживается почвой с силой многих десятков, сотен и тысяч атмосфер. Она малоподвижна и или совсем недоступна растениям, или в некоторой своей части доступна им, но воспринимается медленно и с большой затратой растениями энергии.

К активным порам относят поры более крупных размеров, измеряемые десятками микрон, миллиметрами и сантиметрами. В них размещаются капиллярная и гравитационная вода, воздух и живое население почвы.

Поры неактивные или неактивная часть крупных пор — это объемы в порах, выполненные связанной водой, адсорбированной почвой. Схема «активных» и «неактивных» пор различной категории представлена на рисунке 41.

Чтобы оттенить значимость деления пор почвы на активные и неактивные, укажем, например, что корневые волоски растений не проникают в поры < 10 мк, а поры < 3 мк делаются недоступными уже и для микроорганизмов.

С 1936 г. значительное внимание в почвенной литературе уделяется порозности почвенных агрегатов (Пигулевский, Тюлин и Скляр, Рыжов, Качинский, Дараселия, Польский и др.).

Понятие об активных порах и сведения о порозности агрегатов расширили и углубили учение о скважности почвы.

Ричардс (Richard L. A., 1928), Кин (Keen V. A., 1931) и А. Г. Дояренко (1940) выступили с интересным предложением дифференцировать почвенную порозность на основе отсасывания из почвы воды при определенном вакууме и последующего расчета эффективного диаметра почвенных пор по формуле Жюрена (Jurin, 1718) или по уравнению Бехгольда (1907, 1908) *.

Поясним процесс расчета. По формуле Жюрена высота подъема воды в гидрофильных капиллярах выражается формулой

$$H = \frac{2A}{rgd}, \quad (36)$$

* См. разбор этих формул в главе I «Физика почвы», часть II.

где H — высота поднятия жидкости в капилляре;
 $2A$ — капиллярная постоянная жидкости;
 r — радиус капилляра;
 gd — вес единицы объема жидкости (плотность жидкости).
 Из формулы (36) следует:

$$r = \frac{2A}{Hgd} \quad (37)$$

Здесь gd равняется весу единицы объема нашей жидкости, который меняется в зависимости от температуры, как и капилляр-

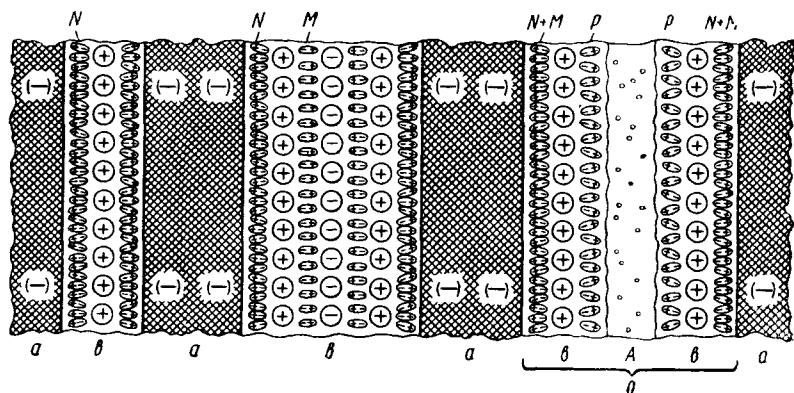


Рис. 41. Поры в почве «активные» и занятые связанной водой:

A — активная порозность; O — общая порозность; N и M — число слоев прочносвязанной, строго ориентированной воды; P — число слоев рыхлосвязанной, слабо ориентированной воды; a — твердая фаза почвы; b — связанная почвой вода

ная постоянная (в нашем случае — воды). Величины r , A и H должны быть выражены в одинаковых единицах, например в мм. В таком случае для $t = 20^\circ \text{C}$ величина r будет определяться выражением:

$$r = \frac{14,8420}{H \cdot 0,998235} = \frac{14,8673}{H} \text{ и } 2r = \frac{29,7346}{H}$$

или, округляя,

$$2r = \frac{30}{H} \text{ мм}, \quad (38)$$

14,8420 — капиллярная постоянная воды; 0,998235 — плотность воды при $t = 20^\circ \text{C}$.

Высота подъема воды в капилляре H характеризует силу натяжения мениска на поверхности капилляра или отрицательное

давление непосредственно под ним. Очевидно, воду из капилляра можно отсосать, если противопоставить силе мениска равную, но противоположно направленную силу. Таким образом, по данной концепции Ричардса и других, предполагается, что если мы будем отсасывать воду из почвы под вакуумом, то будет извлекаться вода именно из тех капилляров, под менисками которых развивается такое же отрицательное давление.

Давление в 1 *атм* соответствует давлению столба воды высотой в 10 м. Следовательно, полный вакуум под мениском капилляра

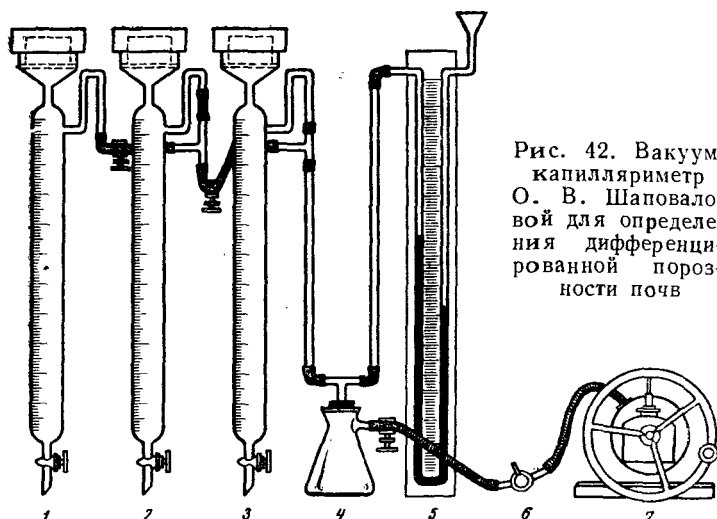


Рис. 42. Вакуум-капилляриметр О. В. Шаповаловой для определения дифференцированной порозности почв

теоретически должен был бы обеспечить высоту подъема воды в капилляре на 10 м; давление в 0,5 *атм* — подъем на 5 м и т. д. Предполагается, что, отсасывая воду под вакуумом в 10, 20, 30 *см* и т. д. водного столба, мы будем получать порции воды (то же объем пор) в см^3 из капилляров, способных поднять воду до высот 10, 20, 30 *см* и т. д. А отсюда по вышеприведенной формуле (38) легко перейти к диаметру капилляров, из которых отсасывается вода при заданном вакууме. Вакуум можно выражать и в давлении ртутного столба.

Для означенной операции сконструировано несколько приборов — вакуум-капилляриметров: Фишера (1918), Дояренко (1940), Шаповаловой (1958) и др. На рисунке 42 показан вакуум-капилляриметр О. В. Шаповаловой. Прибор включает в себя следующие части: Бюхнеровские воронки с вложенными в них тонкопористыми мембранами (бактериологическими ультрафильтрами). Воронки соединены с титровальными бюретками 1, 2, 3, в которые поступает раствор, откачиваемый из почвы, и с вакуум-системой: вакуум-

сосуд 4, ртутный манометр 5, насос 7. Между вакуум-сосудом и насосом помещен трехходовой кран 6, позволяющий включать вакуум-систему или соединять ее с атмосферой.

Испытуемые образцы почвы при заданном увлажнении загружаются в Бюхнеровские воронки, которые для предохранения от потери воды на испарение закрываются специальными крышками. Прибор приспособлен для работы как с насыпным материалом, так и с образцами почвы, взятыми буром в ненарушенном сложении *. Для характеристики получаемых с помощью этого прибора величин приведем таблицу 35 из работы О. В. Шаповаловой.

Т а б л и ц а 35

Диаметр почвенных пор, найденный путем отсасывания
воды из почвы под различным вакуумом *

Разряжение		Эквивалентный диаметр пор, мк	Объем пор (водоотдачи)	
в долях атм	в мм ртутного столба		в см ³	в объемных процентах
0,05	38	> 60	2,1	2,1
0,10	76	60—30	3,9	3,9
0,30	228	30—10	8,9	8,9
0,95	722	10—3	11,5	11,5
		< 3	18,2	18,2

* Объем пор с $d > 60$ мк следует увеличить на объем пор аэрации, которые при капиллярном насыщении почвы не заполняются водой.

П р и м е ч а н и е. Объем пор диаметром < 3 мк найден по содержанию воды в почве после отсасывания ее из капилляров с диаметром > 3 мк. Учет этой (последней) порции воды производится методом сушки почва при t 105° С. Почва автором эксперимента названа «суглинком».

Диаметры пор в таблице обозначены как э ф ф е к т и в н ы е. Здесь имеем аналог с понятием об эффективном радиусе и диаметре механических почвенных элементов, которое развито в главе III. Под эффективным диаметром капилляра понимается такой диаметр, при котором воображаемые цилиндрические капилляры, аналогичные по химическому и минералогическому составу с испытуемой почвой, обеспечили бы такие же капиллярные свойства в ней, какими обладает почва при фактическом ее сложении.

Изложенный метод определения эффективных диаметров почвенных пор интересен по замыслу и по результатам определения. Он, несомненно, дает добавочную качественную характеристику порозности почв. Однако самое представление о том, что в дан-

* Технику работы с этим интересным прибором см. в руководстве С. В. А с т а п о в а. «Мелиоративное почвоведение». 1958, стр. 91.

ном случае мы определяем диаметры пор, неверно. Ведь в смоченной почве в крупных порах, а тем более в капиллярах, кроме гравитационной и капиллярной воды, в пристенном слое всегда присутствует и вода, адсорбированная почвой в силу поверхностной энергии почвы. Эта вода удерживается почвой с силой, значительно превышающей давление в 1 атм, а потому она не может быть выделена из почвы при вакууме в пределах 1 атм. Для удаления этой формы воды из почвы требуется применять сушку при 105° С или прессование почвы под давлением в десятки, сотни и тысячи атмосфер. Таким образом, в выше описанном методе определения величины почвенных пор определяется эффективный диаметр не всего поперечника поры, а лишь активного ее просвета, за вычетом из эффективного диаметра поры толщины двойного слоя адсорбированной воды. При этом если поры столь тонки, что они сплошь выполнены адсорбированной водой (см. на рис. 41 две поры слева), то капиллярная вода в них физически не может присутствовать, и диаметр таких пор по методу отсасывания воды под вакуумом никак не может быть учтен. Чем легче почва по механическому составу, чем слабее ее адсорбционная способность, тем большую часть воды из капилляров можно отсосать под вакуумом и тем, следовательно, ближе эффективный диаметр активного просвета поры будет соответствовать эффективному диаметру всего поперечника поры. Наоборот, в тяжелых по механическому составу почвах, в тонких капиллярах разница между этими двумя величинами будет нарастать и, наконец, в неактивных порах капиллярной воды вовсе не будет.

По изложенной причине сумма объема пор, найденных методом отсасывания воды из почвы под прогрессивно возрастающим вакуумом, всегда меньше истинного объема скважин в почве даже для образцов почвы, лишенных крупных некапиллярных скважин. Это отличие истинных размеров пор от найденных методом отсасывания хорошо выявляется и в приведенной таблице из работы О. В. Шаповаловой.

Здесь все ошибки при определении объема пор методом отсасывания воды под вакуумом попали в объем пор с диаметром < 3 мк, т. е. уже в область пор адсорбционных явлений. Этот объем найден не методом отсасывания, а по содержанию воды, учтенной путем сушки почвы при t 105° С. О. В. Шаповалова анализировала суглинков с объемным весом 1,4 г/см³. Если принять для этого суглинка максимальную гигроскопичность за 8%, то объем в нем прочно и рыхло связанной воды, даже при учете средней плотности ее в 1,4, окажется около 12% — это большая часть того объема пор, который автором эксперимента ошибочно отнесен лишь к капиллярам с диаметром < 3 мк.

В заключение оценки разбираемого метода еще раз заметим, что не отводим его, но констатируем, что по данному методу определяется не эффективный диаметр, а эффективный диаметр актив-

ного просвета капиллярных пор (см. рис. 41 — схема скважины справа).

Говоря о методах качественной оценки пор в почве, следует упомянуть еще о попытке Ф. Е. Колясева и А. И. Агапова определить дифференциальную порозность почвы, используя метод Béchhold'a — Carplus'a в разработке Erbe (1933). Метод основан на принципе вытеснения из почвы одной жидкости, заполняющей поры, другой жидкостью, не смешивающейся с первой (например, вода — бензол). Вторая жидкость прогоняется сквозь почву под прогрессивно возрастающим давлением: P_1 , P_2 , P_3 и т. д. При всяком интервале давления поток второй жидкости через почву доводится до постоянной величины. Получается «кривая потока по давлению», от которой переходят к «кривой потока по ширине пор». Вышеназванные авторы, проверившие метод в отношении песка, подзола и чернозема, пришли к выводу, что высокие давления, применяемые в означенном методе, приводят к деформации капиллярной системы почвы, к переупаковке ее механических элементов и агрегатов. В силу этого ламинарный поток жидкости переходит в турбулентный и перестает подчиняться закону Hagen — Poiseuille, поэтому метод к почвам не применим.

Так как дифференциация порозности почвы лишь на три категории — общую, «капиллярную» и «некапиллярную» — в настоящее время не удовлетворяет почвоведов и агрономов и в двух последних понятиях является неточной или даже неверной, был предложен более детальный подход к дифференцированию почвенных пор (Качинский, 1947).

Выделяемые Качинским категории почвенных пор таковы:

а) порозность общая ($P_{общ}$), определяемая по формуле (32):

$$P_{общ} = \frac{d - d_v}{d} \cdot 100\%,$$

где d — удельный вес твердой фазы почвы;

d_v — удельный вес скелета почвы;

б) порозность отдельных агрегатов ($P_{агр}$). Ее мы определяем путем кипячения агрегатов в парафине. Этим достигается удаление из агрегата воздуха и фиксация формы и объема агрегата тончайшей пленкой парафина при остуживании его. Объем зафиксированного агрегата находим путем взвешивания его в этиловом спирте. Расчет порозности агрегата ведется по формуле

$$P_{агр} = \left(1 - \frac{p}{vd}\right) \cdot 100\%,$$

где $P_{агр}$ — порозность агрегата в % от его объема;

p — вес абсолютно сухого агрегата или агрегатов в г;

v — объем агрегата или суммы агрегатов в $см^3$;

d — удельный вес твердой фазы почвы;

в) порозность агрегатная суммарная ($P_{\Sigma ag}$), определяемая по формуле

$$P_{\Sigma ag} = \frac{a(100-b)}{100-a} \% * , \quad (39)$$

где a — порозность агрегата;

b — общая порозность почвы;

г) порозность межагрегатная ($P_{м-агр}$):

$$P_{м-агр} = (P_{общ} - P_{\Sigma ag}) \% **, \quad (40)$$

д) объем порового пространства, занимаемый прочносвязанной водой ($P_{мг}$):

$$P_{мг} = (W_{мг} \% \cdot d_v : 1,50) \%, \quad (41)$$

где W — максимальная гигроскопичность в весовых %;

d_v — удельный вес скелета почвы;

1,50 — плотность максимальной гигроскопической воды;

е) объем порового пространства, занятого рыхлосвязанной водой ($P_{р.с.в.}$):

$$P_{р.с.в.} = (0,5W_{мг} \cdot d_v : 1,25) \%, \quad (42)$$

* Вывод формулы для определения $P_{\Sigma аг}$. Пусть порозность отдельных агрегатов равна $a\%$; порозность общая равна $b\%$. Принимая: объем всех агрегатов в почве = $x\%$, можем написать уравнение:

$$\frac{ax}{100} + (100-x) = b,$$

или

$$x - \frac{ax}{100} = 100 - b;$$

решаем уравнение для x , получим:

$$x = \frac{(100-b) 100}{100-a},$$

отсюда порозность суммарная агрегатная

$$P_{\Sigma ag} = \frac{ax}{100} = \frac{(100-b) 100a}{(100-a) 100} = \frac{a(100-b)}{100-a} \% . \quad (39)$$

** В целинных почвах и в почве, культурно обработанной, как показано П. И. Аидриановым и в лаборатории почвенного института АН СССР М. Н. Польским, порозность агрегатов > 5 мм изменяется слабо. Порозность агрегатов < 5 мм, как это мыслится теоретически и доказано экспериментально М. Н. Польским, тем меньше, чем агрегат ближе подходит к первичному. Первичные агрегаты имеют различную порозность в зависимости от типа укладки в них механических элементов почвы. Крайними по порозности будут первичные агрегаты, построенные по типу куба (порозность около 47—50% и лишь изредка выше этой величины) и по типу додекаэдра (порозность около 25%). В остальных первичных агрегатах порозность будет колебаться от 25 до 50%, причем на размерах порозности агрегатов, как и почвы в целом, сказываются процессы — элювиальный и иллювиальный.

В песчаных бесструктурных почвах порозность агрегатную и межагрегатную определять и вычислять не следует.

где 1,25 — плотность пленочной воды; остальные обозначения прежние;

ж) объем порового пространства, занятый капиллярной водой ($P_{\text{кап}}$):

$$P_{\text{кап}} = (W_{\text{общ}} - 1,5W_{\text{м. з.}}) \cdot d_v\%, \quad (43)$$

где $W_{\text{общ}}$ — общая («полевая») влагоемкость почвы при поливе почвы водой сверху в весовых %;

1,5 $W_{\text{м. з.}}$ — влага завядания растений в весовых %;

d_v — удельный вес скелета почвы;

з) объем пор, занятых водой (всякой) (P_w):

$$P_w = (P_{\text{кап}} + P_{\text{м. з.}} + P_{\text{р. с. в.}})\%, \quad (44)$$

и) объем пор, занятых воздухом ($P_{\text{аэр}}$):

$$P_{\text{аэр}} = (P_{\text{общ}} - P_w)\%. \quad (45)$$

Приведенный порядок вычисления порозности агрегатной и меж-агрегатной применим к целинам и старым залежам, в отношении которых можно предположить, что агрегаты свойственной им структуры, перемежаясь с межагрегатной порозностью, составляют весь объем почвы. На почвах, в какой-то мере распыленных, вычисление этих характеристик несколько осложняется. В этом последнем случае для нахождения агрегатной порозности почвы, наряду с порозностью агрегата необходимо знать долю, которую все агрегаты по совокупности составляют по объему в отношении пахотного слоя.

Пусть в пахотном слое $P_{\text{общ}} = 60\%$; порозность отдельных агрегатов равна 55%; доля агрегатов по объему в пахотном слое составляет 80%. Тогда агрегатная порозность $P_{\text{аг}}$ равна $55 \times 0,8 = 44\%$, а порозность межагрегатная $P_{\text{м-аг}} = 60 - 44 = 16\%$ *.

Из всего вышеизложенного ясно, что объем пор, занятых всей совокупностью воды при максимальном насыщении ею почвы и свободном гравитационном оттоке, нельзя называть по-старому — капиллярной порозностью, так как в этот объем входят и поры связанной воды, иные по природе, нежели капиллярные.

* Долю агрегатов в процентах объема пахотного слоя или горизонта, содержащего пыль, находят следующим образом: буром для взятия образцов с ненарушенной структурой выбирают из соответствующего слоя определенный объем почвы, скажем, 200 см³. Определяют ее влажность и удельный вес скелета (d_v). Почву размещают на стекле, клеенке или глянцевитой бумаге. Вручную отстраняют более крупные агрегаты. Оставшуюся крупку с пылью тщательно переносят на сито с отверстиями в 0,5 мм. Пыль отсеивают и взвешивают. Зная вес воздушно-сухой или сырой пыли и влажность ее, находят вес абсолютно сухой пыли (g). Зная вес абсолютно сухой пыли и удельный вес скелета почвы, находят объем пыли (v , см³), включая свойственные ей поры: V , см³ (пыли) = $g : d_v$. Наконец, вычисляют долю пыли, включая свойственную ей порозность, в процентах объема почвы (в данном случае к 200 см³) и по разности находят долю агрегатов в почве в процентах объема.

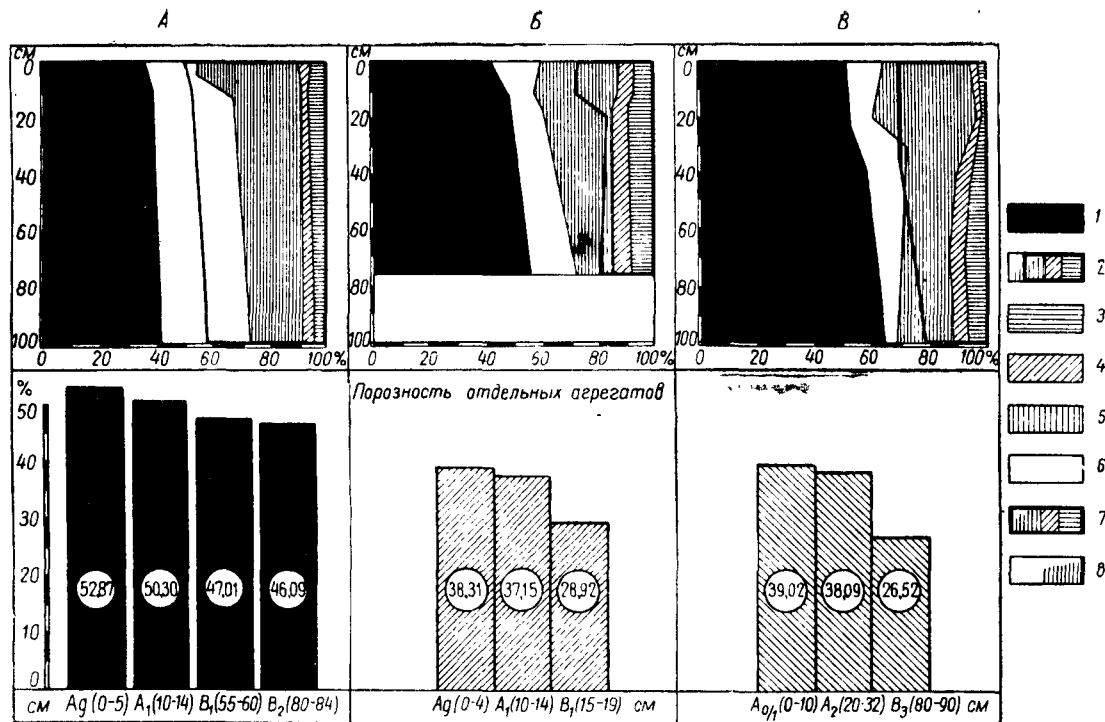


Рис. 43. Дифференциальная порозность почв в % к объему (по Н. А. Качинскому). А — выщелоченный по мощному легко суглинистый чернозем. Курская область, Степной заповедник — Стрелецкая степь; Б — солонец ореховатоглинистый крупнопылевато-иловатый. Свердловская область, Куваево. Целина; В — среднеподзоленная суглинистая песчано-пылеватая почва. Московская область, Собакино. Залежь многолетняя:

1 — твердая фаза; 2 — порозность общая; 3 — поры заняты прочносвязанной водой; 4 — поры заняты рыхлосвязанной водой; 5 — капиллярная порозность; 6 — порозность аэрации; 7 — порозность агрегатная; 8 — межагрегатная порозность

Столь же очевидно, что разницу между общей порозностью и порами, занятыми всей совокупностью воды при ее избытке и последующем свободном гравитационном оттоке, не следует называть некапиллярной. Этот термин в данном случае не охватывает всей некапиллярной воды и некапиллярных пор в почве, так

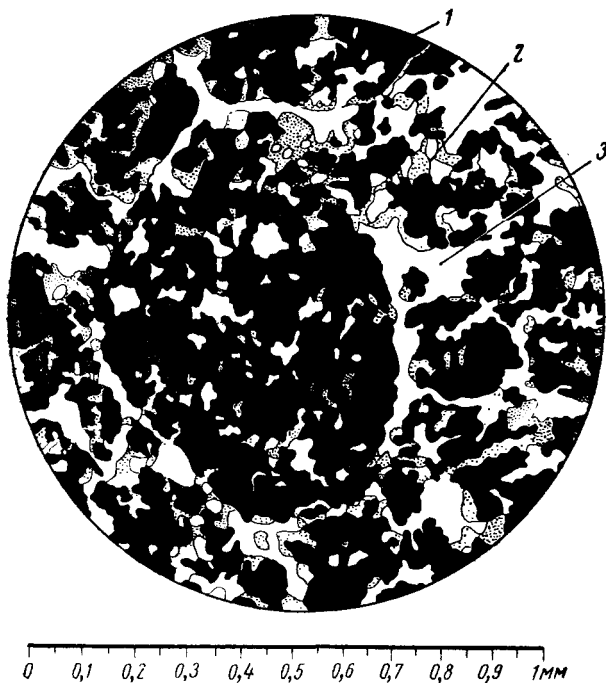


Рис. 44. Шлиф агрегата чернозема обыкновенного суглинистого пылевато-иловатого. Гор. А_п. Стерня пшеницы. Видны:

1 — первичные микроагрегаты; 2 — органические спайки;
3 — видимая в микроскоп порозность (шлиф и зарисовка
М. Н. Польского)

как поры, занятые связанной водой, тоже некапиллярные. Эту разницу мы называем порами аэрации ($P_{\text{аэр}}$).

Порозность связанной воды ($P_{\text{мс}} + P_{\text{р.с.в.}}$) характеризует объем порового пространства, где отсутствует гравитационная и капиллярная подвижка воды и где сами соли и питательные вещества могут трансформироваться лишь вследствие диффузии и электрических явлений.

В таблице 36 и на рисунке 43 приведена дифференциальная порозность некоторых почв. Мы сознательно выбрали резко различные типы, чтобы отчетливее подчеркнуть преимущества предлагаемой нами классификации пор. Как можно видеть, чернозем

Дифференциальная порозность некоторых почв

№ разреза	Почвы, угодья и пункты	Горизонты, глубины, см	Влажность почвы в момент работы		Удельный вес		Скважность								
			абсолютная, % веса сухой почвы	относительная, %	твердой фазы	скелета почвы	общая	в отдельных агрегатах	агрегатная суммарная ΣR_{agr}	межагрегатная	объем пор, занимаемых водой				
											капиллярной	рыхлосвязанной	прочносвязанной	всего	воздухом при капиллярном насыщении почвы водой
1	Выщелоченный легкоглинистый чернозем. Курская область, Степной заповедник. Стрелецкая степь	$A_{дц}$, 0—4	50,91	87,93	2,49	0,90	63,86	52,87	40,54	23,32	37,68	3,84	6,41	47,93	15,93
		A_{11} , 10—14	38,42	95,69	2,55	0,99	61,17	50,30	39,30	21,87	25,01	3,93	6,55	35,49	25,68
		A_1 , 40—44	28,80	84,09	2,57	1,06	58,75	—	—	—	21,54	3,93	6,56	32,03	26,72
		B_1 , 55—59	26,61	80,37	2,63	1,08	58,93	47,01	36,43	22,50	22,18	3,62	6,03	31,83	27,10
		B_{22} , 80—84	27,10	87,42	2,61	1,10	57,85	46,09	36,03	21,82	20,26	3,69	6,15	30,10	27,75
2	Солонец ореховато-глибистый легкоглинистый крупнопылевато-иловатый. Целина. Куваево. Урал	B_3 , 100—104	25,46	85,72	2,68	1,14	57,46	—	—	—	19,45	3,84	6,41	29,70	27,76
		$A_{дц}$, 0—4	25,23	61,63	2,46	1,07	56,50	38,31	27,01	29,49	28,75	4,01	6,69	39,45	17,05
		A_{11} , 10—14	28,68	77,95	2,64	1,32	50,00	37,15	29,55	20,45	30,73	4,75	7,93	43,41	6,59
		B_1 , 15—19	28,66	81,88	2,73	1,36	50,18	28,92	20,27	29,91	24,71	6,10	10,17	40,98	9,20
		C , 60—64	23,91	100,67	2,77	1,54	44,40	—	—	—	15,55	5,60	9,34	30,49	13,91
3	Среднеподзоленая суглинистая песчанопылеватая почва, Московская область, Собакино. Залежь многолетняя	$A_{дц-I}$, 0—12	22,09	75,90	2,61	1,33	49,04	39,02	32,61	16,43	32,32	1,70	2,84	36,86	12,18
		$A_{дц-II}$, 12—20	21,31	71,50	2,60	1,35	48,08	—	—	—	34,15	1,62	2,70	38,47	9,61
		A_2 , 20—32	17,83	84,10	2,65	1,39	47,55	38,09	32,27	15,28	27,14	1,51	2,50	31,15	16,40
		B_1 , 32—55	16,62	86,10	2,68	1,56	41,79	—	—	—	15,83	3,80	6,34	25,97	15,82
		B_2 , 55—85	16,07	78,80	2,72	1,72	36,76	—	—	—	13,43	5,79	9,64	26,86	7,90
		B_3 , 85—110	17,04	84,80	2,70	1,78	34,10	26,52	23,78	10,32	17,09	5,00	8,29	30,38	3,72

характеризуется высокой общей порозностью: по профилю почвы она колеблется от 63 до 58%. Отлична порозность агрегатов чернозема. В горизонте A_1 она свыше 50%; в иллювиальном горизонте (B) — не ниже 46%. Неактивное поровое пространство мало — около 10%. Диапазон активной влаги (капиллярного обводнения) широк (20—38%). На поры аэрации, за исключением дернины, падает значительная величина (26—28%), причем они распределены не только между агрегатами, но и внутри них.

Диаметрально противоположными характеристиками обладает солонец. Общая порозность его лишь в горизонте A_1 превышает 50%. В иллювиальных горизонтах она снижается до 44%. Порозность агрегатов неудовлетворительна: она низка (29—38%); значителен объем неактивных пор. В агрегатах отсутствуют поры аэрации. Воздухоносные поры между агрегатами представлены преимущественно трещинами. Диапазон активной влаги в толще почвы ниже 20 см недостаточен (15%). Особенно мало активной влаги внутри агрегатов солонца.

Среднее место по качеству пор занимает подзолистая почва. Здесь, как и в солонце, низки общая порозность и порозность агрегата, особенно в иллювиальном горизонте. В нижних горизонтах значителен объем неактивных пор. Но в подзолистой почве лучшими величинами, нежели в солонце, представлены поры аэрации, которые в горизонтах A_1 и A_2 частично пронизывают и самые агрегаты.

С агрономической точки зрения важно, чтобы почвы обладали наименьшей порозностью связанной



Рис. 45. Шлифы агрегатов из различных горизонтов светлокаштановой солонцеватой тяжелосуглинистой иловато-пылевой почвы. Стерня пшеницы. Видимая в микроскоп порозность (шлифы и фото А. И. Мосоловой)

воды, наибольшей порозностью капиллярного обводнения и одновременно имели бы порозность аэрации межагрегатную не менее 20% от $P_{общ}$.

Все означенное обусловит хорошую водопроницаемость почвы, широкий диапазон в ней активной влаги при одновременно благоприятных условиях аэрации.

В последние годы наряду с фиксажным методом определения общей порозности агрегата (см. выше стр. 183 и др.) для изучения характера внутриагрегатных пор интенсивно развивается оптический метод. В лаборатории физики и технологии почв Почвенного института АН СССР вариант этого метода разработан М. Н. Польским. Из агрегата почвы, зафиксированного канифолью или другим фиксатором, готовится шлиф, толщиной около 0,03 мм. Он просматривается в проходящем свете под микроскопом, и видимая порозность микрофотографируется или зарисовывается с помощью рисовального прибора. Учтя видимую порозность планиметром, можно выразить ее в процентах площади шлифа (рис. 44).

Целесообразно в процессе подшлифования шлифа, начиная с толщины его в 0,2—0,1 мм и тоньше (включительно до наименьшей толщины шлифа около 0,03 мм), просматривать шлиф под микроскопом, фиксируя с помощью зарисовки и микрофотографирования конфигурацию и площадь видимых пор. Это позволит составить объемное представление о порах. Конечный шлиф (0,03 мм) следует просмотреть и в поляризованном свете, чтобы выявить минералогический состав твердой фазы почвы.

На рисунке 45 показаны три шлифа из различных горизонтов светлокаштановой солонцеватой тяжелосуглинистой почвы.

На рисунке отчетливо видна разница в строении и порозности агрегатов из различных горизонтов: сильно дифференцированная на микроагрегаты порозность в горизонте $A_{пах}$ постепенно утрачивается в менее гумифицированных глубинных горизонтах, где поры носят в основном характер трещинок, ходов истлевших корней и насекомых.

При изучении почвенных пор следует сочетать различные методы. Это позволит глубже вскрыть генетическую сущность почв и производственную их характеристику.

ЛИТЕРАТУРА

К III и IV главам

Астапов С. В. Мелиоративное почвоведение (практикум). М., Гос. изд. с.-х. лит-ры, 1958 г.

Вадюнина А. Ф., Корчагина З. А. Методы исследования физических свойств почв. М., «Высшая школа», 1961 г.

Дояренко А. Г. Дифференциальная скважность, как показатель почвенной структуры. «Социалистическое зерновое хозяйство», 1941, № 1.

К а ч и н с к и й Н. А. Изучение физических свойств почвы и корневых систем растений. М., Сельхозгиз, 1931.

К а ч и н с к и й Н. А. О структуре почвы, некоторых водных ее свойствах и дифференциальной порозности. «Почвоведение», 1947, № 6, стр. 336—348.

П о л ь с к и й М. Н. К вопросу о порозности почвенных агрегатов. «Почвоведение», 1949, № 4.

П о л ь с к и й М. Н. Об изучении порозности и микроструктуры почвенных агрегатов в полированных шлифах. «Почвоведение», 1952, № 4.

Р ы ж о в С. Н. К определению порозности почвенных агрегатов. Сб.: «Физика почв». Изд. Всес. НИИ удобрений, агротехники и агропочвоведения. Вып. 18, Сельхозгиз, 1937.

Т ю л и н А. Ф. и С к л я р А. И. Пористость почвенных агрегатов и механическое поглощение суспензий в почве. Сб.: «Физика почв в СССР», 1936



УДЕЛЬНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ ПОЧВЫ И ПОВЕРХНОСТНАЯ ПОЧВЕННАЯ ЭНЕРГИЯ

Для понимания всех свойств почвы, описываемых в последующих главах (водных, воздушных, тепловых, электрических и др.), а также протекающих в ней процессов, необходимо уяснить характер поверхности почвы и неразрывно с нею сопряженный характер поверхностной почвенной энергии.

УДЕЛЬНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ ПОЧВЫ

В главе третьей дано понятие об удельной поверхности почвы как о совокупной поверхности почвенных частиц, отнесенной к единице объема или к единице веса почвы в $\text{см}^2/\text{г}$, $\text{см}^2/\text{см}^3$ или в других измерениях. В той же главе показано, что удельная поверхность почвы прогрессивно возрастает по мере дробления вещества. Например, если каменистая отдельность в 1 см^3 имеет удельную поверхность в 6 см^2 , то этот же материал, будучи раздроблен на кубики с ребром в 1 мм , станет обладать удельной поверхностью в $60 \text{ см}^2/\text{см}^3$ и т. д.

Различные по механическому составу почвы, естественно, обладают и различной удельной поверхностью. Если для крупнозернистых песков она измеряется сотыми и десятными долями $\text{м}^2/\text{г}$, то в тяжелых глинистых почвах эта же характеристика увеличивается до десятков $\text{м}^2/\text{г}$ и может превышать $100 \text{ м}^2/\text{г}$.

В соответствии с различной крупностью пор в почве и поверхность ее делят на общую, внутреннюю и внешнюю. Под внешней поверхностью понимают совокупность поверхностей частиц, открывающихся в крупные поры — капиллярные и поры аэрации, а под внутренней — совокупную поверхность интрамицеллярных пор.

ПОВЕРХНОСТНАЯ ПОЧВЕННАЯ ЭНЕРГИЯ

Для раздробления вещества (в том числе твердой фазы почвы) или то же самое — для увеличения его поверхности необходимо затратить определенное количество энергии, которая получает

выражение в поверхностной энергии раздробленного вещества. В общей форме поверхностная энергия дисперсной массы почвы, как и другого дисперсного тела, а также жидкостей, равна произведению совокупной их поверхности на коэффициент поверхностного натяжения.

Познакомимся с характером природы поверхностной энергии твердой фазы почвы.

Так как удельная поверхность почвы, а следовательно, и поверхностная энергия наиболее сильно выражены в самой тонкой по механическому составу части твердой фазы почвы, именно — в илистой и коллоидной ее частях, то и рассмотрение вопроса целесообразно начать с анализа строения коллоидной почвенной мицеллы. Как уже отмечалось, ил (частицы с диаметром < 1 мк), а в его составе коллоиды (частицы с диаметром $< 0,2-0,1$ мк) представлены в почве различными составными частями: горными породами, минералами, органическими кислотами и органо-минеральными соединениями, или гуматами. Минеральные механические элементы могут быть первичного и вторичного происхождения. В первом случае — это продукты прогрессивного дробления в процессе выветривания различных частей горной породы. Во втором случае (а он иногда превалирует) — минералы (почвенные «глинные минералы») представляют собою синтез различных частей горной породы, перешедших в раствор (истинный или коллоидный) в процессе выветривания и выпавших из него новым продуктом в результате взаимодействия друг с другом и с иными компонентами почвенного раствора. По структуре вторичные минералы могут быть кристаллические и аморфные. Таковы гидрослюда и минералы монтмориллонитовой группы, каолинит, гетит, гиббсит, кварц, несиликатные аморфные полуторные окислы и др. (см. табл. 1). Состав их, по сравнению с более крупными механическими элементами, характеризуется повышенным содержанием полуторных окислов (R_2O_3), Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , P_2O_5 и пониженным содержанием SiO_2 (см. табл. 2).

Возникновение электрических зарядов на частицах почвы

Еще Коэн (Е. Коehnе, 1894) установил, что при взаимодействии твердой и жидкой фаз в системе возникают электрические силы. В этом процессе фаза, обладающая большей диэлектрической постоянной, получает положительный заряд, а фаза с меньшей диэлектрической постоянной заряжается отрицательно. Например, стекло с диэлектрической постоянной 4,7, будучи погружено в воду (с диэлектрической постоянной 81), заряжается отрицательно. Оно же, контактируя с бензолом (диэлектрическая постоянная его 2,3), получает положительный заряд.

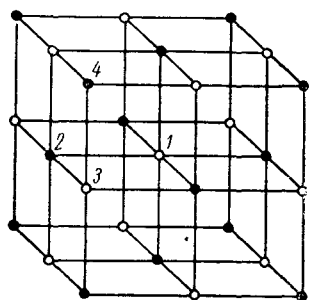
Диэлектрическая постоянная различных компонентов твердой фазы почвы намного ниже, нежели диэлектрическая постоянная

свободной воды, поэтому во влажной почве суммарный заряд твердой фазы всегда будет отрицательным, а в жидкой фазе — положительным. Но это лишь общая (суммарная), приближенная закономерность. В дифференцированном виде различные компоненты твердой фазы и раствора несут и положительные, и отрицательные заряды. Это зависит от особенностей силового слоя, возникающего на поверхности твердых частиц почвы и ионов диссоциировавших электролитов.

Гельмгольц (Helmholtz, 1879) и Гуи (Guy Emschwiller, 1910) впервые создали представление о двойном электрическом слое из зарядов противоположного знака, образующемся в растворе вокруг коллоидных частиц. Это — своеобразная ионная атмосфера коллоидной частицы, толщина которой примерно такая же, как и у ионов в истинных растворах сильных электролитов.

Строение коллоидной мицеллы

Для уяснения генезиса силового слоя, которым обладают все механические элементы на их поверхности, но который наиболее отчетливо проявляется в илах, а в их составе — в коллоидах, воспользуемся простой схемой Вигнера (1929, 1931) на примере строения кристалла бромистого серебра. Это соединение (AgBr) кристаллизуется по типу куба (рис. 46).



Кристаллическая решетка

- Ионы Ag^+
- Ионы Br^-

Рис. 46. Схема строения кристалла бромистого серебра

Атомы, его составляющие, — одновалентны и в ионизированном состоянии несут электрический заряд, равный $4,77 \cdot 10^{-10}$ электростатических единиц. В кристалле всякий атом, расположенный внутри кристаллической решетки (рис. 46, 1), взаимодействует с шестью другими атомами той же решетки. В результате такого взаимодействия он полностью уравнивает свою атомную энергию и находится в состоянии покоя. Иное положение занимают атомы, расположенные на гранях, ребрах и вершинах углов той же кристаллической

решетки. Атом 2 (на плоскости) и ему подобные взаимодействует лишь с пятью соседними атомами; атом 3 (на ребре) — с четырьмя, а атом 4 (на вершине угла) — лишь с тремя соседними атомами. Таким образом, валентность этих атомов не исчерпана полностью (осталась свободной) для атома 2 и ему подобных — на $1/6$, для атома 3 и ему подобных — на $2/6$ и для атома 4 — на $3/6$. Эти остаточные валентности обуславливают возникновение силового слоя кристалла (то же коллоидной мицеллы), в силу

чего он может химически взаимодействовать с ионами Ag^+ , Br^- и другими, находящимися в растворе интрамицеллярной жидкости, и таким образом достраивать кристаллическую решетку. Если кристалл притягивает из раствора равное количество катионов и анионов (в данном случае Ag и Br), то будет наблюдаться лишь рост его. Однако в растворе, в почве могут создаваться такие условия, когда кристалл или коллоидная частица поглощает из раствора избирательно преимущественно катионы или анионы и в таком случае получает положительный или отрицательный заряды. Лучше закрепляются на частице те ионы, которые, взаимодействуя с ее поверхностным силовым слоем, образуют труднорастворимые соединения. Так, если кристалл бромистого серебра будет окружен в растворе ионами Ag^+ и NO_3^- , то поглощаться будет Ag^+ . При наличии в растворе ионов Br^- и K^+ будет поглощаться Br^- . В обоих этих случаях на поверхности кристалла образуется плохо растворимое соединение AgBr . В конечном результате на поверхности частицы образуется слой анионов или катионов, закрепленных частицей в силу остаточных валентностей в ее силовом слое. При этом очевидно, что химическая активность поверхности кристалла (частицы) будет неоднородна: наибольшее напряжение ее будет на вершинах углов и в поврежденных местах кристаллической решетки, над которыми, по Вигнеру, располагается рой ионов (Iopenschwamm), меньшей она будет на ребрах граней и еще меньшей на их плоскостях.

Вновь присоединенные ионы расходуют на взаимодействие с частицей лишь часть своей электрической энергии. В рассмотренном нами случае с кристаллом AgBr этот расход для отдельных ионов в зависимости от места их взаимодействия с частицей будет колебаться от $\frac{1}{6}$ до $\frac{3}{6}$ их заряда, равного $4,77 \cdot 10^{-10}$ электростатических единиц. Таким образом, ионы, закрепленные на частице в силу остаточных валентностей на ее поверхности, сохраняют большую часть своих зарядов и сообщают заряд частице: отрицательный, если на ее поверхности закрепились анионы, или положительный, если закрепленными ионами оказались катионы. Это будет внутренняя «обкладка» частицы, внутренний электрический ее слой, или потенциал определяющий слой ионов, вместе с которым частицу называют гранулой или (по Вигнеру) «мицелловым ионом». В зависимости от знака зарядов в потенциал определяющем слое, различают мицелловые катионы (при положительном заряде) и мицелловые анионы, если ионы внутреннего слоя заряжены отрицательно.

В силу различия и разноименности зарядов частицы вместе с закрепленным на ней внутренним слоем ионов и интрамицеллярной жидкости, при отсутствии их взаимного перемещения, возникает разность потенциалов: это будет общий, электрохимический, или термодинамический потенциал (потенциал Нернста)— E . Чем больше ионов будет при-

соединено к частице и чем выше их валентность, тем большим термодинамическим потенциалом будет обладать частица.

Обладая высоким потенциалом, коллоидная частица не может существовать в растворе в таком виде. Она будет притягивать к себе из раствора и закреплять электростатически близ своей поверхности противоположно заряженные ионы (противоионы), которые по мере их накопления будут постепенно компенсировать ее заряд. Это будут к о м п е н с и р у ю щ и е и о н ы. Они образуют внешний электрический слой. Степень связи компенсирующих ионов с коллоидной частицей неодинакова. Естественно, что наиболее сильно будут закреплены противоионы, взаимодействующие непосредственно с ионами внутренней обкладки. Здесь образуется неподвижный слой противоионов, который передвигается вместе с частицей. Сверх него располагается диффузный слой компенсирующих ионов. По мере удаления их от заряженной поверхности электростатическая связь ионов с поверхностью частицы будет ослабевать. На некотором расстоянии от поверхности частицы сила электростатического закрепления компенсирующих ионов оказывается недостаточной, чтобы преодолеть кинетическую энергию ионов, на расположение которых оказывают влияние не только силы электрического поля самого двойного слоя, но и молекулярное тепловое движение. В этом случае ионы раствора могут вырываться из диффузного слоя и поступать в окружающий раствор. Скачок потенциала между той частью жидкости, которая непосредственно связана с поверхностью частицы и движется вместе с нею и всей остальной дисперсионной средой носит название электрокинетического или дзета (ζ)-потенциала. Величина его для коллоидных частиц в зависимости от их минералогического состава и характера противоионов варьирует, примерно от 20 до 90 милливольт (Н. И. Горбунов, С. Н. Алешин и др.).

Как явствует из вышесказанного, дзета-потенциал (ζ) составляет лишь часть общего термодинамического или электрохимического потенциала (потенциала Нернста) и поэтому всегда меньше его. Чем больше компенсирующих ионов электростатически удерживает частица и чем выше атомность компенсирующих ионов, тем, естественно, меньше будет дзета-потенциал. В литературе описаны также случаи, когда величина его падала до нуля или даже получала обратный по отношению к коллоидной частице знак.

Электрокинетический потенциал имеет большое значение для решения вопроса об устойчивости коллоидных систем. Он определяет свободную (не компенсированную) часть заряда коллоидной частицы, а потому играет существенную роль в вопросе коагуляции коллоидов.

На рисунке 47 приведена схема строения коллоидной частицы и взаимодействие ее с дисперсионной средой. Частица с двойным электрическим слоем получила название м и ц е л л ы. Мицелла

включает в себя, следуя от центра к периферии: а) ядро; б) внутреннюю электрическую обкладку или потенциал определяющий слой ионов, сообщающий электрический заряд мицелле; в) неподвижный слой компенсирующих ионов, или противоионов; г) диффузный слой компенсирующих ионов.

Ядро с потенциал определяющим слоем ионов носит название **г р а н у л ы**. Гранула плюс неподвижно закрепленный слой противоионов составляют **ч а с т и ц у**.

На схеме Н. И. Горбунова для наглядности изображения составных частей коллоидной мицеллы ей придана шарообразная форма. В действительности коллоидные частицы имеют самый разнообразный вид и чаще всего носят характер пластинок, дисков, палочек, иголок.

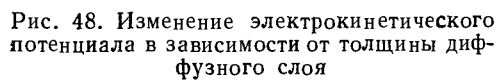
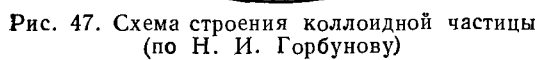
В соответствии с этим, как показали исследования Гуи, О. Штерна и Мюллера, структура расположения внешних слоев ионов более сложна, нежели в схеме Горбунова. Она представляется в виде роя или облачка ионов (*Schwarme oder Wolken*).

Прочность связей в мицелле падает от ядра к периферии диффузного слоя. Внутри ядра в полную меру проявляются атомные связи. Периферический слой ионов кристаллической решетки, как с внутренними ее слоями, так и с потенциал определяющим слоем ионов связан лишь частью валентностей. Внутренняя электрическая обкладка мицеллы удерживает слой противоионов электростатическими силами; при этом напряжение электрического поля в диффузном слое и количество зарядов по мере удаления от заряженной поверхности убывает (по статическому закону Больцмана), пока не достигнет порога, где проявляется электрокинетический потенциал (ζ). На рисунке 48 схематически показано соотношение общего (термодинамического) (E) и дзета (ζ)-потенциалов *.

Ионы потенциал определяющего слоя в мицелле прочно закреплены на ее ядре силами остаточных валентностей и не обладают способностью обмена с ионами почвенного раствора. Ионы внешнего электрического слоя мицеллы (противоионы), взаимодействуя с окружающим их почвенным раствором, могут обмениваться в эквивалентных количествах на ионы солевого раствора того же

* Характер и величину заряда частиц, а также ζ -потенциал можно измерить при наблюдении так называемых электрокинетических явлений. Сущность этих явлений заключается в возникновении электродвижущей силы при относительном смещении фаз коллоидной системы или же в передвижении этих фаз под влиянием электродвижущей силы, приложенной извне. Когда под влиянием внешней э. д. с. происходит движение дисперсной фазы относительно дисперсионной среды, имеет место **п о т е н ц и а л с е д и м е н т а ц и и** и **э л е к т р о ф о р е з**. Если же применение той же силы вызывает перемещение жидкости относительно твердого тела, э. д. с. носит название **п о т е н ц и а л а** **п р о т е к а н и я**, а сам процесс—**э л е к т р о о с м о с а**.

Явления электрофореза и электроосмоса открыты русским ученым Ф. Ф. Рейссом в 1808 г.



заряда. В случае отрицательно заряженной коллоидной частицы это будут обменные катионы, или поглощенные основания.

Выше мы описали возникновение электрических зарядов на коллоидных частицах в результате избирательной адсорбции ионов из окружающего раствора и закрепления их на своей поверхности силами остаточных валентностей.

Однако заряд частиц может возникать не только этим путем, но и вследствие диссоциации молекул, образующих частицу, в поверхностном ее слое (Mattson S., 1938). Таким примером может быть мицелла кремнекислоты в щелочной среде (рис. 49, 1). Ядро мицеллы представлено $n\text{SiO}_2$. В периферическом слое частицы будет

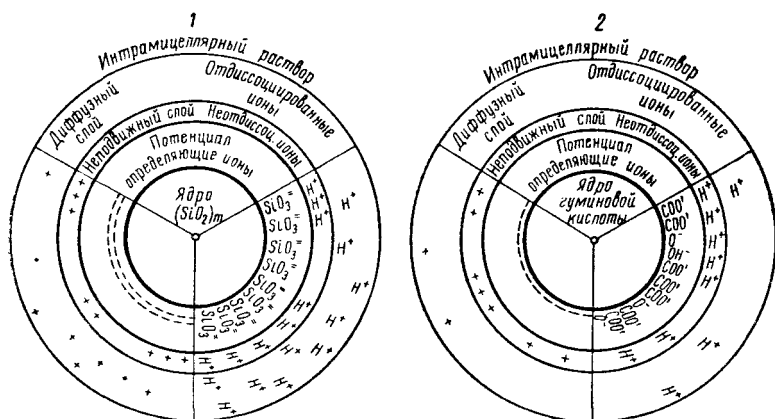


Рис. 49. Схема строения мицелл кремнекислоты в щелочной среде (1) и гуминовой кислоты (2)

наблюдаться гидратация SiO_2 с образованием метакремневой кислоты: $\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SiO}_3$. Частичная диссоциация этой кислоты на ионы SiO_3^- и 2H^+ с отдиссоциацией ионов H^+ в щелочной раствор, в котором доминируют OH^- , приводит к формированию мицеллы кремнекислоты. Она состоит из ядра ($n\text{SiO}_2$), внутреннего электрического слоя с потенциал определяющими ионами (SiO_3^-), неподвижного слоя неотдиссоциированных ионов (H^+) и диффузного слоя из отдиссоциированных ионов водорода (H^+).

Аналогичное возникновение мицеллы возможно и для других коллоидов в почве, например для гуминовой кислоты, которая, как и кремнекислота, в условиях преобладающих в почве pH, отличается ясно выраженными кислотными свойствами (рис. 49, 2).

Амфотерные коллоиды или амфолитоиды

В предыдущем разделе мы отмечали, что заряд коллоидных частиц в растворе может возникать в результате двух процессов:

а) адсорбции частицей ионов определенного знака из дисперсионной среды и б) диссоциации молекул, образующих частицу, и отдиссоциации частицей одного из ионов в интрамицеллярную жидкость. Второй из этих двух процессов наиболее подробно исследован шведским почвоведом-коллоидником С. Маттсоном. Он рассматривает коллоидную мицеллу как коллоидный агрегат, на поверхности которого располагаются ионогенные (рождающие ионы) группы. Отдиссоциируя катионы или анионы в раствор, эти группы обуславливают положительный или отрицательный заряд частиц или их микроагрегата и формирование коллоидной мицеллы со всеми ее частями и свойствами, представленными на рисунках 46, 48, 49. Как показали другие исследования, данная теория С. Маттсона наиболее приложима к коллоидам, имеющим аморфное строение, а также к кристаллическим коллоидам, на поверхности которых адсорбирован аморфный коллоидный ионогенный слой.

Особое внимание Маттсон уделяет коллоидам, способным перезаряжаться (менять свой электрический заряд) в зависимости от реакции среды; такие коллоиды получили название амфотерных коллоидов, или амфолитоидов. Типичными амфолитоидами в почвах являются гидраты окисей железа и алюминия ($\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{Al}(\text{OH})_3$), а также органические соединения — протеины. Названные соединения, в зависимости от реакции среды, ведут себя то как б а з о и д ы (щелочеподобны), то как а ц и д о и д ы (кислотоподобны). Например, в кислой среде, где превалируют в растворе ионы H^+ , гидроокись алюминия будет вести себя как базонид, и диссоциировать по уравнению $\text{Al}(\text{OH})_3 \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_2^+ + \text{OH}^-$, сообщая коллоидной частице положительный заряд. Та же гидроокись в щелочной среде, в которой доминирует OH^- ион, будет вести себя, как ацидоид и отдиссоциировать в растворе водородный ион по уравнению $\text{Al}(\text{OH})_3 \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_2\text{O}^- + \text{H}^+$, что обусловит отрицательный заряд коллоидной частицы. Характер диссоциации здесь следует химическому правилу, по которому два соединения, дающие при диссоциации один общий ион, взаимно подавляют диссоциацию друг друга.

В кислой среде (уравнение первое) отдиссоциация иона водорода подавлена уже наличным превалированием этого иона в растворе, так же как в щелочной среде подавлена отдиссоциация глиноземом гидроксильного иона ввиду превалирования этого иона в дисперсионной среде.

Амфотерные свойства протеинов связаны с наличием в них карбоксильных групп ($-\text{COOH}$), обуславливающих кислотные свойства, и амино-групп ($-\text{NH}_2$), носителей базонидных свойств. В зависимости от природы аминокислот, из которых построены цепи полипептидов, в коллоидах протеинов превалирует ацидоидный или базонидный характер.

Поскольку амфотерные коллоиды меняют свой заряд при переходе от щелочной реакции среды к кислой, и наоборот, то очевид-

но, что должна существовать переходная зона реакции, при которой и положительный, и отрицательный заряды частиц, обусловленные отдиссоциацией в раствор противоположно заряженных ионов, будут уравниваться. Коллоидная частица в такой зоне (точнее — в такой точке) переходной реакции станет электронейтральной: это будет изоэлектрическое состояние коллоидов, при котором электрокинетический потенциал частиц равен нулю ($\zeta = 0$). Различные амфолитоиды достигают изоэлектрического состояния при различной величине рН среды. Так изоэлектрическая точка гидроокиси железа лежит при рН 7,1, глинозема ($\text{Al}(\text{OH})_3$) при рН 8,1, различных протеинов при рН между 4 и 12*.

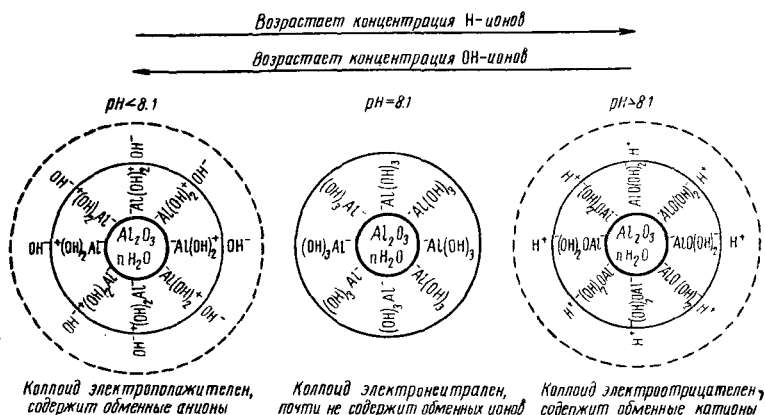


Рис. 50. Поведение амфотерного коллоида в зависимости от реакции среды

На рисунке 50 представлен схематично (по Маттсону) процесс перерастания, в зависимости от реакции среды, базоидных свойств гидроокиси алюминия в ацидоидные.

Амфотерные коллоиды — слабые кислоты и основания. Это обусловлено незначительной степенью диссоциации их в растворе. По расчетам Маттсона, коллоидная частица с эффективным радиусом 44,5 мкм, на поверхности которой может поместиться 505 208 катионов, способных к обмену, судя по величине электрокинетического потенциала в растворе около 70 мв, должна была отдиссоциировать в растворе лишь 857 ионов, т. е. 0,17% их общего числа. Этот теоретический расчет Маттсона, в общем, подтвержден экспериментально Маршаллом (1948). Применяя мембранные электроды для измерения активности катионов вблизи глинистых частиц, он

* Изоэлектрическое состояние коллоидов обнаруживается катафоретическим путем нахождения величины рН, при которой коллоидный раствор, помещенный в поле электрического тока, не обнаруживает передвижения коллоидных частиц к аноду или катоду.

нашел, что у монтмориллонитовых глин отдиссоциируют в диффузный слой только около 0,1 ионов кальция и натрия.

Амфотерные коллоиды в почвенном растворе могут взаимодействовать с другими противоположно заряженными коллоидальными частицами и ионами диссоциировавших электролитов, образуя многочисленные варианты сложных амфолитоидов и солоидов (солеобразных соединений с катионами и анионами солевых растворов).

Среди амфотерных коллоидов в почвах обычно преобладают ацидоидные группы соединений над базоидами. При образовании сложных амфолитоидов группа коллоидов, реагирующих базой, обычно бывает полностью исчерпана, в то время как ацидоиды остаются в избытке (в растворе). Этот факт полностью согласуется с наличием общего отрицательного заряда твердой фазы почвы при взаимодействии ее с водой, о чем говорилось в начале настоящей главы.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ ПОЧВЫ

Почва — среда полидисперсная и гетерогенная. Твердая фаза ее состоит из механических элементов разной величины, разной формы и различного химического и минералогического состава. Все это крайне затрудняет определение совокупной поверхности почвенных частиц.

По сути дела ни почвоведение, ни коллоидная химия не располагают точными методами для означенной цели. Во всех методах, применяемых для определения удельной поверхности почвы, делается тот или иной допуск, упрощающий задачу, и лишь с принятием его во внимание задача решается. Например, при геометрическом методе учета поверхности принимается в расчет эффективный диаметр или радиус механических элементов почвы и соответственно делается допуск о шарообразной их форме. В методе определения удельной поверхности по величине сорбции почвой водяного пара допускается, что на определенной стадии сорбции все почвенные частички, вне зависимости от их величины, формы и состава, покрываются слоем водных молекул — мономолекулярным или полимолекулярным — одной и той же мощности. При учете поверхности почвы по теплоте ее смачивания принимается, что вся теплота смачивания выделяется почвой при адсорбции ею мономолекулярного слоя диполей воды и т. д. Все эти допуски весьма условны. Упрощая задачу, они в то же время привносят в нее большее или меньшее искажение фактов. А потому и величины удельной поверхности почвы, определяемые при наличии этих допусков, получаются весьма приблизительные. Здесь можно говорить лишь о сравнительном порядке величин, а не об абсолютной их точности.

Иначе стоит вопрос об учете поверхностной почвенной энергии.

Она может быть достаточно точно учтена в эргах, джоулях или в калориях; например, теплота смачивания почвы — в калориях на грамм вещества или в джоулях, учитывая, что механическим эквивалентом 1 кал является количество работы, равное 4,185 дж.

Для определения удельной поверхности почвы пользуются прямыми и (чаще) косвенными методами. Здесь мы коснемся лишь некоторых наиболее распространенных методов, приложимых к почве, причем, как и в предыдущих главах, сосредоточим внимание на принципах, полагаемых в основу методов, а не на технике их выполнения*.

Визуальный микроскопический метод определения поверхности механических элементов

Метод основан на допуске, что среднее значение площади проекции на плоскости частиц любой формы при различной их ориентации составляет 0,5 их поверхности, а при отсутствии углов, входящих в проекцию, — 0,25 поверхности. Поместив на предметное стекло микроскопа X частиц, снимаем несколько микрофотограмм при различной ориентации частиц. Полученные микрофотограммы проектируются на лист бумаги с определенным линейным увеличением, и планиметром снимается площадь проекций частиц. Учитывая принятое увеличение микрофотограмм, рассчитывают среднюю площадь проекций каждой частицы и среднюю площадь для всех частиц. Если проекции не имели входящих углов, для вычисления поверхности частицы принимается коэффициент 0,25. Скажем, в среднем площадь проекции частицы равна $3 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^2$, значит поверхность частицы будет равна $3 \cdot 10^{-2} \cdot 4 = 12 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^2$.

Метод приложим к частицам, имеющим гладкую внешнюю поверхность и ничтожно малую внутреннюю поверхность.

По мере усовершенствования техники микроскопирования и особенно после изобретения электронного микроскопа было сделано много попыток определить оптическим путем не только внешнюю, но и внутреннюю поверхность почвы (F. Krczil, Б. В. Ильин и А. В. Киселев, W. W. Ewing и др.), однако положительные результаты были достигнуты лишь в отношении кристаллических «непористых» порошков. Что касается тонкопористых адсорбентов, то даже с использованием электронного микроскопа подсчитать их внутреннюю поверхность не представляется возможным**.

* Техника определения различных характеристик почвы и других дисперсных тел излагается в ряде методических руководств. См. например: Н. А. Качинский. Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения, 1958 г.; А. Ф. Вадюнина и З. А. Корчагина. Методы исследования физических свойств почв и грунтов. 1961 г.; И. Н. Путилова. Руководство к практическим занятиям по коллоидной химии, 1962 г., и др.

** А. В. Киселев. Новые адсорбционные методы определения поверхности адсорбентов. «Успехи химии», т. XIV, вып. 5, 1945.

Геометрический метод расчета удельной поверхности почвы

Для расчета удельной поверхности почвы по геометрическому методу необходимы механический состав почвы с разделением ее на фракции и удельный вес твердой фазы почвы. Удельная поверхность рассчитывается для каждой фракции порознь, а затем для всего образца почвы в целом с учетом содержания в нем каждой отдельной фракции в %. Для каждой фракции механических элементов принимается в расчет средний эффективный ее диаметр и радиус. Например, для фракции 0,25—0,05 мм средний диаметр равен $\frac{0,25+0,05}{2} = 0,15$ мм; для фракции 0,05—0,01 мм средний диаметр равен $\frac{0,05+0,01}{2} = 0,03$ мм и т. д. Расчет объема и по-

верхности средней отдельной частицы в каждой фракции производится для шарообразной сферы, с принятием во внимание эффективного радиуса частиц, по общеизвестным формулам (для объема шара — $\frac{4}{3} \pi R^3$; для поверхности шара $4\pi R^2$). Удельная поверхность твердой фазы почвы может быть рассчитана на 1 г или на 1 см³; чаще расчет ведется в см² или м² на 1 г твердой фазы.

Зная объем средней по величине частицы в каждой фракции (V) и ее удельный вес (d) находим вес частицы Vd в г, а затем количество этих частиц в 1 г почвы: $\frac{1}{Vd}$. Наконец, зная количество частиц данной фракции в 1 г почвы и поверхность каждой частицы, находим совокупную поверхность всех частиц в 1 г, или удельную (весовую) поверхность твердой фазы почвы для данной фракции механических элементов.

Вычислив удельную поверхность для каждой фракции и зная процентное содержание отдельных фракций в анализируемом образце почвы, рассчитываем (по тройному правилу) удельную поверхность образца почвы в целом.

Пусть удельная поверхность отдельных фракций будет: $p_1, p_2, p_3 \dots p_x$ см²/г.

Процентное содержание тех же фракций в почве составляет: p_1 —5%, p_2 —10%, p_3 —20% ... p_x — y %, тогда удельная поверхность почвы:

$$P_{уд} = \frac{5p_1 + 10p_2 + 20p_3 + \dots + yp_x}{100} \text{ см}^2/\text{г}. \quad (46)$$

В таблице 37 приводится образец расчета удельной поверхности твердой фазы почвы по механическому ее составу, произведенный П. В. Вершининым *. Из таблицы следует, что проанализированная П. В. Вершининым глинистая почва обладала удельной поверхностью 28 м²/г.

* Сб.: «Основы агрофизики». Ч. II. М., 1959, стр. 224—225.

Удельная поверхность почвы, рассчитанная по результатам механического анализа

Диаметр частиц, см	Средний диаметр частиц, см	Объем частиц, см ³	Вес частиц, г, при удельном весе=2,65 г/см ³	Число частиц в 1 г	Поверхность, см ²			Процент данных частиц в механическом анализе
					одной частицы	удельная	данных фракций	
$1 \cdot 10^{-1} - 2,5 \cdot 10^{-2}$	$6,25 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$6,4 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^3$	$2,3 \cdot 10^{-2}$	37,0	1,8	5,0
$2,5 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$3,4 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^2$	15,0	10,0
$5 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-8}$	$7,2 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^7$	$5,4 \cdot 10^{-5}$	$7,6 \cdot 10^2$	$1,5 \cdot 10^2$	20,0
$1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-10}$	$1,1 \cdot 10^{-9}$	$9 \cdot 10^8$	$3,4 \cdot 10^{-6}$	$3,1 \cdot 10^3$	$3,1 \cdot 10^2$	10,0
$5 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-11}$	$7,2 \cdot 10^{-11}$	$1,4 \cdot 10^{10}$	$5,4 \cdot 10^{-7}$	$7,6 \cdot 10^3$	$1,1 \cdot 10^3$	15,0
$1 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-5}$	$7,5 \cdot 10^{-5}$	$4,2 \cdot 10^{-13}$	$1,1 \cdot 10^{-12}$	$9 \cdot 10^{11}$	$3,4 \cdot 10^{-8}$	$3,1 \cdot 10^4$	$4,6 \cdot 10^3$	15,0
$5 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$2,7 \cdot 10^{-14}$	$7,3 \cdot 10^{-14}$	$1,4 \cdot 10^{13}$	$5,4 \cdot 10^{-9}$	$7,6 \cdot 10^4$	$7,6 \cdot 10^3$	10,0
$1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-16}$	$3,4 \cdot 10^{-16}$	$2,9 \cdot 10^{15}$	$1,5 \cdot 10^{-10}$	$4,4 \cdot 10^5$	$4,4 \cdot 10^4$	10,0
$1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-19}$	$3,4 \cdot 10^{-19}$	$2,9 \cdot 10^{18}$	$1,5 \cdot 10^{-12}$	$4,4 \cdot 10^6$	$2,2 \cdot 10^5$	5,0

Геометрический метод расчета удельной поверхности дает более положительные результаты для песков, лишенных коллоидной фракции, и менее положительные для тяжелых почв. Погрешности расчета в тяжелых почвах сопряжены с трудностями и недостаточной точностью учета размеров отдельных фракций коллоидной части почвы. Коллоиды обладают наивысшей в почве удельной поверхностью, а потому всякая неточность в учете их резко повышает ошибку в расчетах.

Для коллоидных частиц задача затруднена и тем, что они обладают поглощающим комплексом, т. е. являются ионными адсорбентами, что весьма осложняет понятие об их поверхности.

Наконец, известная часть ошибок в расчете удельной поверхности почвы геометрическим методом проистекает из того факта, что в расчет принимаются не действительные размеры и формы механических элементов, а гидравлически равноценные им воображаемые сферические частицы.

Расчет удельной поверхности и поверхностной энергии почвы по сорбции и адсорбции ею паров воды*

В силу поверхностной энергии почвы она адсорбирует на своей поверхности пары воды и различные газы. Закономерна попытка по количеству адсорбированной воды или газа рассчитать удельную поверхность почвы.

Метод Митчерлиха для определения общей, внешней и внутренней (или мицеллярной) удельной поверхности почвы.** Общую удельную поверхность почвы Митчерлих предложил определять по максимальной ее гигроскопичности (W_H). Под максимальной гигроскопичностью, как известно, понимается наибольшее количество воды, которую почва может сорбировать на своей поверхности из атмосферы, насыщенной парами на 94—100% ***.

* Процесс физической адсорбции и сорбции паров воды и газов твердыми адсорбентами (в нашем случае почвой), в зависимости от свойств адсорбента и адсорбируемого пара или газа, а также от условий адсорбции (давление пара, газа, температура) весьма многообразен. В этой главе мы коснемся лишь частных случаев изотерм адсорбции, наиболее часто встречающихся в почвенной аналитической практике. Подробное изложение теории этого вопроса и анализ обширного фактического материала см. в кн.: Стефан Брунауэр. «Адсорбция газов и паров» и в «Добавлениях» к ней: т. I «Физическая адсорбция», М., ИЛ., 1948.

** Mitscherlich E. A. *Bodenkunde für Land- und Forstwirte*, Berlin, 1923. *Bodenkunde für Landwirte, Forstwirte und Gärtner*. Berlin u. Hamburg, 1954.

*** Насыщение почвы парами воды до максимальной гигроскопичности производится в эксикаторе в условиях вакуума над 10-процентной H_2SO_4 или над насыщенным раствором K_2SO_4 . Технику определения см. в работах: Н. А. Качинский. Изучение физических свойств почвы и корневых систем растений. М., 1931, или А. Ф. Вадюнина и З. А. Корчагина. Методы исследования физических свойств почв и грунтов. М., «Высшая школа», 1961.

Митчерлих принимает по Эренбергу (Ehrenberg P.), что при максимальной гигроскопичности все почвенные частички одеваются пленкой воды толщиной в 10 слоев водных молекул. Если взять частицу почвы призматической или кубической формы, разрезать мысленно окружающую ее водную пленку плоскостями по ребрам (перпендикулярно к толщине пленки) и развернуть ее, то получим серию призм, сумма оснований которых будет равна поверхности почвенной частицы, а толщина пленки в 10 водных молекул окажется высотой призм. Деля объем водных пленок на их высоту, получим площади оснований призм, сумма которых составит поверхность почвенной частицы. Диаметр молекулы воды Митчерлих принимает по Нернсту — 0,25 м.к. Дальнейший расчет следует так. Пусть W_H почвы = $x\%$; тогда воды в 1 г будет $\frac{x}{100}$ г или $\frac{x}{100}$ см³ (это объем водной пленки в 1 г воды). Чтобы найти удельную поверхность почвы, нужно объем пленки разделить на ее высоту:

$$\frac{x}{100} : \frac{25 \cdot 10}{100 \cdot 1000 \cdot 000 \cdot 10} = 40 \, 000 x \text{ см}^2 = 4 x \text{ м}^2,$$

т. е. общая удельная поверхность почвы в м² численно равна весовому % максимальной гигроскопичности почвы (x), помноженному на коэффициент 4. Скажем, при максимальной гигроскопичности почвы $W_H = 10\%$, удельная поверхность ее будет $P_{уд} = 10 \cdot 4 = 40 \text{ м}^2/\text{г}$, или в общей форме:

$$P_{уд} = W_{м. г.} \cdot 4 \text{ м}^2. \quad (47)$$

Для определения внешней удельной поверхности почвы Митчерлих предлагает насыщать почвы парами бензола.

Предполагается, что молекулы бензола более крупные, чем молекулы воды, будут оседать на внешней поверхности почвы, не проникая внутрь мицеллярных пор глины и особенно органических соединений почвы, которые «подобно губке, пронизаны большим количеством пор, благодаря чему внутренняя поверхность их особенно велика... при сравнительно небольшой внешней поверхности» *.

Так как бензол не смешивается с водой, то почва перед насыщением ее парами бензола должна быть предварительно обезвожена. Для этого на дно эксикатора, в котором в условиях вакуума производится насыщение почвы парами бензола, насыпается тонким слоем фосфорной ангидрид (Р₂О₅). Источником паров бензола в эксикаторе является помещенная в особый кристаллизатор смесь 50 г прованского масла с 10 г бензола (рис. 51). Как и при определении максимальной гигроскопичности, насыщение навески почвы продолжается до постоянного веса. Количество поглощенного бензола вычисляется в % к абсолютно сухой навеске почвы. Принимая

* Mitscherlich E. A. Bodenkunde für Land — und Forstwiste, Berlin, 1923, S. 76.

во внимание плотность бензола (0,8794) и «меньшую силу сцепления с твердыми частицами», для сравнения количества адсорбированного бензола с количеством воды в почве при максимальной ее гигроскопичности Митчерлих предлагает коэффициент перехода 4,4. Умножая процент адсорбированного почвой бензола на 4,4, мы как бы выражаем степень адсорбции его в единицах воды и можем рассчитать по ней внешнюю поверхность почвы.

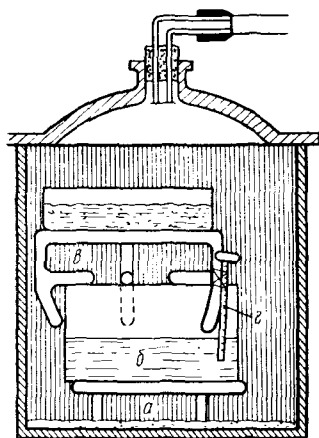


Рис. 51. Определение «внешней» поверхности почвы (по Митчерлиху):

а — слой фосфорного ангидрида; б — смесь прованского масла и бензола; в — треножник с манометром (з), на котором в кристаллизаторе помещается абсолютно сухая почва

Зная общую и внешнюю удельную поверхность почвы в m^2/g и вычитая из первой величины вторую, находим величину внутренней удельной поверхности почвы в m^2/g .

Метод Митчерлиха определения общей, внешней и внутренней (интрамицеллярной и мицеллярной) удельной поверхности почвы подкупает своей простотой*. Однако в нем сделано несколько допущений, делающих получаемые по этому методу результаты весьма условными. Во-первых, допущение того, что при максимальной гигроскопичности почвы все механические элементы в ней покрываются слоем воды толщиной в 10 водных молекул, противоречит нашему представлению о почве как среде полидисперсной и гетерогенной. Таким допущением отрицается зависимость интенсивности и предела адсорбции паров воды почвой от размера, формы, химического и минералогического состава механических элементов, что не согласуется с фактами (см. стр. 124—125). В современном понимании не только различные по размерам, форме и составу механические элементы обладают различной поверхностной энергией, но, как это следует из учения о кристаллическом строении минералов и коллоидной почвенной мицеллы, в пределах одной и той же частицы энергетическое состояние ее поверхности различно на плоских участках, на ребрах, на вершинах углов, на остриях, образующихся в результате излома или дробления минерала. Следует также учитывать, что при степени насыщения почвы парами воды, приближающейся к максимальной гигроскопичности, процесс адсорбции паров перерастает в процесс сорбции, когда наряду с адсорбцией пара почвой вступает в силу и процесс капиллярной

* Этот метод нашел одобрение и в некоторых исследованиях советских почвоведов. См.: В. В. К в а с н и к о в. Константа максимального микромицеллярного объема почвы. Зап. Воронеж. с-х. ин-та. Том I (XVI). Воронеж, 1935.

конденсации, обусловленный различной упругостью пара над вогнутой, плоской и выпуклой поверхностями водных оболочек согласно уравнению Томсона (лорда Кельвина) *.

Поэтому водная оболочка, одевающая коллоидную почвенную частицу при максимальной ее гигроскопичности будет носить более или менее различный характер на отдельных участках ее поверх-

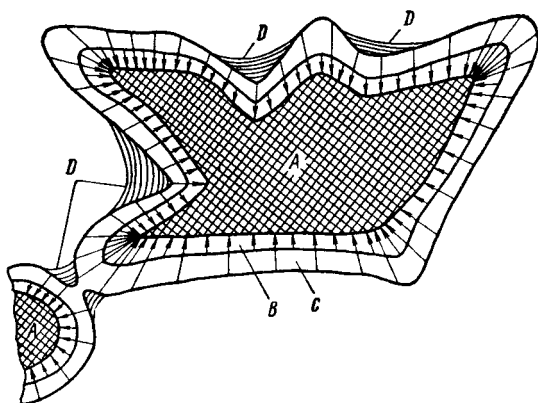


Рис. 52. Сорбция воды почвой (по Н. А. Качинскому):

А — почвенная частица; В — слои прочно связанной, строго ориентированной воды; С — слои рыхлосвязанной, слабо ориентированной воды; D — вода капиллярной конденсации

ности, осложненный к тому же микрizonaми капиллярной конденсации, как это схематично показано на рисунке 52.

При этом мощность адсорбированной на поверхности почвы пленки прочно связанной воды в зависимости от размеров, формы и состава механических элементов, по материалам различных исследователей, может варьировать от единиц до сотен и тысяч слоев

* Уравнение Томсона (Thomson U.) имеет вид:

$$\ln \frac{P_0}{P} = \frac{2\sigma M}{prRT}, \quad (48)$$

где P_0 и P — упругость насыщенного пара, соответственно над плоской поверхностью и над вогнутым мениском при температуре T ; σ — коэффициент поверхностного натяжения; M — молекулярный вес жидкости; p — ее плотность; R — универсальная газовая постоянная; r — средний радиус кривизны поверхности, связанной с двумя главными радиусами кривизны r_1 и r_2 уравнением:

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}. \quad (49)$$

Уравнение приложимо к любой сферической поверхности раздела жидкость—газ. Для выпуклой поверхности жидкости r — положительно; для вогнутой — отрицательно. Поэтому для сферической капли $P > P_0$.

водных молекул. Капиллярная конденсация заметно проявляется при радиусах менисков или пор $< 0,5-0,1$ мк.

Второе замечание нужно сделать о методе определения внешней, а значит, и внутренней удельной поверхности почвы. Автору метода (Mitscherlich) был известен факт более слабой адсорбции почвой неполярных жидкостей, как бензин, бензол, толуол, нежели воды. Он связывает это главным образом с тем, что более крупные по размерам, нежели у воды, молекулы инертных неполярных жидкостей не могут проникать в ультрамалые интрамицеллярные и мицеллярные поры почвы. Здесь упускается из вида правило Тарасова, о котором говорилось в главе IV. Согласно этому правилу неполярные жидкости, как бензин, бензол, толуол, ксилол и др., должны во много раз слабее, нежели вода, адсорбироваться почвой, так как диэлектрическая постоянная их (порядка 2—2,3—2,6) значительно меньше, нежели диэлектрическая постоянная воды, равная 81. Неполярные жидкости в совершенстве смачивают гидрофильные материалы, к которым относится и почва, но слабо ими адсорбируются.

Уравнение Лэнгмюра и расчет удельной поверхности почвы по изотерме адсорбции паров воды (по методу БЭТ). Природа адсорбции паров воды почвой давно привлекает внимание почвоведов. Еще в 1902 г. немецкие ученые Родевальд * и Митчерлих **, изучая адсорбцию почвой паров воды и теплоты смачивания, пришли к заключению, что при насыщении почвы парами воды до максимальной гигроскопичности частицы почвы одеваются монослоем молекул воды. Такого же взгляда на этот вопрос придерживались советские почвоведы А. Ф. Лебедев (1912), П. В. Вершинин (1935) и П. И. Андрианов (1936). Эренберг (1918) утверждал, что W_H (максимальная гигроскопичность) соответствует 10 слоям молекул воды ***. G. Backer (1914) установил 5—7 слоев. В более поздних работах Цункера (Zupker H., 1930), Курона (Кигон Н., 1932), Фегелера (Vageler P., 1932), М. М. Филатова (1938), Брунауэра (Brunauer S., 1945) **** возможное количество адсорбированных слоев молекул воды при максимальной гигроскопичности почвы определяется десятками, сотнями и даже тысячами. По нашему мнению, нельзя говорить о стандартном количестве слоев молекул воды, адсорбируемых почвой из атмосферы, насыщенной парами воды, не только для разных почв, но даже для разных частиц одной и той же почвы и даже о стандартной толщине водной пленки вокруг одной и той же частицы. Мощность такой пленки будет варьиро-

* H. Rodewald. Theorie der Hydroskopizität; Landw. Jahrb. 1902, S. 689—691.

** A. Mitscherlich. Zur Methodik der Bestimmung der Benetzungswärme des Ackerbodens; Landw. Jahrb., 1902, S. 578.

*** P. Erenberg. Die Bodenkolloide, Aufl. Dresden — Leipzig, 1918, S. 268—273.

**** Стефан Брунауэр. Адсорбция газов и паров. Т. I. «Физическая адсорбция». М., ИЛ., 1948.

вать от единиц до тысяч слоев водных молекул в зависимости от величины и формы частиц, в зависимости от их химического и минералогического состава. Разногласия по этому вопросу у разных авторов обусловлены различием образцов почвы, подвергшихся исследованию, разными методами получения изотерм адсорбции, недостаточной еще теоретической освещенностью этого вопроса.

До 1914 г. по сути дела не было сколько-нибудь обоснованной теории, объясняющей адсорбцию паров и газов твердыми адсорбентами. Лишь в этом году независимо друг от друга были предложены две теории: Поляни (M. Polanyi, 1914) и Лэнгмюром (I. Langmuir, 1914). Поляни дает физическую трактовку процессу адсорбции и в основу ее кладет Ван-дер-Ваальсовы силы, тогда как, по Лэнгмюру, процесс поглощения паров и газов твердыми сорбентами имеет характер преимущественно хемосорбции. В дальнейшем широкое развитие в изучении обоих видов адсорбции (физической и хемосорбций) получила теория Лэнгмюра.

Процесс адсорбции, по Лэнгмюру, протекает следующим образом. В замкнутом пространстве при определенном давлении пара или газа (в нашем случае паров воды) парообразная или газовая фаза приходит в контакт с адсорбентом (в нашем случае — с почвой). Находящиеся в движении молекулы газа или пара ударяются о поверхность адсорбента. Удары носят двоякий характер: реже — это упругие удары, когда молекулы газовой фазы, ударившись о поверхность адсорбента, мгновенно отскакивают от него без заметного обмена энергией. Чаше наблюдаются неупругие удары молекул. В этом случае они на какое-то время задерживаются на поверхности адсорбента и лишь потом возвращаются в газовую фазу. Процесс задержки молекул газа или пара на поверхности адсорбента, сопровождаемый выделением теплоты адсорбции, и является основой адсорбции. При постоянстве температуры и давления газовой фазы быстро наступает состояние равновесия, когда количество адсорбируемых молекул (μ) и десорбируемых молекул (ν) газа (пара) в единицу времени и на единицу площади становится постоянным. Для данных конкретных условий это будет определенная фаза изотермы адсорбции газа или пара на твердом адсорбенте.

Исходя из изложенных теоретических представлений Лэнгмюр предложил уравнение изотермы адсорбции:

$$\frac{ds}{dt} = \alpha\mu - \nu, \quad (50)$$

где s — число молекул, адсорбированных на 1 см^2 поверхности;
 μ — число молекул, ударяющихся об 1 см^2 поверхности в 1 сек ;
 ν — число молекул, испаряющихся в 1 сек с поверхности в 1 см^2 ;
 α — коэффициент конденсации (отношение числа молекул, конденсирующихся на поверхности, к общему числу молекул, ударяющихся о поверхность);
 t — время.

Так как упругие удары о поверхность адсорбента, о которых говорилось выше, весьма редки, значение α близко к единице.

Когда в системе (адсорбент — газ) наступит равновесие, $\frac{ds}{dt} = 0$, тогда

$$\alpha\mu = \nu \quad (51)$$

Выражение 51 представляет наиболее общую форму уравнения изотермы адсорбции Лэнгмюра. Величина μ для единицы поверхности адсорбента может быть рассчитана из кинетической теории газов по формуле

$$\mu = \frac{P}{(2\pi mKT)^{\frac{1}{2}}}, \quad (52)$$

где m — масса молекулы;

P — давление газа;

T — абсолютная температура;

K — постоянная Больцмана *.

При выводе уравнения Лэнгмюр сделал два допущения. Первое из них заключается в том, что возможность испарения молекул газа (пара) с поверхности адсорбента не зависит от того, свободны или заняты молекулами соседние участки поверхности. Этим допущением как бы исключается взаимодействие адсорбированных молекул между собой, а утверждается лишь их взаимодействие с поверхностью адсорбента.

По второму допущению, адсорбироваться могут лишь те молекулы, которые ударяются в свободные участки поверхности адсорбента. Следствием этих двух допущений является признание по уравнению Лэнгмюра лишь однослойной адсорбции. Частичное обоснование такого утверждения усматривается в малом радиусе действия молекулярных сил: силы валентности убывают экспоненциально с расстоянием между поверхностью и адсорбированным атомом или молекулой; силы Ван-дер-Ваальса убывают обратно пропорционально седьмой степени расстояния между молекулами.

В более поздних работах Лэнгмюр допускает многослойную адсорбцию паров и газов в виде островков на поверхности адсорбента. Он разбирает два возможных случая физической адсорбции. Первый случай, когда взаимодействие адсорбируемых молекул с поверхностью адсорбента больше, нежели взаимодействие молекул газовой фазы между собой. В этом случае на поверхности адсорбента будет формироваться мономолекулярный слой. Образование второго адсорбированного слоя молекул не исключено, но для этого требуется очень большое повышение давления газовой фазы.

* Постоянная Больцмана (Boltzmann L.) равна $(1,38047 \pm 0,00026) \cdot 10^{-16}$ эрг.град⁻¹.

Во втором случае допускается более сильное взаимодействие молекул газовой фазы, нежели взаимодействие этих молекул с поверхностью адсорбента. Это обусловит замедленное формирование мономолекулярного слоя. Он будет образовываться на поверхности адсорбента отдельными островками молекул (glusters), причем в силу большего взаимодействия между молекулами газовой фазы на островки первого адсорбированного слоя может садиться второй, третий слой и т. д., прежде чем сформируется сплошной, мономолекулярный слой, соответствующий истинной физической (Ван-дер-Ваальсовой) адсорбции.

Теория и уравнение Лэнгмюра хорошо согласуются с фактами физической адсорбции паров и газов на простых, гладких поверхностях. Что касается сложных поверхностей адсорбентов, к которым относится и почва, то большинство современных исследований приводит к выводу о наличии полимолекулярных изотерм адсорбции газовой фазы на твердых адсорбентах, причем адсорбция при давлениях пара свыше 40—50% относительной влажности сопровождается процессом капиллярной конденсации.

Среди теоретических обобщений по вопросу полимолекулярной адсорбции с 1945 г. большое внимание привлекла теория БЭТ, названная так по начальным буквам фамилий ее авторов (Брунауэр, Эммет, Теллер) *.

В этой теории авторы обобщили теорию Лэнгмюра о мономолекулярном слое адсорбции применительно к многослойной адсорбции. Молекулы адсорбируемого пара — газа могут задерживаться не только тогда, когда они ударяются о свободную площадь адсорбента S_0 , но и при взаимодействии с первым адсорбированным слоем молекул S_1 , со вторым — S_2 , с третьим — S_3 , i -слоем — S_i и т. д. вплоть до $i = \infty$, что соответствует обычной конденсации при упругости пара P , насыщающего пространство на 100% — P_s . Основой теории является анализ полимолекулярной S-образной или сигмоидной изотермы адсорбции, охватывающей относительные равновесные давления пара от нуля до полного насыщения им атмосферы. Уравнение Лэнгмюра по этой теории является одним из частных случаев уравнения БЭТ.

В теории адсорбции БЭТ делаются два допущения: 1) теплота адсорбции молекул во втором, третьем и других последующих слоях не зависит от числа молекул, уже адсорбированных в первом слое и 2) условия испарения и конденсации молекул газовой фазы во втором и последующих высших слоях те же, что и молекул в жидкости. Это допущение обосновывается тем, что молекулы периферических адсорбированных слоев не контактируют непосредственно с поверхностью адсорбента. А так как сфера действия

* См. вышеназванную работу Брунауэра, стр. 210 и статью А. В. Киселева «Новые адсорбционные методы определения поверхности адсорбентов». «Успехи химии», т. XIV, вып. 5, стр. 367—394, 1945.

сил Ван-дер-Ваальса очень мала, можно предположить (допустить), что структура второго, третьего и последующих адсорбированных слоев такая же, как в жидкости.

При наличии этих двух допущений, в результате ряда математических операций, авторы приходят к следующему уравнению изотермы адсорбции паров:

$$\frac{P}{W(P_s - P)} = \frac{1}{W_m C} + \frac{C - 1}{W_m C} \cdot \frac{P}{P_s}, \quad (53)$$

где W — количество паров, адсорбированное при относительном давлении пара P ;

P_s — давление насыщенных водных паров;

W_m — количество вещества, необходимое для покрытия всей поверхности адсорбента плотным мономолекулярным слоем;

C — постоянная характеристика средней теплоты адсорбции монослоя.

Константы уравнения (53) W_m и C находятся графически.

На оси ординат откладывается $\frac{P}{W(P_s - P)}$; на оси абсцисс — величина относительного давления пара $\frac{P}{P_s}$.

Выражая W_m в числе молекул адсорбируемого вещества и умножая на площадь, занимаемую каждой молекулой — в твердом или жидком состоянии (W_0), получают удельную поверхность адсорбента (S) *.

Экспериментально показано, что для уравнения изотермы адсорбции БЭТ (53) прямолинейная зависимость отмечается лишь в пределах относительных давлений пара от $\frac{P}{P_s} = 0,05$ до $\frac{P}{P_s} = 0,40-0,50$.

При более высоком значении $\frac{P}{P_s}$ на пористых адсорбентах наступают резкие отклонения в изотерме адсорбции от уравнения 53, что связано с проявлением при этих давлениях капиллярной конденсации пара. Несоответствие уравнения 53 с изотермой адсорбции при низких давлениях ($\frac{P}{P_s} < 0,05$) А. В. Киселев объясняет несоответствием первого допущения БЭТ (см. выше) в области заполнения особо активных мест поверхности адсорбента.

На рисунке 53 приводим типичную изотерму адсорбции водяного пара.

Для получения изотермы адсорбции, представляющей прямую линию, достаточно иметь 2—3 экспериментальные точки при относительном давлении пара ($\frac{P}{P_s}$) в интервале 0,05—0,5. Подобное

* Площадь, занимаемая молекулой воды (W_0) при гексоганальной упаковке, равна $10,8 \text{ \AA}^2$.

давление может быть создано в специальных приборах * или в эксикаторах над растворами различных электролитов. В последнем случае можно поступать двояко: а) насыщать парами до заданной относительной влажности предварительно высушенную почву или б) обезвоживать до заданного предела сырую почву, как это рекомендует, например, Курон (Курон Н., 1930).

В случае предварительной (до насыщения парами) сушки почвы нужно производить ее над водопоглощающими веществами, напри-

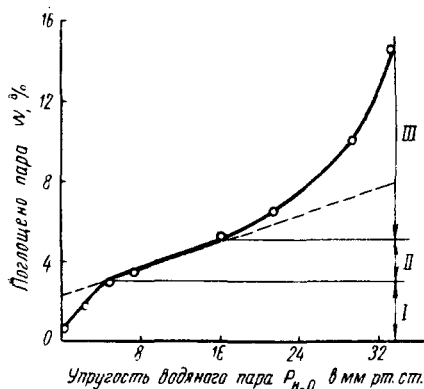


Рис. 53. Изотерма адсорбции водяного пара мощным тяжелосуглинистым черноземом (по П. В. Вершинину)

I — область мономолекулярной адсорбции; II — область образования полимолекулярного слоя; III — область капиллярной конденсации

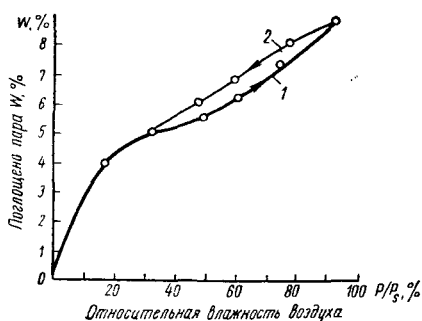


Рис. 54. Типичная изотерма адсорбции и десорбции водяных паров почвами:

1 — ветвь адсорбции; 2 — ветвь десорбции

мер над фосфорным ангидридом (P_2O_5), так как термическая сушка изменяет коллоидную часть почвы, значительно снижая адсорбционную ее способность (Качинский, 1923).

При обезвоживании сырой почвы нужно учитывать, что изотермы сорбции паров почвами и десорбции не совпадают. Здесь имеет место явление гистерезиса (петля гистерезиса) (рис. 54), причиной которого является загрязнение поверхности адсорбента молекулами других газов и некоторые другие. В силу этого для обеспечения определенной относительной влажности почвы при десорбции паров приходится создавать более низкое давление пара в эксикаторе ($\frac{P}{P_s}$), нежели для получения той же стадии увлажнения почвы в процессе адсорбции и сорбции паров. В таблице 38 указан ряд электролитов, позволяющих создать в эксикаторе определенное давление водяного пара.

* См., например, прибор конструкции П. В. Вершинина и В. П. Константиновой. Основы агрофизики. М., 1959.

Упругость паров воды над насыщенными растворами различных электролитов при $t\ 20^\circ\text{C}$

Электролиты	P —давление паров воды, мм рт. ст.	$\frac{P}{P_s}$	$\frac{P_s}{P}$
$\text{ZnCl}_2 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$	1,75	0,10	10,00
$\text{ZnCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	2,63	0,150	6,66
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	5,66	0,323	3,09
$\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	7,89	0,450	2,22
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	9,64	0,550	1,82
NH_4NO_3	11,39	0,650	1,54
NaCl	13,15	0,750	1,33
NH_4Cl	13,88	0,792	1,26
KCl	15,08	0,860	1,16
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	16,13	0,920	1,09
K_2SO_4	17,18	0,980	1,02

Ниже приводим пример расчета удельной поверхности почвы по методу БЭТ, заимствуя результаты исследований из работы А. Д. Воронина, выполненной на кафедре физики и мелиорации почв МГУ.

Принимаем для уравнения изотермы адсорбции (53):

$$\frac{P}{W(P_s - P)} = y; \quad \frac{1}{W_m C} = b; \quad \frac{C-1}{W_m C} = K; \quad \frac{P}{P_s} = X.$$

Подставляя y , b , K и X вместо соответствующих значений в уравнение 53, придадим ему вид:

$$y = b + KX, \quad (54)$$

уравнение прямой, которое решается в отношении y и K . Экспериментально находятся две точки прямолинейной части изотермы адсорбции при относительных давлениях пара $\left(\frac{P}{P_s}\right)$, равных 0,1 и 0,32. В первом случае образец почвы в эксикаторе насыщается до равновесного состояния над насыщенным раствором $\text{ZnCl}_2 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$, обеспечивающим давление пара $\frac{P}{P_s} = 0,1$; во втором случае — над насыщенным раствором $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, когда $\frac{P}{P_s} = 0,323$, фиксируется количество воды (W), адсорбированное почвой в каждом опыте. При давлении $\frac{P}{P_s} = 0,1$ воды адсорбировано: $W_1 = 0,0389$ г на 1 г адсорбента; при $\frac{P}{P_s} = 0,323$ соответственно $W_2 = 0,0644$ г на 1 г

адсорбента. Теперь можно найти y для каждого случая давления пара (0,1 и 0,323), примененного в опыте. В первом случае:

$$y_1 = \frac{P}{W_1(P_s - P)} = \frac{1,754}{0,0389(17,540 - 1,754)} = 2,8;$$

во втором случае:

$$y_2 = \frac{P}{W_2(P_s - P)} = \frac{5,66}{0,0644(17,540 - 5,66)} = 7,3.*$$

Имея два значения для $\frac{P}{W_1(P_s - P)}$ при двух относительных давлениях пара $\left(\frac{P}{P_s} = 0,1 \text{ и } \frac{P}{P_s} = 0,32\right)$ и откладывая первые величины (y) по оси ординат, а вторые (x) по оси абсцисс, на пересечениях координат находим две точки, по которым строим прямую (рис. 55). Прямая AB отсекает на оси ординат отрезок от 0 до $M = 0,7$; значит $b = \frac{1}{W_m C} = 0,7$.

Теперь необходимо найти значение $K = \frac{C-1}{W_m C}$. В уравнении прямой $K = \operatorname{tg} \varphi$ или в нашем случае (см. рис. 55) $K = \frac{AC}{MC}$ или $\frac{BD}{MD} = \frac{2,1}{0,1} = \frac{6,72}{0,32} = 21$, значит

$$K = \frac{C-1}{W_m C} = (C-1) \cdot \frac{1}{W_m \cdot C} = 21;$$

$$\frac{1}{W_m \cdot C} = 0,7, \text{ следовательно:}$$

$$(C-1) \cdot \frac{1}{W_m C} = (C-1) \cdot 0,7 = 21;$$

откуда $-0,7C = 21 + 0,7$ и $C = 31$.

Зная величину C , вычисляем величину W_m ; $W_m = \frac{1}{0,7 \cdot 31} = 0,046 \text{ г}$ на 1 г адсорбента воды в мономолекулярном слое.

Зная вес молекул воды в мономолекулярном слое на 1 г адсорбента и зная вес одной молекулы воды, находим число молекул в этом слое на 1 г адсорбента. Зная, что при гексагональной упаковке молекул воды одна молекула H_2O занимает площадь $10,8 \text{ \AA}^2$ и зная число молекул в мономолекулярном слое на 1 г адсорбента,

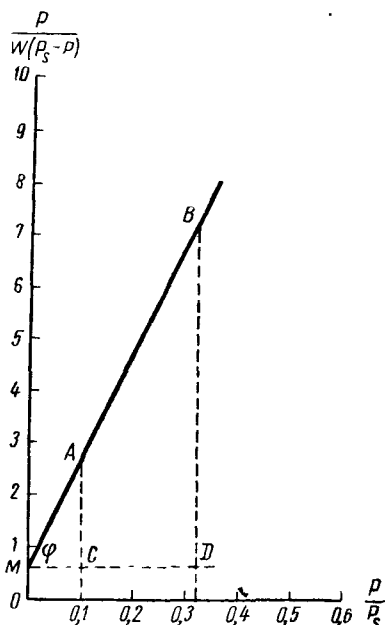


Рис. 55. Изотерма адсорбции (прямой) по уравнению БЭТ (по А. Д. Воронину)

* Значения давления пара P и P_s взяты из соответствующей таблицы величин.

находим удельную поверхность адсорбента S $\text{м}^2/\text{г}$:

$$S = W_m \cdot \frac{NW_0}{M} \text{ м}^2/\text{г}, \quad (55)$$

где S — удельная поверхность адсорбента в $\text{м}^2/\text{г}$;

W_m — количество вещества, необходимое для покрытия всей поверхности 1 г адсорбента плотным мономолекулярным слоем;

N — постоянная Авогадро = $(6,02380 \pm 0,00016) \cdot 10^{23}$;

M — грамм - молекула $\text{H}_2\text{O} = 18$ г;

W_0 — площадь, занимаемая молекулой H_2O при гексагональной упаковке, в $\text{м}^2 = 10^{-20}$.

$$\text{Выражение } \frac{NW_0}{M} = \frac{6,02380 \cdot 10^{23} \cdot 10,8 \cdot 10^{-20}}{18} = 3614 \text{ м}^2.$$

Отсюда удельная поверхность $S = 0,046 \cdot 3614 = 166,24 \text{ м}^2/\text{г}$.

В таблице 39 приводятся результаты определения по методу БЭТ удельной поверхности механических фракций различной крупности основных почвенных типов светлокаштановой подзоны. В таблице хорошо отображен рост удельной поверхности фракций, следуя от мелкого песка (0,1—0,05 мм) к илу ($< 0,001$ мм). В некоторых горизонтах почвы удельная поверхность в этом направлении возрастает более чем в 100 раз. Во фракции мелкой пыли (0,005—0,001 мм), наиболее обогащенной в этих почвах гумусом, отчетливо выявляется большая удельная поверхность в гумусированных горизонтах A_1 и B_1 , но эта закономерность полностью утрачивается в илистой фракции, которая в верхних горизонтах почв также содержит много гумуса (от 4 до 8% в разных почвах).

По удельной поверхности фракции ила хорошо подчеркивается солонцеватость всех этих почв, особенно в солонце (максимум удельной поверхности в иллювиальном горизонте B_1). Однако абсолютная разница в удельной поверхности одинаковых по размеру фракций различных почв оттенена слабо даже в самом поверхностном горизонте, резко отличном по содержанию гумуса в этих почвах.

Помимо величины удельной поверхности почвы, для характеристики ее поверхностной энергии большое значение имеет качество поверхности, ее активность, степень гидрофильности. Для получения этой характеристики рассчитывается чистая дифференциальная теплота адсорбции (адсорбционный потенциал), как разность дифференциальной теплоты адсорбции первого мономолекулярного слоя и теплоты конденсации, рассчитанных по БЭТ. Расчет ведется по формуле

$$C = e^{\frac{E_1 - E_L}{RT}}, \quad (56)$$

где C — константа;

e — основание натуральных логарифмов;

Таблица 39

Удельная поверхность фракций механических элементов (по методу БЭТ), $\text{м}^2/\text{г}$ (по А. Д. Воронину)

Почва	Горизонт, глубина, см	Удельная поверхность фракций механических элементов														
		0,1—0,05 мм			0,05—0,01 мм			0,01—0,005 мм			0,005—0,001 мм			<0,001 мм		
		($S \text{ м}^2/\text{г}$)	$\pm m$	$\pm P\%$	($S \text{ м}^2/\text{г}$)	$\pm m$	$\pm P\%$	($S \text{ м}^2/\text{г}$)	$\pm m$	$\pm P\%$	($S \text{ м}^2/\text{г}$)	$\pm m$	$\pm P\%$	($S \text{ м}^2/\text{г}$)	$\pm m$	$\pm P\%$
Лугово-каштановая тяжелосуглинистая	A_1 , 0—26	1,9	0,1	5,25	2,9	0,1	3,46	15,0	0,1	0,70	65,0	0,7	1,08	187	0,7	0,37
	B_1 , 30—40	—	—	—	2,8	0,1	3,57	5,0	0,1	2,00	31,0	0,7	2,20	226	0,1	0,05
	C_1 , 70—90	—	—	—	—	—	—	5,0	0,1	2,00	17,2	0,1	0,60	218	0,1	0,05
	C_3 , 250—270	2,3	0,1	4,35	3,2	0,1	3,12	4,8	0,2	4,18	16,6	0,2	1,20	230	0,1	0,05
Светлокаштановая тяжелосуглинистая	A_1 , 0—12	1,9	0,1	5,25	2,9	0,1	3,46	17,3	0,2	1,16	54,0	0,7	1,30	183	0,2	1,20
	B_1 , 18—26	—	—	—	2,9	0,1	3,46	4,1	0,5	12,00	32,0	0,4	1,25	229	0,7	0,31
	C_1 , 60—80	—	—	—	—	—	—	4,4	0,1	2,28	15,9	0,1	0,60	217	0,1	0,05
	C_3 , 150—170	1,8	0,1	5,65	3,6	0,4	11,10	5,2	0,1	1,93	14,4	0,1	0,70	228	0,1	0,05
Корковый тяжелосуглинистый солонец	A_1 , 0—3	1,6	0,1	6,25	2,4	0,2	8,32	7,6	0,4	5,25	43,0	1,0	2,78	171	0,1	0,05
	B_1 , 5—15	—	—	—	2,4	0,2	8,32	5,5	0,1	1,81	26,0	0,7	2,69	248	0,1	0,05
	C_1 , 35—45	—	—	—	—	—	—	4,2	0,2	4,86	15,5	0,1	0,60	217	0,1	0,05
	C_3 , 150—170	1,6	0,1	6,25	3,3	0,1	3,03	4,3	0,2	4,76	13,6	0,5	3,66	228	0,1	0,05

Адсорбционный потенциал механических фракций различных почв (по А. Д. Воронину) *

Почва	Горизонт, глубина, см	Дифференциальная чистая теплота адсорбции паров воды на фракциях механических элементов														
		0,1—0,05 мм			0,05—0,01 мм			0,01—0,005 мм			0,005—0,001 мм			< 0,001 мм		
		E_1-E_L кал/моль	$\pm m$	$+P\%$	E_1-E_L кал/моль	$\pm m$	$+P\%$	E_1-E_L кал/моль	$\pm m$	$+P\%$	E_1-E_L кал/моль	$\pm m$	$+P\%$	E_1-E_L кал/моль	$\pm m$	$+P\%$
Лугово-каштановая тяжелосуглинистая	A ₁ , 0—26	1680	67	4,00	2111	44	2,08	2079	16	0,80	2201	26	1,17	1694	17	1,00
	B ₁ , 30—40	—	—	—	1518	67	4,42	1553	25	1,65	2134	53	2,50	1706	1	0,06
	C ₁ , 70—90	—	—	—	—	—	—	1517	1	0,07	1774	4	0,23	1648	3	0,17
	C ₃ , 250—270	1342	1	0,07	1428	32	2,24	1197	45	3,78	1898	2	0,10	1651	1	0,06
Светлокаштановая тяжелосуглинистая	A ₁ , 0—12	1591	4	0,25	1776	21	1,18	2035	20	0,98	2156	39	1,81	1760	24	1,36
	B ₁ , 18—26	—	—	—	1382	116	8,38	1705	137	8,00	2111	39	1,88	1740	1	0,05
	C ₁ , 60—80	—	—	—	—	—	—	1228	55	4,50	1718	2	0,11	1671	1	0,06
	C ₃ , 150—170	1452	45	3,10	1000	45	4,50	1732	118	6,70	1774	4	0,23	1671	1	0,06
Корковый желтосуглинистый солонец	A ₁ , 0—3	1667	37	2,21	1695	169	10,00	2175	82	3,78	2220	50	2,22	1694	1	0,06
	B ₁ , 5—15	—	—	—	1452	174	12,00	1680	67	4,00	1819	9	0,65	1774	1	0,06
	C ₁ , 35—45	—	—	—	—	—	—	1707	135	7,90	1836	44	2,40	1671	1	0,06
	C ₃ , 150—170	1453	1	0,07	1378	30	2,18	1562	84	5,38	1760	10	0,43	1671	1	0,06

* Из фракций гор. С₃ отмыты карбонаты и растворимые соли с использованием 0,05 н. HCl и дистиллированной воды.

E_1 — дифференциальная теплота адсорбции мономолекулярного слоя;

E_L — теплота конденсации;

R — газовая константа;

T — абсолютная температура.

Из равенства (56) следует:

$$E_1 - E_L = RT \ln C = 2,3RT \lg C = \\ = 2,303 \cdot 1,98719 \cdot 293,16 \cdot 1,4914 = 2000,93 \text{ кал/моль.}^*$$

В таблице 40 приводим величины адсорбционного потенциала различных фракций основных почвенных типов светлокаштанового комплекса.

На основании данных таблицы 40 можно сделать следующие выводы.

1. Наиболее активной поверхностью обладает фракция мелкой пыли, в которой сосредоточена значительная часть продуктов физического (дробления), биологического и химического выветривания: окислы железа, алюминия, марганца и гидраты их, слюды, фосфаты. Эта же фракция для означенных почв каштановой зоны наиболее обогащена гумусом.

2. В более крупных фракциях пыли и мелкого песка, а также в илистой фракции отмечается уменьшение гидрофильности поверхности. В крупных фракциях это можно объяснить резким уменьшением содержания гумуса и преобладанием минерала кварца. Что касается илистой фракции, то здесь, по-видимому, проявляется роль вторичных почвенных минералов с преобладанием монтмориллонитовой группы, для которой, по мнению некоторых исследователей (W. Kelly, H. Jehny, M. Brown, 1936), характерны кислородные плоскости $\text{Si} - \text{O} - \text{Si}$ со слабыми электрическими полями, слабо адсорбирующими диполи воды. Кроме того, в илистой фракции почв светлокаштанового комплекса по сравнению с мелкой пылью уменьшается содержание гумуса **.

3. Сравнение величин адсорбционного потенциала для механических фракций одной и той же крупности из разных почв по методу БЭТ (см. табл. 40) не выявляет сколько-нибудь четко генетических особенностей этих почв, которые хорошо вскрываются обычными анализами: валовой состав, гумус, поглощенные основания, содержание илистой фракции и др.

Метод определения удельной поверхности почвы по теории БЭТ нашел довольно широкое признание, особенно в зарубежных почвенных работах. Но следует заметить, что он, как и другие

* Размерность: $\frac{\text{кал} \cdot \text{град}}{\text{град} \cdot \text{моль}} = \frac{\text{кал}}{\text{моль}}$.

** Следует учитывать, что аналитический материал по затронутому здесь вопросу еще весьма скромный, а потому вышеприведенные выводы мы рассматриваем, как предварительные.

методы по этому вопросу, дает лишь весьма приблизительные характеристики удельной почвенной поверхности. Причина заключается в том, что и этот метод, как указывалось выше, основан на ряде допущений, с которыми нельзя согласиться.

Первое и основное утверждение в методе, которое обычно принимается без критики, заключается в том, что на S-образной изотерме адсорбции пара (см. рис. 52) точка перегиба на кривой от начальной, более крутой и прямой, части линии ко второй — более пологой ее части — считается стадией мономолекулярного покрытия молекулами воды всех частиц почвы. Это могло бы иметь место для «идеальной» почвы с одной крупностью, формой и составом зерен. Но ведь почва — среда полидисперсная и гетерогенная. Поэтому темпы и степень насыщения ее поверхности паром в процессе адсорбции не могут быть одними и теми же для всех составляющих почву механических элементов, особенно для коллоидной ее части, обладающей емкостью поглощения, для которой само понятие о мономолекулярном слое адсорбции, как справедливо отмечает М. К. Мельникова, теряет смысл *.

Мы не можем согласиться также с первым и особенно вторым допущениями БЭТ, с учетом которых выведено уравнение изотермы адсорбции (53) (см. стр. 213). О неоправданности первого допущения было сказано выше (стр. 222). Что касается второго допущения о том, что второй, третий и последующие слои адсорбированного пара подвержены процессам испарения и конденсации молекул газовой фазы в такой же степени, как и жидкость, то оно полностью противоречит нашему представлению о строго ориентированной, прочно связанной адсорбированной воде, которая по осмотическому давлению, по плотности, диэлектрической постоянной, растворяющей в отношении солей способности, подвижности и др. резко отлична от обычной жидкости **. Здесь лишь отметим, что эта форма воды в силу высокого осмотического ее давления (> 50 атм) недоступна растениям.

Значительная произвольность допущений, положенных в основу уравнения изотермы адсорбции БЭТ, приводит к тому, что и характеристики почв, полученные по этому уравнению, оказываются весьма нечеткими, а иногда и противоречивыми. Так, П. В. Вершинин, используя уравнение БЭТ, получил следующие величины удельной поверхности различных почв ***:

чернозем глинистый обыкновенный — $1,6 \times 10^5$ см²/г;

дерново-подзолистая тяжелосуглинистая почва — $3,7 \times 10^5$ см²/г;

серозем тяжелосуглинистый — $3,0 \times 10^5$ см²/г.

Как следует из приведенных цифр, чернозем — почва, наиболее богатая гумусом и самая тяжелая по механическому составу из

* М. К. Мельникова. Основы агрофизики, 1959, стр. 650.

** Н. А. Качинский. Физика почвы. Ч. II, гл. I.

*** П. В. Вершинин. Основы агрофизики. Ч. II. Физматгиз, 1959, стр. 225.

трех сравниваемых почв,— обладает якобы удельной поверхностью вдвое меньшей, нежели серозем и дерново-подзолистая суглинистые почвы. Это противоречит емкости поглощения этих почв, адсорбционной их способности в отношении паров воды и теплотам их смачивания: все эти характеристики в несколько раз выше в черноземе, нежели в двух других почвах.

Мы согласны с М. К. Мельниковой, что попытка установить истинную удельную поверхность почв по числу адсорбированных молекул воды или решить обратную задачу неосуществима.

Метод БЭТ, как метод Митчерлиха и другие, позволяет получить в этом отношении (и то не всегда) лишь порядок величин удельной поверхности почв, но не абсолютные их значения.

Определение удельной поверхности по теплоте смачивания почвы. Теплота смачивания открыта в 1822 г. французским физиком М. Полэ (M. Paulet). Впоследствии рядом авторов делались попытки из теплот смачивания различных адсорбентов определить удельную их поверхность (W. Patrick a. H. Grimm, W. D. Harkins a. D. Gaps и др.). Но ими исследовались порошки, далекие от природы почвы: силикагель, TiO_2 и др. Из работ, выполненных непосредственно с образцами почвы, наиболее известны исследования Родевальда, Митчерлиха, Янерта (Janert H., 1930), П. И. Андрианова. Здесь мы кратко опишем метод Андрианова, наиболее распространенный в исследованиях почвоведов Советского Союза.

При погружении сухой почвы в воду, в силу поверхностной энергии почвы, на поверхности ее частиц происходит адсорбция молекул воды, а также гидратация поглощенных ионов (катионов). Подвижные молекулы H_2O останавливаются у поверхности твердой фазы почвы, перегруппировываются под влиянием ее энергии, строго ориентируются в отношении поверхности твердых частиц и уплотняются, гидратируют поглощенные катионы. Вследствие произведенной работы выделяется тепло (r). Вместе с тем часть тепла расходуется на разъединение смачиваемых частиц и на набухание их (i). Суммарный тепловой эффект ($r + i$) будет интегральной теплотой смачивания, полной теплотой смачивания абсолютно сухого порошка, или просто теплотой смачивания. Величина i по сравнению с r весьма мала и потому теплоту смачивания в почвенных исследованиях обозначают как r . Теплота смачивания учитывается в малых калориях на 1 г твердой фазы почвы (кал/г). Для точного учета выделившегося при смачивании почвы тепла применяются специальные приборы — калориметры. В конструкции их используется ряд приспособлений по термоизоляции, которые должны по возможности исключить расход неучтенного тепла из сосуда, в котором, в процессе определения теплоты смачивания, приходит в контакт вода и почва. На рисунках 56 и 57 представлены калориметры конструкции Янерта (1930 г.) и Андрианова (1937 г.).

В калориметре Янерта (рис. 56) теплоизоляция осуществляется с помощью деревянного футляра (1) и сосуда Дюара (2), внутри

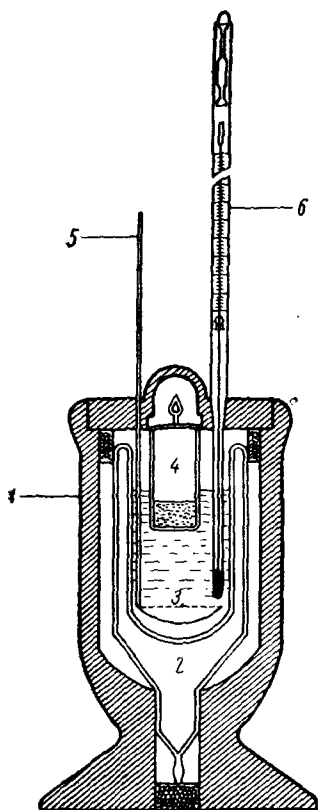


Рис. 56. Калориметр Янер-
та для определения тепло-
ты смачивания почвы

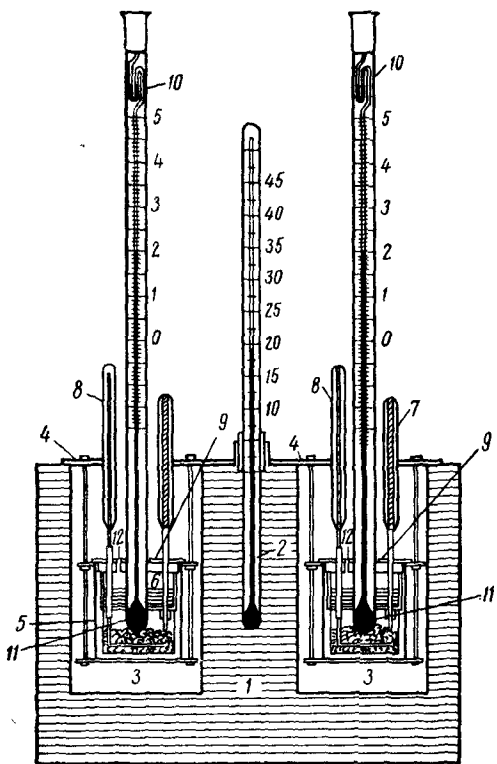


Рис. 57. Парный калориметр Андрианова
для определения теплоты смачивания
почвы

которого наливается строго отмеренное количество воды (3). Под съемной крышкой деревянного футляра подвешен стеклянный бюкс, закрывающийся притертой крышкой (4). В бюкс помещается сухая навеска почвы (10—25 г), просеянная через сито с диаметром отверстий в 1 мм. При определении теплоты смачивания почва путем опрокидывания бюкса (без крышки) на вращающихся подвесках высыпается в сосуд Дюара с водой. Содержимое калориметра (почва + вода) должно составить объем 100 см³. Почва и вода перемешиваются специальной мешалкой (5). Ручка мешалки выступает поверх крышки калориметра, а перемешивающая почву и воду часть расположена в сосуде Дюара ниже бюкса и ртутного шарика термометра (6), также входящего в сосуд Дюара и погруженного в жидкость.

В парном калориметре П. И. Андрианова (рис. 57) термоизоляция осуществляется с помощью водного термостата (1), постоянство температуры которого регистрирует термометр (2), и с помощью воздушной прослойки между стенками водного термостата и собственно калориметром (3). Латунный калориметр состоит из двух цилиндров: наружного (5), в нижнюю часть которого помещается навеска почвы, и внутреннего (6), в который наливается заданная порция воды. Оба цилиндра перекрываются крышкой (9). В крышке 4 отверстия: а) центральное, через которое проходит замкнутая в нижнем конце латунная трубка, впаянная в дно внутреннего цилиндра и опускающаяся в нижнюю часть наружного цилиндра (11); в эту трубку вставляется термометр Бекмана (10); б) отверстие, через которое проходит металлическая пробка с эбонитовой ручкой (7), которой герметически закрывается отверстие в дне внутреннего цилиндра калориметра; с) отверстие для узкой сквозной трубки, впаянной в дно внутреннего цилиндра, через которую проходит стержень мешалки (8), для перемешивания почвы и воды в нижней части наружного цилиндра калориметра (5) под ртутным шариком термометра Бекмана (10, 11); d) отверстие (12) для наливания воды во внутренний цилиндр калориметра. Водный термостат заполняется водой накануне дня определения теплоты смачивания почвы и выдерживается в лаборатории, чтобы вода в нем приняла устойчивую температуру. Абсолютно сухая навеска почвы помещается на дно наружного цилиндра (5). Отверстие в дне внутреннего цилиндра плотно затыкается металлической пробкой (7) и после этого через отверстие (12) во внутренний цилиндр с помощью бюретки вливается строго отмеренное количество дистиллированной воды. Собранные цилиндры калориметров с почвой и водой подвешиваются каждый в своем гнезде (3) на эбонитовых кольцах, скрепленных латунными стержнями (4). В центр каждого калориметра в специальной трубке (11) устанавливается высокочувствительный термометр, с помощью которого можно учитывать изменения температуры с точностью до 0,005—0,001° С. В калориметре Андрианова используется термометр Бекмана.

Так как калориметр может излучать тепло в окружающую среду, то перед определением теплоты смачивания и по окончании этого процесса каждый раз в течение 10 мин устанавливают по термометру Бекмана «ход калориметра», т. е. изменение в нем температуры в силу возможного излучения тепла в окружающую среду.

Пусть среднее падение температуры в калориметре за 10 мин до начала смачивания равно $a^{\circ}/\text{мин}$ и то же по окончании процесса смачивания равно $b^{\circ}/\text{мин}$. Тогда принимается, что в период процесса смачивания калориметр терял тепла за счет излучения в окружающее пространство $\left(\frac{a+b}{2}\right)^{\circ} \text{ мин}$. Если процесс смачивания длился

n мин, то за этот период температура калориметра вследствие потери им тепла во внешнюю среду снизится на $\left(\frac{a+b}{2}\right) \times n$. В последующие расчеты теплоты смачивания эта поправка должна быть прибавлена к максимальной температуре смачивания со знаком плюс (температурная поправка на ход калориметра).

Кроме того, для последующих расчетов теплоты смачивания необходимо предварительное определение водного числа или водного эквивалента калориметра, под которым понимается расход тепла в малых калориях, которое необходимо для нагревания на 1°C всех металлических частей калориметра и ртутного шарика термометра, погруженного в процессе определения теплоты смачивания в смесь почвы с водою.

При определении теплоты смачивания в калориметре Андриана открывается пробка (7) (см. рис. 57). Вода из внутреннего цилиндра (6) стекает в нижнюю часть наружного цилиндра (5), где помещена навеска почвы, после чего отверстие снова закрывается пробкой (7). Почва и вода в калориметре перемешиваются мешалкой (8). Наступает процесс смачивания и выделения тепла, который регистрируется термометром Бекмана (10). После достижения наивысшей температуры делается еще 10 ежеминутных отсчетов для внесения поправки на «ход калориметра» и производится вычисление теплоты смачивания почвы по формуле

$$r = \frac{1}{B} (0,2B + K + W) (t_2 - t_1), \quad (57)$$

где r — теплота смачивания в кал/г;

B — навеска почвы в г;

K — водный эквивалент калориметра;

W — количество воды в опыте в г;

t_2 — наивысшее показание термометра Бекмана после смачивания почвы с поправкой на «ход калориметра» в $^{\circ}\text{C}$;

t_1 — наименьшая температура по термометру Бекмана перед процессом смачивания;

0,2 — средняя удельная весовая теплоемкость почвы.

Различные почвы в абсолютно сухом состоянии характеризуются весьма различными величинами теплот смачивания: от десятых

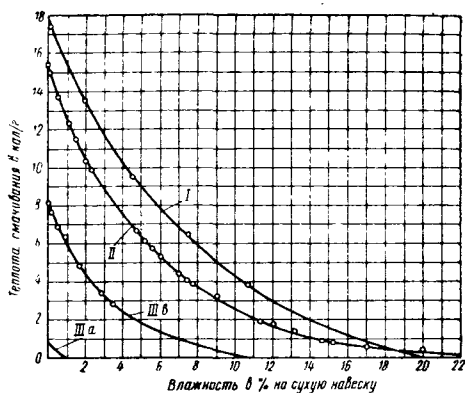


Рис. 58. Кривые теплот смачивания различных почв (по А. Митчерлиху):

I — торфяная почва; II — тяжелоглинистая почва; IIIa — песчаная почва; IIIb — та же, что и IIIa, почва, но масштаб показателей увеличен в 10 раз

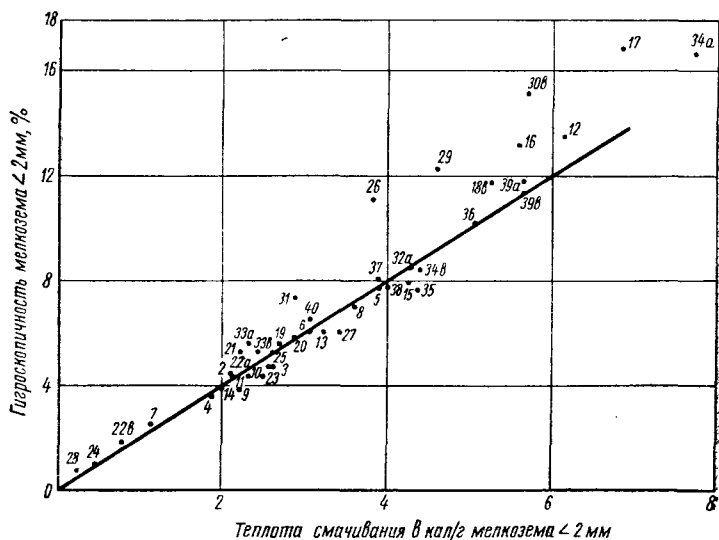


Рис. 59. Зависимость между величинами теплоты смачивания почвы и максимальной ее гигроскопичностью (по Г. Янерту)

долей до 10—20 кал/г. Чем тяжелее почва по механическому составу и чем более богата она гумусом, тем выше теплота ее смачивания. В случае частичного увлажнения почв в пределах их максимальной гигроскопичности теплота смачивания будет тем ниже, чем выше влажность почвы, и при величине последней около максимальной гигроскопичности теплота смачивания сходит к нулю.

Эта закономерность выражена в уравнении Родевальда:

$$\lg(r_0 + i) - \lg(r_1 + i) = C(W_1 - W_0), \quad (58)$$

где r_0 — теплота смачивания почвы в кал/г при влажности W_0 ;

r_1 — теплота смачивания почвы при влажности W_1 ;

i — тепловой эффект воды, зависящий от распада почвенных комочков под водой;

C — коэффициент пропорциональности, характеризующий скорость падения кривой теплоты смачивания по мере нарастания влажности почвы в пределах от нуля до максимальной ее гигроскопичности.

Иллюстрацией к уравнению Родевальда (58) является график (рис. 58). Уравнение теплоты смачивания Родевальда в преобразованном виде широко использовано в исследованиях П. И. Андрианова, о которых будет сказано ниже.

Поскольку теплота смачивания является функцией поверхностной энергии почвы, естественны попытки рассчитать по величине теплоты смачивания удельную поверхность адсорбента (П. А. Ребиндер, Б. Ильин, Patrick a. Grimm, F. Bartel, П. И. Андрианов и др.).

В этом методе определения удельной поверхности, как и в ранее нами описанных, делаются некоторые упрощения и допущения, на основе которых выводится формула расчета. Прежде всего следует отметить, что существует высокая прямая коррелятивная связь теплоты смачивания в кал/г и максимальной гигроскопичности почвы в % к ее сухому весу. Эта связь близка к линейной зависимости (рис. 59).

Обработав математически данные, приведенные на графике 58, Янерт предложил коэффициент перехода от теплоты смачивания к максимальной гигроскопичности:

$$\frac{r_0}{W_m} = K_1 = 0,5, \quad (59)$$

где r_0 — теплота смачивания абсолютно сухой почвы в кал/г;

W_m — максимальная гигроскопичность в % веса сухой почвы.

Обратное соотношение этих характеристик даст $K_2 = 2$. В работах других авторов коэффициент, найденный Янертом, незначительно варьирует. По данным В. Н. Димо, он подтверждается для почв легкого механического состава, обладающих малой емкостью поглощения и бедных органическим веществом. Для почв с сильно развитой интрамицеллярной и мицеллярной порозностью отноше-

ние $W_m : r_0$ всегда больше 2, и тем больше, чем тяжелее почва по механическому составу. Объяснение этой закономерности нужно искать в природе двух сравниваемых характеристик. Величина r_0 определяется адсорбционным потенциалом почвы (Φ), тогда как W_m является следствием суммирования двух процессов: адсорбции паров воды в силу поверхностной энергии почвы и капиллярной конденсации их. Чем сильнее выражена капиллярная конденсация, тем шире будет отношение $\frac{W_m}{r_0}$. Отсюда следует, что, сравнивая для двух или нескольких почв отношение $\frac{W_m}{r_0}$, можно получить добавочную характеристику почв в отношении развитости в них интрамицеллярной и мицеллярной порозности. Надо полагать, чем шире отношение $\frac{W_m}{r_0}$, тем сильнее представлена в них интрамицеллярная и мицеллярная порозность.

Возвращаясь к вопросу об удельной поверхности почвы, на основе всего вышесказанного мы можем вычислять ее путем перевода величин теплоты смачивания в соответствующие величины гигроскопичности почвы, а имея эти последние величины, рассчитывать удельную поверхность почвы по одному из вышеописанных методов.

Предложены и другие подходы (формулы) для вычисления удельной поверхности почвы по теплоте ее смачивания.

Для примера познакоимся с двумя методами Андрианова *. Андрианов, как ранее Родевальд и Митчерлих, допускает, что выделение теплоты смачивания прекращается, когда все почвенные частички оденутся мономолекулярным слоем H_2O . Влажность, соответствующую этому смачиванию почвы, он обозначает, как W_H , и считает, что она устанавливается в почве при равновесном давлении водяного пара $\frac{P}{P_s} = 0,793$ или при относительной влажности 79,3% (P — давление пара в замкнутом пространстве над насыщенным раствором NH_4Cl ; P_s — упругость насыщенного пара **). Сделав такое допущение, автор предлагает формулу

$$S = \frac{1W_H}{100 \cdot \Delta W \cdot 10^4} m^2/g, \quad (60)$$

где S — удельная поверхность почвы в m^2/g ;

W_H — предельная влажность почвы, при достижении которой $r = 0$;

* П. И. Андрианов. Теплота смачивания и удельная поверхность почв. Изд. ВАСХНИЛ. М., 1937; «Коллоидный журнал», т. VIII, № 4, 1946, стр. 193—198.

** Это допущение П. И. Андрианова расходится с допущениями по тому же вопросу других исследователей (см. стр. 214).

ΔW — вес одномолекулярного слоя воды на 1 см^2 поверхности адсорбента $= 42,6 \cdot 10^{-9} \text{ г}$;

10^{-4} — перевод см^2 в м^2 .

Величину W_H (по Андрианову) можно определить и другим способом, исходя из теплоты смачивания (r) и сорбционного потенциала (Φ), характеризующего гидрофильность активной поверхности:

$$\Phi = \frac{Q}{W_H}, \quad (61)$$

где Q — теплота смачивания при данном увлажнении почвы;

W_H — верхний предел влажности почвы, сверх которого теплота смачивания не выделяется.

В этом выражении для каждого сорбента в зависимости от его влажности Q — величина переменная, а W_H — постоянная, т. е. суммарное количество тепла, выделенное сорбентом в интервале смачивания от влажности, равной 0 до влажности W_H продуцируется одним и тем же количеством воды.

Для нахождения W_H нужно определить теплоту смачивания данного сорбента при двух различных эквипотенциальных состояниях Φ_1 и Φ_2 :

$$\Phi_1 = \frac{r_1 + i}{W_H}; \quad \Phi_2 = \frac{r_2 + i}{W_H}.$$

Вычитая из первого равенства второе и определяя W_H , получим:

$$W_H = \frac{r_1 - r_2}{\Phi_1 - \Phi_2}, \quad (62)$$

где обозначения прежние. Теплота смачивания при двух влажностях (соответствующих двум различным давлениям паров H_2O) определяется калориметрически, как описано выше, а сорбционные потенциалы (Φ_1 и Φ_2) рассчитываются по уравнению Андрианова:

$$\Phi = 2,303 \frac{RT}{M} \cdot \lg \frac{P_s}{P} \cdot \frac{G}{E}, \quad (63)$$

где Φ — сорбционный потенциал при определенной исходной влажности адсорбента;

R — газовая постоянная в граммах на грамм-моль воды, равная 848 000;

T — абсолютная температура;

M — молекулярный вес воды;

P — давление пара H_2O над адсорбентом при данной его влажности;

P_s — давление насыщенного пара;

G — грамм-сила, равная 981 дин/см^2 ;

E — механический эквивалент малой калории, равный $4,19 \times 10^7 \text{ эрг}$.

Определив при двух эквипотенциальных состояниях влажности почвы теплоты смачивания (r_1 и r_2) и сорбционные потенциалы (Φ_1

и Φ_2), по уравнению 61 находим величину W_H , а по этой последней величине (W_H) удельную поверхность почвы.

Сорбционные потенциалы, соответствующие двум эквипотенциальным состояниям влажности почвы, могут быть найдены (по Андрианову) и минуя уравнение 63. Для этого требуется дважды определить влажность испытуемой почвы, высушивая ее при температурах 40 и 60° С. В этом случае сорбционные потенциалы вычисляются по формуле:

$$\Phi = \frac{q^t - 1}{q^t (q - 1)}, \quad (64)$$

где Φ — сорбционный потенциал;

q — эмпирический коэффициент, равный 1,00765;

t° С — температура сушки.

Оценивая методы определения удельной поверхности почвы по полной (интегральной) теплоте ее смачивания, мы должны прийти к заключению, что они, как и ранее разобранные методы, будучи основаны на ряде допущений при выводе формул, дают лишь более или менее точный порядок величин удельной поверхности испытываемых образцов, а не абсолютную их поверхность.

Значительно более интересна в этих методах характеристика удельной поверхностной энергии почв, выраженная в калориях, от которых естествен переход к единицам работы в эргах и джоулях. Эти характеристики раскрывают многое в понимании почвенных процессов, как, например, процессы взаимодействия различных компонентов почвы между собой, процессы коагуляции и др. Для примера напомним, что теплота смачивания различных почв колеблется в интервале от десятых долей до 20 кал/г. Если возьмем средние из этих величин порядка 5—10 кал/г и учтем, что 1 кал эквивалентна механической работе, измеряемой 4,2 дж, то окажется, что для 1 г почвы эта физическая энергия достигнет 21—42 дж. Отсюда становится понятной высокая поглотительная способность почв, связывание ими воды до пределов, недоступных растениям, поглощение газовой фазы, высокая подвижность коллоидов в процессах коагуляции и др.

Нельзя забывать и практической значимости теплоты смачивания почв. Например, общеизвестно, что молодые мелкокорневившиеся всходы растений не рекомендуется поливать в солнцепек, так как резкое повышение температуры при поливе сухой почвы вызовет «ожог» растений.

Поскольку теплота смачивания тесно сопряжена с другими свойствами почвы (механический состав, содержание гумуса и пр.), то закономерны попытки использовать эту характеристику в практических целях. Например, Митчерлих и Янерт предложили на основе теплоты смачивания рассчитывать междуречные расстояния при осушении заболоченных почв. Формула Янерта

$$E = 30 - 10,96 \sqrt[3]{W_w}, \quad (65)$$

где E — междреннее расстояние в m при глубине дрен 1,25 m ;
 W_w — теплота смачивания почвы в $кал/г$.

Эта формула широко используется при осушительных мелиорациях в ГДР.

Теплоту смачивания учитывают в керамике и в ряде других производств, в детали которых в настоящем курсе мы входить не станем.

В заключение отметим, что метод учета поверхностной энергии почвы по теплоте ее смачивания по сравнению с максимальной гигроскопичностью имеет свои положительные и отрицательные стороны.

Максимальная гигроскопичность соответствует сорбции паров почвою, в каком-то процессе суммируется адсорбция паров и капиллярная их конденсация; чем выше второе явление, тем менее точно W_w характеризует поверхностную почвенную энергию, так как капиллярная конденсация от нее не зависит. Именно этим вызвана попытка в методе БЭТ и других определить удельную поверхность почвы и степень ее активности не по всей кривой сорбции пара, а лишь по начальной «прямолинейной» (адсорбционной) ее части.

При определении полной теплоты смачивания, когда почва перекрыта водой, процесс капиллярной конденсации снимается, а вместе с тем адсорбционный процесс выступает в «чистом» виде и (с поправкою на величину i) весьма точно характеризуется теплотой смачивания в $кал/г$.

Однако при определении теплоты смачивания возникают другие ошибки. Причина самой большой из них — высушивание образцов почвы перед определением, при котором сильно меняются свойства коллоидной части почвы. Особенно заметно это сказывается при сушке почвы термостатным (тепловым) способом (табл. 41).

Таблица 41

Максимальная гигроскопичность дерновоподзолистой тяжелосуглинистой почвы
 (по Качинскому, 1923)

Горизонты, глубины, см	Максимальная гигроскопичность, %		Горизонты, глубины, см	Максимальная гигроскопичность, %	
	в воз- душно-су- хих образ- цах	в образцах после сушки в термостате при 100—105° С		в воз- душно-су- хих образ- цах	в образцах после сушки в термостате при 100—105° С
A — пахотный (0—20)	6,2	3,0	B_2 (55—90)	9,0	6,8
A_2 (с ортштейна- ми, 20—32)	3,7	2,8	B_3 (90—100)	6,7	5,8
A_2 (без ортштей- нов, 20—32)	2,2	1,7	Ортштейны	7,7	6,6

Напрашивается вопрос о замене в этом случае термической сушки почвы химической, например в вакууме над концентрированной H_2SO_4 или над P_2O_5 . Однако сушка в этом случае, во-первых, затягивается на многие сутки, а во-вторых, употребление в лабораториях для массовых анализов таких реактивов, как концентрированная H_2SO_4 и P_2O_5 , недопустимо с точки зрения охраны труда.

Некоторые другие методы характеристики удельной поверхности и поверхностной энергии почвы

По адсорбции почвой красящих веществ. Окрашенный раствор определенного объема и концентрации фильтруется сквозь заданную навеску почвы. Концентрация краски в исходном растворе и в фильтрате учитывается колориметрически. Зная удельную поверхность краски в $\text{м}^2/\text{г}$ (a) и количество ее, поглощенное почвой, в г (θ), а также навеску почвы в г (c), рассчитывают удельную поверхность почвы:

$$S_{y \text{ д. н.}} = \frac{a \cdot b}{c} \text{ м}^2/\text{г}. \quad (66)$$

Для определения удельной поверхности почвы по этому методу пригодны лишь краски, устойчивые по цвету к различному рН почвы. Рудольф и Шнейдер (Rudolf van der Leeden und Felix Schneider, 1912) предложили для этой цели желтый нафтол (Naphtholgelb) и пикриновую кислоту (Pikrinsäure), но, по данным Митчерлиха, количественное определение этих кислот в растворе колориметрически весьма неточно.

Опыт определения удельной поверхности почвы по адсорбции красок был поставлен и К. К. Гедройцем (1913). Он пришел к заключению о несоответствии удельной поверхности почвы и количества поглощаемой ею краски. В последующих работах этот метод характеристики удельной поверхности почвы расценен как весьма приблизительный.

Представление об удельной поверхности почв, или скорее — о поверхностной почвенной энергии, можно составить по **емкости поглощения почвами катионов**. Этот метод был предложен Б. П. Никольским (1945) и уточнен Е. Н. Гапоном (1947). Сущность метода сводится к учету обменной способности почв в зависимости от реакции среды. По Гапону, почва, емкость обмена которой при смещении рН раствора на одну единицу изменяется на 1 $\text{м}/\text{г}$ (на 100 г), обладает удельной поверхностью, равной 100 $\text{м}^2/\text{г}$. Расчеты удельной поверхности почв, сделанные по этому методу, оказались в 100 и более раз выше, нежели найденные по изотермам адсорбции пара или по теплоте смачивания.

Об удельной поверхности почвы можно судить по характеру и скорости **фильтрации сквозь нее воды или газов**. Здесь мы отметим лишь метод Б. В. Дерягина и др. (1948—1957) — определение

кинетической удельной поверхности почвы по сопротивлению ее фильтрации разреженного воздуха при кнудсеновском режиме *. В этих условиях соударения между молекулами воздуха сравнительно редки, и ими в расчетах можно пренебречь. Скорость течения газа через поры в основном будет зависеть от соударений молекул газа о стенки почвенных пор. Скорость потока воздуха подчиняется уравнению:

$$Q = \frac{24}{13} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{P_k^2}{S_0 \sqrt{MRT}} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta x}, \quad (67)$$

где Q — число молей воздуха, протекающих через 1 см^2 пористой перегородки толщиной Δx за 1 сек при перепаде давления с обеих сторон перегородки ΔP , дин/см^2 ; S_0 — удельная поверхность испытуемого образца, $\text{см}^2/\text{см}^3$; P_k — коэффициент пористости — отношение объема пор ко всему объему почвы; M — средний молекулярный вес воздуха, равный $29,3 \text{ г/моль}$; R — универсальная газовая постоянная в $\text{эрг/моль/град} = (8,31439 \pm 0,00034) \cdot 10^7 \text{ эрг} \times \text{град}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$; T — температура опыта в градусах абсолютной шкалы ($^{\circ}\text{K}$). Решая уравнение в отношении S_0 , находим удельную поверхность почвы. Определение проводится в специальном приборе, сконструированном Б. В. Дерягиным.

В заключение обзора методов определения удельной поверхности и поверхностной почвенной энергии отметим, что между показаниями отдельных методов, особенно наиболее точных из них, как методы изотермы адсорбции пара, теплоты смачивания, поглощательной способности почвы, существует высокая положительная корреляция. Это позволяет при наличии какой-либо одной из этих характеристик составить достаточно определенное суждение о других. Для иллюстрации этого положения приводим некоторые из величин, характеризующих поверхностную энергию почв различного типа в таблице 42.

Как следует из данных таблицы 42, все приведенные в ней характеристики согласно оттеняют особенности профиля каждой почвы. В серой лесной земле и особенно в дерново-подзолистой почве по всем показателям отчетливо выявляются: перегнойно-аккумулятивный горизонт (A_1), элювиальный горизонт (A_2) и горизонты вымывания (B_1 и B_2), причем иллювиальность процесса, достигнув максимума в B_2 обеих почв, в дальнейшем затухает.

В светлокаштановой почве всеми анализами выявлена ее солонцеватость. Иллювиальный горизонт B_1 этой почвы содержит наибольшее количество илистой фракции, обладает наибольшей гигроскопичностью, теплотой смачивания и емкостью поглощения.

* Под кинетической поверхностью Б. В. Дерягиным понимается «внутренняя поверхность сквозных пор, доступная для движения воды и воздуха внутри почвы и определяющая скорость фильтрации, капиллярной пропитки растворения, обменных реакций и тому подобное. Кинетическая удельная поверхность отличается от статической, определяющей равновесную адсорбцию, тем, что она не учитывает поверхность тупиков» (Б. В. Дерягин, 1953).

Сравнительная характеристика почв по некоторым физическим и физико-химическим показателям

Почвы	Горизонты, глубина, см	Содержание ила ($d < 0,001 \text{ мм}$), %	Максимальная гигроскопичность (W_n), % на сухую навеску	Теплота смачивания (r_0), кал/г	Емкость поглощения, м/эка на 100 г почвы
Дерново-подзолистая суглинистая. Собакино Московской обл., стерня пшеницы	$A_{\text{п}}$, (0—20)	6,8	3,57	1,64	12,04
	A_2 , (20—32)	4,2	2,70	1,42	9,12
	B_1 , (32—55)	15,9	4,49	2,09	13,65
	B_2 , (55—90)	21,6	6,57	2,98	22,34
	B_3 , (90—100)	16,5	6,53	2,95	20,18
Серая тяжелосуглинистая лесная земля. Сторожилово Рязанской обл., клевернице	$A_{\text{п}}$, (0—20)	18,6	5,82	2,75	18,12
	A_2 , (20—30)	15,4	4,17	2,11	15,23
	B_1 , (35—60)	25,6	6,52	3,26	18,04
	B_2 , (60—85)	34,2	8,58	4,09	24,57
	C , (85—100)	32,3	8,24	3,83	22,12
Чернозем обыкновенный глинистый. Сырты Куйбышевской обл., стерня пшеницы	$A_{\text{п}}$, (0—20)	33,9	11,14	5,06	42,30
	A_1 , (20—40)	30,5	11,70	5,44	53,60
	B_1 , (40—66)	30,7	11,67	5,56	49,50
	B_2 , (66—80)	31,2	11,84	5,92	48,28
	C_1 , (80—100)	32,0	10,38	5,06	46,56
Светлокаштановая солонцеватая суглинистая почва. Волгоградская обл., стерня пшеницы	$A_{\text{п}}$, (0—20)	18,3	9,05	4,28	32,61
	B_1 , (20—35)	38,1	9,45	4,29	36,96
	B_2 , (35—50)	35,4	8,52	4,16	32,66
	C_1 , (50—80)	33,4	8,16	4,08	30,15
	C_2 , (80—100)	33,0	7,54	3,81	30,25

Чернозем обыкновенный согласно по всем показателям охарактеризован как почва наиболее богатая коллоидами и обладающая наибольшей удельной поверхностной энергией. Вместе с тем в профиле этой почвы все отмеченные свойства носят более выровненный характер. Несколько выделяется в ней по повышенному содержанию ила, по гигроскопичности и другим показателям лишь перегнойно-аккумулятивный горизонт A_1 .

* * *

Мы уделили значительное внимание главе об удельной поверхности почвы и поверхностной почвенной энергии. Представление об этих величинах поможет глубже понять взаимодействие различных фаз почвы между собой, природу различных форм воды и воздуха в почве и особенно процесс структурообразования, к изложению которого и переходим.

////////////////

ГЛАВА ШЕСТАЯ

СТРУКТУРА ПОЧВЫ

ПОНЯТИЕ О СТРУКТУРЕ ПОЧВЫ. КАЧЕСТВЕННАЯ ЕЕ ОЦЕНКА

В III главе отмечалось, что твердая фаза почвы состоит из механических элементов. Механические элементы — это первичные обособленные частицы (осколки) пород и минералов, а также аморфных соединений в почве. В силу поверхностной энергии механические элементы, будучи смочены, взаимодействуют с жидкой фазой почвы (с дисперсионной средой) и друг с другом, в результате чего агрегируются.

Совокупность механических элементов, взаимно удерживающихся в силу коагуляции коллоидов, склеивания, слипания их в результате сил Ван-дер-Ваальса, остаточных валентностей и водородных связей, адсорбционных и капиллярных явлений в жидкой фазе, а также с помощью корневых тяжей и гифов грибов, образует агрегаты или структурные отделы. По предложению К. К. Гедройца (1926) условно принято: структурные отделы диаметром $< 0,25$ мм называть микроагрегатами, крупнее этой величины — макроагрегатами почвы.

Совокупность агрегатов различной величины, формы, порозности, механической прочности и водопрочности, характерных для каждой почвы и ее горизонтов, составляет почвенную структуру.

Практиками земледелия давно было замечено, что многие свойства почвы, особенно физические, зависят от характера почвенной структуры. Поэтому вопросы генезиса структуры, влияния ее на свойства почвы и в конечном счете на плодородие, на урожай растений издавна привлекали внимание агрономов и почвоведов всех стран мира. В России и СССР этому вопросу посвящены многочисленные работы и высказывания крупнейших агрономических и почвенных деятелей, как И. М. Комов (1789), М. Г. Павлов (1837), Я. А. Линовский (1846), Н. И. Железнов (1853), П. А. Костычев (1886, 1887), В. В. Докучаев (1892—1901), К. К. Гедройц (1926), В. Р. Вильямс (1927—1937), А. Г. Дояренко (1924—1928), А. Н. Соколовский (1933) и др. (см. главу I).

В настоящее время можно считать общепризнанным, что плодородие почв, тяжелых по механическому составу (среднесуглинистых, тяжелосуглинистых и глинистых), в сильнейшей степени зависит от их структуры, так как характер структуры определяет водный, воздушный, биологический, а значит, и питательный режимы почвы.

Для тяжелых по механическому составу почв справедливо определение: культурная почва — структурная почва.

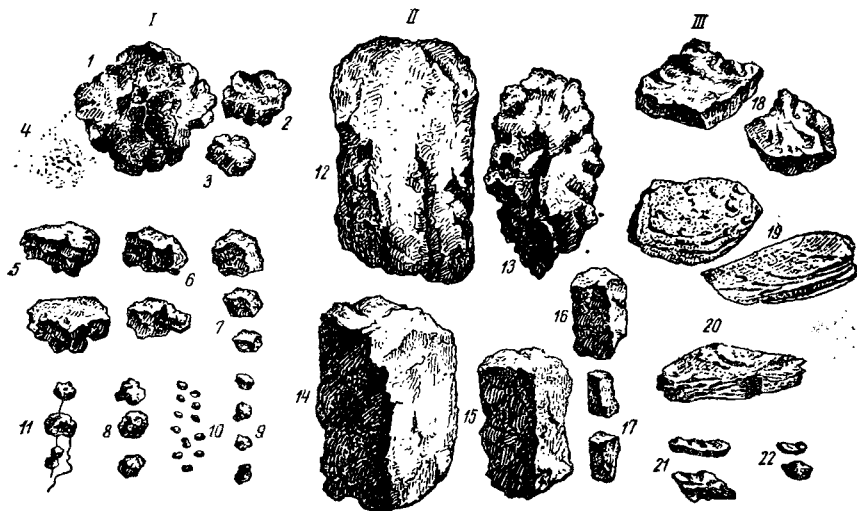


Рис. 60. Морфологические типы структурных отдельных почвы (по С. А. Захарову):

I — кубовидный тип структуры: 1 — крупнокомковатая, 2 — комковатая, 3 — мелкокомковатая, 4 — пылеватая, 5 — крупноореховатая, 6 — ореховатая, 7 — мелкоореховатая, 8 — крупнозернистая, 9 — зернистая, 10 — порошистая, 11 — структурные отдельные, наизнанке на корни; II — призмовидный тип структуры: 12 — столбчатая, 13 — столбовидная, 14 — крупнопризматическая, 15 — призматическая, 16 — мелкопризматическая, 17 — тонкопризматическая; III — плитовидный тип структуры: 18 — сланцеватая, 19 — пластинчатая, 20 — листоватая, 21 — чешуйчатая, 22 — мелкочешуйчатая

Следует различать понятия о структуре почвы как характерном морфологическом ее признаке от понятия структуры почвы в агрономическом смысле.

Как морфологический признак определенного типа почв, любая структура может быть признана характерной и хорошо выраженной, будь то структура зернисто-комковатая (для перегнойно-аккумулятивного горизонта — A_1 обыкновенных и тучных черноземов), ореховатая (для A_2 серых лесных земель, для горизонта B_1 дерново-подзолистых почв или горизонта C_1 почв каштановых), листоватая (для горизонта A_2 подзолистых почв), столбчатая (для иллювиального горизонта B_1 солонцов), плитчатая (для мелкоземистых аллювиальных почв) и т. д. (рис. 60).

В агрономическом понимании *положительной структурой является лишь мелкокомковатая и зернистая структура*, примерно в пределах агрегатов с диаметром 0,25—10 мм, по качеству *пористая, механически упругопрочная и водопроочная*, что обуславливает длительное сохранение структуры при повторных обработках почвы и после искусственного или естественного поверхностного ее увлажнения.

Здесь особо необходимо оттенить значимость *сочетания водопроочности агрегата и оптимальной его порозности*, так как в порах агрегата, как и на его поверхности, разветвляется в основном жизнь в почве. Например, в образцах лучшей структуры почв — в обыкновенном, мощном и тучном черноземах — пористость агрегатов достигает 50% к их объему и в то же время эти агрегаты водопроочны, так как коллоиды в них необратимо свернуты катионами кальция и железа. Но можно получить весьма водопроочные агрегаты другим путем — перемятием почвы в состоянии пасты и последующим агрегированием ее при перемешивании с давлением, как это рекомендовалось в работах Д. Г. Виленского (1934, 1940, 1945), И. П. Копосова (1937, 1938, 1939) и др. Созданные по этому методу агрегаты весьма водопроочны; они даже более водопроочны, чем в черноземе, но слабо пористы. Пористость их снижается до 35% и ниже, причем большая часть ее приходится на неактивные поры (см. главу V). Водопроочность таких агрегатов обусловлена в основном двумя причинами: а) большой площадью контакта между механическими элементами, а следовательно, наилучшими условиями для атомного и молекулярного притяжения частиц; б) затрудненным проникновением в агрегаты или полным отсутствием его для свободной гравитационной воды, размывающей структуру. Подобные агрегаты расплывутся в воде лишь после полного набухания скрепляющих их коллоидов. Структура этого типа агрономически неполноценна, так как поровое пространство агрегатов, в силу неактивных пор недоступная для свободных воды и воздуха, а также корней растений и микронаселения, оказывается в значительной мере омерщвленной. В природе такая структура встречается в иллювиальном горизонте солонцов и подзолистых почв, в слитых черноземах, в некоторых типах болотных почв.

Наряду с макроструктурой ($> 0,25$ мм) большое значение для оценки свойств почвы имеет ее микроструктура. Она также должна быть водопроочной и пористой. При этом наилучшие размеры микроструктуры соответствуют величинам зерен 0,25—0,05 и 0,05—0,01 мм. Такая микроструктура, будучи водопроочной, например в красноземах и желтоземах, сообщает положительные свойства макроагрегатам. Кроме того, она и непосредственно повышает влагоемкость почв, улучшает водо- и воздухопроницаемость их, играя как бы роль песчаных зерен и лёссовидной фракции. Однако она превосходит последние по качеству, так как в отличие от песчаных зерен и крупной пыли микроагрегаты обладают внутриагрегатной пороз-

ностью, где сосредоточиваются вода, микроорганизмы, корневые волоски.

В этой связи получают разъяснение вполне удовлетворительные свойства среднеазиатских сероземов, хотя макроструктура их выражена слабо. Обладая в достаточной мере коллоидной фракцией и будучи насыщены ионом Ca^{++} , эти почвы обладают прекрасно выраженной водопроходной микроструктурой в основном с размером зерен $> 0,01$ и $> 0,05$ мм, что обуславливает в них удовлетворительные величины влагоемкости, водо- и воздухопроницаемости. Но даже в этих аридных условиях весьма значительна роль и макроструктуры почвы. Об этом свидетельствует улучшение всех свойств почвы и повышение урожая хлопчатника в севооборотах с люцерной, которая является оструктуривающим фактором почв.

Неблагоприятны микроагрегаты размером средней пыли (0,01—0,005 мм). Они затрудняют водо- и воздухопроницаемость почвы, обуславливают ее припадливость, высокую испаряющую способность и другие отрицательные свойства.

Из сказанного явствует, что при оценке структуры нельзя ограничиваться только макроагрегатным анализом почвы, но необходимо проводить и микроагрегатный анализ, так как для свойств почвы, особенно физических свойств, очень важен качественный состав и микроагрегатов.

Следует также отметить, что не может быть стандартных размеров оптимальной структуры для всех почвенно-климатических зон. Чем сырее зона, тем оптимальный размер структурных агрегатов должен быть крупнее, приближаясь к 10 мм, чтобы обеспечить лучшую водо- и воздухопроницаемость, а для заболоченных территорий — и водоотдачу почвы. Наоборот, в засушливых и сухих зонах, где необходимо сохранять влагу и где аэрация почв в избытке, оптимальные размеры агрегатов приближаются к размеру зерен. Однако здесь может проявиться новый ограничивающий фактор, именно дефляция пахотного слоя. Так, по данным В. А. Франциссона (1959), для условий Северного Казахстана и Западной Сибири агрегаты с диаметром > 2 мм являются эффективным защитным противозрозийным слоем. Менее эффективна роль агрегатов, размер которых 1—2 мм, и совсем незначительна у агрегатов $< 0,5$ мм, так как последние, для условий черноземных почв, сравнительно легко переносятся ветром.

ГЕНЕЗИС СТРУКТУРЫ ПОЧВЫ

Взаимное осаждение коллоидов

Наиболее отчетливо, как уже отмечалось, структура выражена в почвах тяжелого механического состава — в средних и тяжелых суглинках, в глинах, что сопряжено с наличием в этих почвах механических элементов коллоидных размеров (частиц 0,2—0,1 мк).

Отсюда понятно, что все теории структурообразования в почвах опираются на свойства коллоидов, на закономерности поведения их в растворах и в первую очередь на свойство коллоидов коагулировать (слипаться) — переходить из состояния золя в состояние геля, что приводит к укрупнению частиц, к уменьшению запаса энергии системы, к выпадению частиц в осадок*.

Теории коагуляции коллоидов посвящены многие исследования. Еще в 1882 г. Шульце и в 1900 г. Гарди изучали природу осаждения некоторых коллоидных растворов электролитами. Выясненные ими закономерности в осаждающей силе разных ионов известны под именем правила Шульце — Гарди. Позже в этом направлении выполнены многие работы: К. К. Гедройца (1915 и последующие), Смолуховского (1916), Эренберга (1922), Вигнера (1926), Туорила (1926), А. Ф. Тюлина (1936), Маттсона (1938), И. Н. Антипова-Каратаева (1945), Б. В. Дерягина (1946 и последующие), Маршалла (1962) и др. Наибольшее распространение в советском почвоведении получили исследования К. К. Гедройца, впоследствии развитые и дополненные его учениками.

Как это было отмечено в главе V, коллоидные почвенные частицы в растворе в большинстве случаев несут электрический заряд, как разницу противоположных зарядов потенциал определяющего слоя (внутренняя обкладка мицеллы) и компенсирующих ионов, обуславливающую электрокинетический или дзета (ζ)-потенциал частицы. В случае одноименного заряда коллоидных частиц, особенно моодисперсных, они будут отталкиваться и коллоидный раствор приобретет характер устойчивого золя. Но, как известно, почва — среда полидисперсная и гетерогенная. Она содержит коллоидные частицы разных размеров и разноименных зарядов, например, отрицательно заряженные органические кислоты, силикаты, алюмо- и ферросиликаты и несущие в кислой среде положительный заряд гидраты окисей железа и алюминия — $\text{Fe}(\text{OH})_3$ и $\text{Al}(\text{OH})_3$. В этом случае разноименно заряженные коллоидные частицы будут взаимно притягиваться, нейтрализуя свои заряды. Сольватные оболочки, окружающие частицы в точках их соприкосновения, сжимаются до размеров, при которых вступают в действие силы Ван-дер-Ваальса** и остаточных валентностей, и частицы слипаются. Это будет взаимная коагуляция коллоидов. Слипание частиц происходит и при их столкновении в броуновском движении. Чем выше кинетическая энергия частиц, тем легче преодолевают они силы, препятствующие слипанию, — главным образом расклинивающее действие сольватных оболочек.

* Термин «коагуляция» произведен от латинского слова *coagulatio*, что значит свертывание, сгущение.

** Ван-дер-Ваальсовы силы — силы притяжения между незаряженными атомами или молекулами, относительно малые в сравнении с силами химическими (валентными).

Как показали исследования Б. Аарнио (Aarnio B., 1913) и В. Н. Симакова (1928), для взаимной коагуляции коллоидов требуется определенное соотношение в золе коллоидных частиц с разноименными зарядами. В случае значительного преобладания частиц одного заряда процесс коагуляции может прекратиться и золь получает устойчивые формы. Например, при наличии в коллоидном растворе отрицательно заряженных гумусовых кислот и положительно заряженного $\text{Fe}(\text{OH})_3$ будет наблюдаться взаимное осаждение коллоидов. Но в случае значительного преобладания $\text{Fe}(\text{OH})_3$ избыток его, оседая на скоагулированные частицы органических кислот после нейтрализации их заряда, сообщит им положительный заряд, после чего они не могут быть коагулируемы другими положительно заряженными коллоидными частицами. Это явление получило название защитного действия коллоидов. В приведенном примере $\text{Fe}(\text{OH})_3$ «защищает» органические коллоиды от коагуляции.

Некоторые коллоиды, как отмечалось в шестой главе, например $\text{Fe}(\text{OH})_3$ и $\text{Al}(\text{OH})_3$, способны перезаряжаться в зависимости от реакции среды, что связано с различным характером отдиссоциирования ими ионов в кислой и щелочной средах. Это будут амфотерные коллоиды или амфолитоиды. В зависимости от знака заряда они в процессе коагуляции могут осаждать то отрицательно, то положительно заряженные коллоидные частицы.

Начинается процесс коагуляции с образования первичных микроагрегатов. Но так как коагуляция коллоидных частиц редко наблюдается в изoeлектрической точке, то первичные микроагрегаты сами могут сохранять остаточный заряд — положительный или отрицательный — и в случае разноименной зарядки будут взаимно притягиваться, образуя микроагрегаты второго, третьего и т. д. порядков, включительно до мелких зерен. В схеме этот процесс представлен на рисунке 61. Многофазность процесса структу-

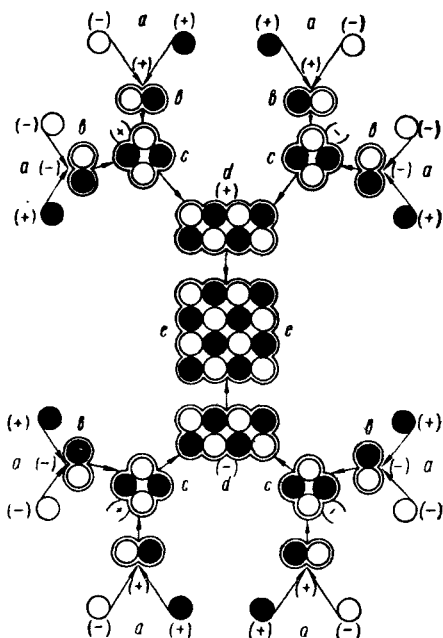


Рис. 61. Схема образования микроагрегатов при коагуляции коллоидов: *a* — исходные коллоидные частицы и ионы диссоциировавших электролитов; *b* — микроагрегаты первого порядка; *c* — микроагрегаты второго порядка; *d* — микроагрегаты третьего порядка; *e* — микроагрегаты четвертого порядка.

рообразования почвы подтверждается рядом наблюдений. Так, прочность структурных отдельностей и водопрочность их возрастают по мере движения от комков и зерен к микроагрегатам почвы, которые образовались (см. рис. 61) при более высоком электрокинетическом потенциале входящих в них компонентов при разноименных их зарядах.

М. Н. Польскому (1952) удалось показать методом почвенных шлифов гнездовой характер строения агрегатов по мере увеличения размеров их от первичных микроагрегатов к более крупным (см. рис. 44, 62, 63).

Коагуляция коллоидов под влиянием электролитов

Гораздо чаще, нежели процесс взаимного осаждения коллоидов, коагуляция их наблюдается под воздействием ионов, диссоциировавших электролитов, преимущественно катионов. Процесс этот более сложен, чем взаимное осаждение коллоидов. Изучению именно этого процесса посвящено большинство работ вышеназванных исследователей коллоидных систем, а также А. И. Робиновича, В. А. Каргина, В. Н. Крестинской и др.

Оттением наиболее вероятные пути воздействия электролитов на коллоидные растворы.

Защитными факторами коллоидных частиц являются одноименный электрический их заряд и обладающие повышенной вязкостью сольватные оболочки, окружающие частицы. В соответствии с этим обращает на себя внимание тот факт, что в большинстве случаев (так как основная масса частиц твердой фазы почвы заряжена отрицательно) устойчивость коллоидов возрастает с увеличением ζ -потенциала.

Введение электролита в коллоидный раствор изменяет эти условия. Вследствие повышения осмотического давления дисперсионной среды уменьшается толщина двойного электрического слоя в коллоидных мицеллах; сжимается его диффузная часть. Положительно заряженные ионы — катионы диссоциировавшего электролита устремляются к отрицательно заряженным почвенным частицам, внедряются в диффузный слой, замещают поглощенные ионы, а также могут вступать с ними в различные побочные реакции. Вследствие этого отдиссоциация компенсирующих ионов мицеллы в дисперсионную среду подавляется, ζ -потенциал частиц снижается до критического потенциала (ζ кр.), приближающегося к нулю. Коллоидные частицы, лишенные или почти лишенные зарядов, при столкновениях преодолевают сопротивления утонченных сольватных оболочек и слипаются в первичные микроагрегаты (коагулируют). Наименьшая концентрация электролита, при которой за короткий промежуток времени наблюдается коагуляция коллоидного раствора, носит для данного электролита название порога коагуляции. Порог коагуляции для данной



Рис. 62. Чернозем обыкновенный террасовый суглинистый иловато-пылеватый, гор. A_n (люцернице). Микроагрегат рыхлой упаковки. Видны:

1 — первичные микроагрегаты; 2 — органический цемент; 3 — кристаллы минеральных пород; 4 — микропора (шлиф и зарисовка М. Н. Польского)

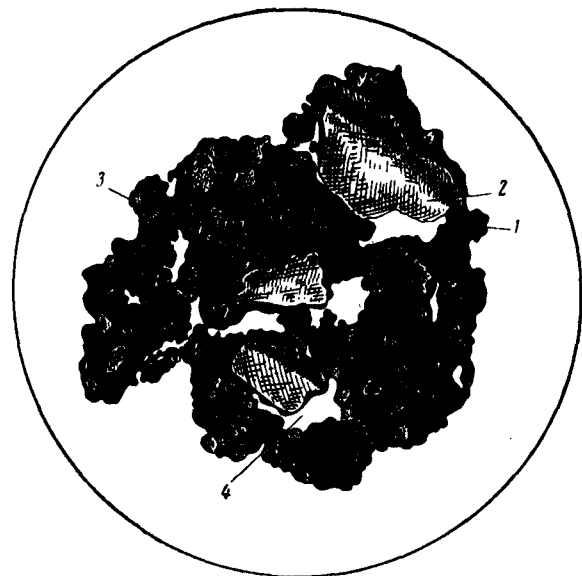


Рис. 63. Чернозем обыкновенный террасовый суглинистый иловато-пылеватый, A_n (люцернице). Сложный агрегат высших порядков. Видны:

1 — микроагрегаты первых порядков; 2 — кристаллы минеральных пород; 3 — органический цемент; 4 — видимые микропоры

коллоидной системы у разных электролитов разный. Так, например, у солей щелочных металлов, имеющих общий анион, значения величин порогов коагуляции располагаются в лиотронный ряд: $\text{Li}^+ > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Rb}^+ > \text{Cs}^+$. Он изменяется также для данного электролита применительно к различным коллоидным растворам. Не всегда, однако, увеличение концентрации электролита сверх порога коагуляции ускоряет процесс коагуляции. Здесь могут наблюдаться и обратные явления. Это особенно касается трех- и четырехвалентных катионов, а также ионов H^+ и OH^- . Увеличение их концентрации сначала снижает электрокинетический потенциал

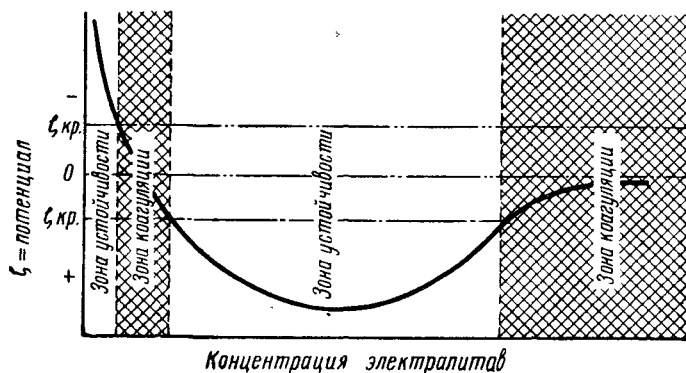


Рис. 64. Изменение ζ -потенциала и зоны устойчивости коллоидного раствора в случае неправильных рядов коагуляции (по Фуксу)

коллоидной системы и усиливает коагуляцию коллоидов. При дальнейшем увеличении концентрации электролита наступает перезарядка коллоидов и резкое увеличение их ζ -потенциала. Коллоидный золь приобретает устойчивость, которая снова сменяется зоной коагуляции при дальнейшем увеличении концентрации электролита (рис. 64). Это явление получило название явления зон, или неправильных рядов коагуляции.

Гедройц на основе эксперимента отмечал зону неосаждаемости почвенных коллоидов под влиянием FeCl_3 в пределах 0,01—0,001 н. раствора. Механизм действия здесь таков: при концентрации FeCl_3 0,001 н. раствора положительно заряженный ион Fe^{3+} коагулирует отрицательно заряженные коллоиды. При дальнейшем увеличении концентрации FeCl_3 в растворе образуется $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Гидрат окиси железа нейтрализует отрицательно заряженные коллоидные частицы и, абсорбируясь на их поверхности, сообщает им положительный заряд. В таком состоянии эти частицы могут быть скоагулированы лишь анионом раствора Cl^- , для чего концентрация электролита должна возрасти до соответствующего электролитического порога коагуляции в 0,01 н. FeCl_3 .

Используя правило Шульце — Гарди, и на основе своих многочисленных экспериментов Гедройц так сформулировал основное положение о коагулирующей силе катионов применительно к почвам: *она возрастает вместе с валентностью катионов, а в каждой группе вместе с атомным их весом: $\text{Fe}^{3+} > \text{Al}^{3+} > \text{Ba}^{2+} > \text{Sr}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Li}^+$* .

В этом ряду, как известно, наблюдается аномалия, согласно которой ион водорода из первой группы и с наименьшим атомным весом обладает силой коагуляции большей, нежели кальций. Эта аномалия была объяснена уже после работ Гедройца на основе учения о ионном радиусе и степени гидратации ионов (Гольдшмидт, Паулинг, Нигли, Ферсман и др., 1937, 1952—1953) (табл. 43). С учетом этих работ правило Гедройца формулируется так: *коагулирующая сила катионов возрастает вместе с их валентностью, а в каждой группе элементов она находится в прямой зависимости от атомного веса элемента и в обратной зависимости от степени его гидратации.*

Таблица 43

Ионные радиусы (r) некоторых катионов; степень и энергия их гидратации (V) в слабо щелочной или нейтральной среде (по Гольдшмидту) *

Элементы	H^+	K^+	Na^+	Li^+	Ba^{2+}	Sr^{2+}	Ca^{2+}	Mg^{2+}
Показатели								
$r - \text{\AA}$	1,54	1,33	0,98	0,78	1,43	1,27	1,06	0,78
$v - \text{кк/г-ион}$		80	98	121	312	338	375	—

* Вопрос о степени гидратации ионов не имеет до настоящего времени однозначного решения. См. по данному вопросу: Н. И. Горбунов. Поглотительная способность почв и ее природа. М., Изд. АН СССР, 1948, стр. 24; А. А. Роде. Почвенная влага, М., Изд. АН СССР, 1952, стр. 36.

Ион водорода оказался «голым» ионом. Он гидратирован лишь одной молекулой воды, тогда как другие катионы 1-й и 2-й групп гидратированы десятками водных молекул, причем в каждой группе степень гидратации ионов возрастает по мере уменьшения их ионного радиуса (см. табл. 43).

Обладая наибольшим ионным радиусом и наименьшей степенью гидратации, ион водорода отличается тончайшей сольватной оболочкой и в то же время высоким напряжением электрического поля на ее поверхности. Он может подойти к противоиону или коллоидной мицелле на более близкое расстояние, нежели ионы с мощными гидратными оболочками. А взаимодействие между ионами и заряженными частицами согласно закону Кулона прямо про-

порционально их зарядам и обратно пропорционально квадрату разделяющего их расстояния.

Следует заметить, что правило Гедройца о коагулирующей силе катионов справедливо лишь для условий кислой среды. Маттсон (1938), Тоурила (1926—1928) и другие показали возможность обращения ряда Гедройца в щелочных условиях. Например, для кислой среды имеем ряд по силе коагуляции: $Ba^{2+} > Sr^{2+} > Ca^{2+} > Mg^{2+}$, а для щелочной: $Mg^{2+} > Ca^{2+} > Sr^{2+} > Ba^{2+}$, что сопряжено с различной растворимостью в воде гидратов окисей означенных катионов. $Mg(OH)_2$ — наименее растворим в воде. Выпадая в осадок, он выводит из раствора OH^- , т. е. ион, обладающий наибольшей способностью диспергировать отрицательно заряженные коллоиды, которые в почве преобладают, и тем самым способствует коагуляции раствора.

В дисперсных системах следует выделять активную и пассивную части. Активная часть, слипаясь и коагулируя, может захватывать в сферу коагуляции более грубые суспензии и склеивать их. Склеивание более грубых суспензий может наблюдаться и в том случае, когда поверхность их покрыта коллоидной пленкой (А. Ф. Тюлин, 1941, И. Н. Антипов-Каратаев, 1948, П. В. Вершинин, 1959, и др.). К активному мелкозему Гедройц относил лишь коллоиды, т. е. частицы $< 0,1$ мк. В работах последнего времени доказано, что способностью коагулировать в слабых солевых растворах и клеящей способностью обладают и значительно более крупные частицы, вплоть до размеров 5 мк (П. Ф. Мельников, 1949, Е. И. Кочерина, 1954, А. И. Личманова, 1961 и др.).

Интенсивность коагуляции коллоидного раствора повышается при умеренном взбалтывании его, перемешивании, течении. В этих случаях возрастает шанс столкновения коллоидных частиц, особенно при выраженной их полидисперсности и гетерогенности. Крупные частицы в гетерогенных растворах служат центрами, к которым прилипают мелкие; оседая, крупные частицы увлекают мелкие, повышая вероятность столкновения их в определенном направлении и ускоряя слипание, — это будет ортокинетическая коагуляция частиц различных размеров.

Менее интенсивно происходит слипание и коагуляция раствора монодисперсных частиц, шанс вероятности столкновения которых одинаков по всем направлениям, — это будет перикинетическая коагуляция, протекающая более медленно, нежели ортокинетическая. Во всех случаях коллоидные частицы, имеющие форму палочек, пластинок и вообще более угловатую форму, коагулируют быстрее, нежели частицы гладкие и имеющие сферическую форму. Это сопряжено с более сильной поверхностной энергией первых частиц по сравнению со вторыми (см. об этом в главе V).

Ранее было показано, что коагулирующая сила различных катионов неодинакова: она тем меньше, чем выше степень гидрата-

ции иона и чем меньше его электрический заряд. В соответствии с этим и прочность коагелей различна. Например, коагель, образовавшийся при воздействии катионов Ca^{2+} или Fe^{3+} , будет весьма устойчивым. Созданные с участием его агрегаты почвы длительно не распадаются в воде даже после того, когда катион, вызвавший коагуляцию коллоидов, удален из раствора. По Гедройцу, это будет необратимая коагуляция коллоидов. Наоборот, коагель, полученный в результате свертывания коллоидов ионом Na^+ , неустойчив в воде; после удаления из раствора Na^+ он снова пептизируется. Агрегаты почвы, скрепленные таким коагелем, неводопрочны. При воздействии воды, после набухания, они быстро в ней распливаются. Это пример обратимой коагуляции.

Описанные свойства коллоидных систем вскрыты в основном в лабораторных условиях для растворов большого разведения. Однако можно полагать, они имеют самое широкое приложение к структурообразованию в почве. Основное возражение, которое делается против данной теории в приложении к почве, сводится к утверждению, что подобный процесс возможен лишь при коагуляции суспензий в растворах и что в почве для развертывания его нет пространства. Нам такое возражение кажется неубедительным. Следует не забывать, что в среднем половина объема почвы представлена порами, размеры которых в большинстве случаев в сотни и тысячи раз превосходят величину коллоидных частиц и микроагрегатов (к последним Гедройц относит структурные отдельности диаметром $< 0,25 \text{ мм}$). Кроме того, необходимо отметить, что мелкозернистая структура, которая получается в процессе слипания и коагуляции коллоидных мицелл под влиянием сил Ван-дер-Ваальса и остаточных валентностей, характерна в основном для поверхностного перегнойно-аккумулятивного горизонта почв и пахотного слоя. А в этих слоях во всех почвенных зонах наблюдаются периоды высокой смоченности почвы и более широко представлена динамичность в передвижении солей, почвенных частиц и агрегатов, особенно при обработке почв, что усиливает процесс коагуляции коллоидов и структурообразование.

Как показали исследования П. А. Костычева (1886), В. Р. Вильямса (1915), К. К. Гедройца (1926), Е. А. Митчерлиха (1923), Е. В. Рассела (1938), А. Н. Соколовского (1938), А. Ф. Тюлина (1936), И. В. Тюрина (1937), В. В. Геммерлинга (1946), М. М. Кононовой (1947), Н. А. Качинского (1947), И. Н. Антипова-Каратаева (1948), Е. П. Троицкого (1952), С. А. Владыченского (1952), А. Н. Александровой (1953), А. А. Роде (1955), В. В. Пономаревой (1956), Т. Д. Маршалла (1962) и др., агрономически наиболее добротная структура в процессе коагуляции получается при условии, что в нем принимают участие как компоненты органические вещества типа гуминовых кислот и катионы Ca^{++} и Fe^{+++} .

Особенно интенсивное образование структуры отмечается в ризосфере корней растений за счет «деятельного перегноя» в форме комп-

лексных соединений из азотсодержащих продуктов автолиза тел бактерий и уоновых кислот, которые, по данным Рудакова, образуются за счет живых и отмерших корней растений пектиноразрушающими или протопектиназными бактериями, обнаруживаемыми в почве преимущественно на разлагающихся растительных остатках (Ф. Ю. Гельцер, 1946, К. И. Рудаков, 1949, 1953, А. Ф. Тюлин, 1958). Агрегаты при этом получаются механически прочные, водопрочные и, что весьма важно, пористые, как, например, в черноземе, где пористость агрегатов всегда выше 40% к их объему, а в лучших его образцах достигает 50% (см. рис. 42). Это в агрономическом

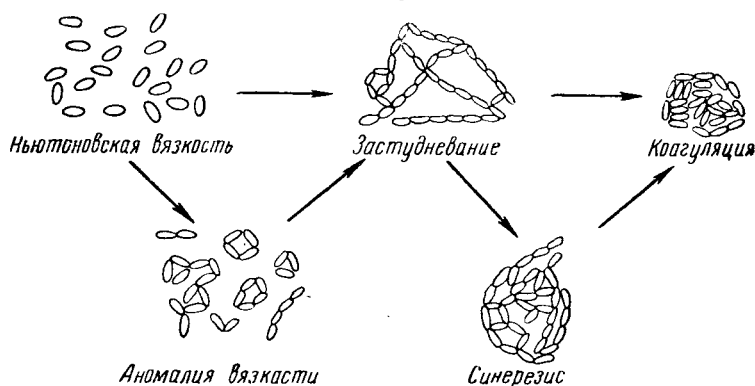


Рис. 65. Схема агрегирования частиц при коагуляционном желатинировании и синерезисе

понимании — высокоценная структура. Прочность и водопрочность ее сочетаются с высокой порозностью и базируются на свойстве необратимой коагуляции коллоидов.

По мнению отдельных исследователей, органические кислоты типа гуминового и ульминового комплексов как высокомолекулярные соединения могут самостоятельно необратимо коагулировать и цементировать почвенную структуру в процессе денатурирования (Вильямс) или желатинирования, застудневания (Тюрин и др.). На рис. 65 показан возможный ход этого процесса.

Роль химических, физических и биологических процессов в повышении прочности и водопрочности структурных агрегатов

Микроагрегаты и агрегаты, образовавшиеся в процессе коагуляции, в дальнейшем могут упрочняться различным путем. В частности, как показано исследованиями в самые последние годы, механическая прочность и водопрочность агрегатов может возникать и возрастать, как следствие химических процессов, протекающих в почвах при сменных режимах (Н. А. Качинский, А. И. Мосолова, 1950—1958; Н. И. Горбунов и Р. В. Ковалев, 1953). Типичной

в этом отношении является зернистая структура центральных пойм и ряда перегнойно-болотных почв, которые попеременно переживают периоды переувлажнения и просушивания. При переувлажнении в почве развиваются раскислительные процессы, сопровождающиеся образованием растворимых в воде закисных форм железа, которые вместе с почвенным раствором пропитывают агрегаты. В засушливый сезон, при опускании грунтовых вод или верховодки, просыхающие слои почвы аэрируются, закисное железо переходит в нерастворимые формы окисного железа, которые цементируют агрегаты.

Такую структуру мы исследовали (1949—1950) на рисовых полях Талыша Азербайджанской ССР и в других местах. Она обладает высокой механической прочностью и водопрочностью, но агрегаты при этом мало пористы (порозность $< 40\%$), так как часть объема пор постепенно заполняется $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Во многих случаях в качестве цемента агрегатов наблюдался CaCO_3 при образовании его из бикарбоната кальция по реакциям: $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ (при подсыхании почвы) или $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 + \text{CaO} \rightarrow 2\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ (при инфильтрации раствора с бикарбонатом кальция в горизонты с избытком CaO).

При удобрении почв суперфосфатом и преципитатом цементом почвенных агрегатов может стать $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ при образовании его из растворимых форм фосфатов — CaHPO_4 или $\text{CaH}_2(\text{PO}_4)_2$. Результат интересного полевого опыта на эту тему был доложен в 1-й комиссии VII Международного конгресса почвоведов в США американцами Лутза, Лагосом и Хильтоном.

В оптимально смоченных почвах оструктурирующими факторами выступают также капиллярные (менисковые) силы и связанная почвой вода. Структурообразующая роль их сказывается и при высыхании почвы, так как при этом мениски и адсорбированная вода способствуют сужению капилляров, сближению механических элементов, после чего сильнее проявляются атомные и молекулярные силы межчастичного притяжения (см. рис. 41 и 66).

Особо большое значение капиллярный механизм играет при агрегировании легких почв, например рассычатые пески приобретают связность лишь во влажном состоянии.

Об оптимальной влажности при обработке почвы, а также о роли промораживания и просушивания почвы будет сказано ниже.

Водопрочность агрегатов возрастает при склеивании механических элементов слизью разнообразных бактерий из группы клубеньковых, азотобактера и *Pseudomonas*, скрепления их гифами грибов (например, *Trichoderma lignorum*) и сетью корней растений (Н. А. Качинский, 1934, И. И. Канивец, 1939, Ф. Ю. Гельцер, 1940, Е. Н. Мишустин, 1943, и др.).

Общезвестна также со времен Дарвина в оструктурировании почв роль дождевых червей, которые перерабатывают массу почвы

в желудочном тракте и выбрасывают ее в форме пористых зерен губчатого строения, склеенных желудочным соком червей — кап-ролитов (рис. 67, 68, 69).

Агрегаты почвы, образованные при участии биологических процессов, ценны не только тем, что они водопрочны и пористы, но и богатством запаса в них питательных веществ.

Названные нами процессы оструктурирования почв проявляются обычно в совокупности их. Разделение этих процессов, как сделано в настоящей главе, можно понимать лишь в том смысле, что в каж-

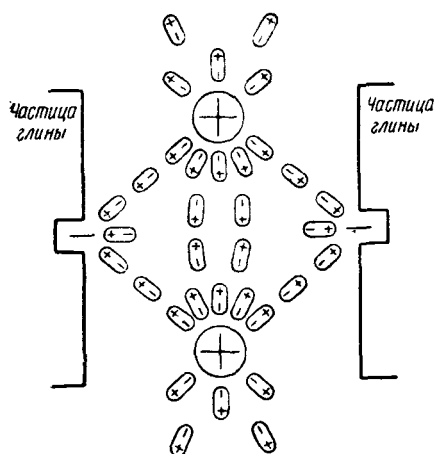


Рис. 66. Схема связи между частицами глины при их агрегировании при участии адсорбированной воды (по Расселю)



Рис. 67. Земляная башенка из выбросов червей на полях Индии (по рисунку Ч. Дарвина. Увеличено в два раза)

дом конкретном случае в оструктурировании почв превалирует то один, то другой процесс или несколько из них.

Описанные процессы взаимной коагуляции коллоидов, взаимодействия коллоидов с электролитами, химические, физические и биологические факторы упрочнения образовавшейся структуры и другие касались преимущественно микроагрегатов почвы. Именно в понимании механизма возникновения и стабилизации микро-структуры почвы состоят основные теоретические трудности. Решая их, мы одновременно решаем и основную проблему качества макро-структурных отделностей почвы, так как свойства этих отделностей в большой степени зависят от качества слагающих их микроагрегатов.

Помимо химизма процессов, генезис макроагрегатов тесно сопряжен с чередующимися увлажнением и высушиванием почвы



Рис. 68. Капролиты червя на поверхности дерново-подзолистой почвы (фото П. У. Бахтина)

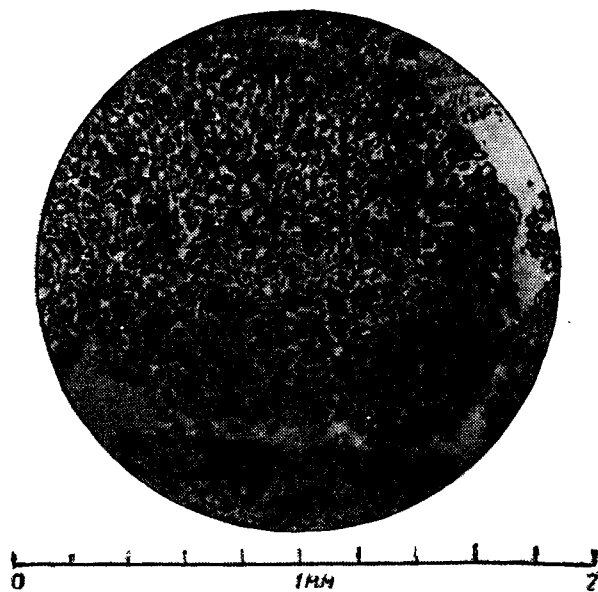


Рис. 69. Поперечный разрез капролита (шлиф и фото М. Н. Польского)

(набухание при увлажнении и растрескивание при сжатии), с промораживанием и оттаиванием почв в различной стадии увлажнения; с расчлняющей и уплотняющей почву деятельностью корневой системы растений, особенно крупных корней, с деятельностью землероев, а на культурных угодьях прежде всего и с обработкой почвы. В совокупности влияния всех этих факторов и создаются многообразные формы макроагрегатов почвы (см. рис. 60).

Зная теоретические основы структурообразования, можно объяснить особенности природной структуры почв разного типа. Например, наиболее совершенно выраженная комковато-зернистая структура черноземов обусловлена богатством их органическими и минеральными коллоидами с преобладанием кислот гуминового и ульминового комплекса и катионом кальция. Этому способствовали: материнская горная порода — лёсс с высоким содержанием минеральных коллоидов и извести; разнотравная богато развитая растительность, обладающая мощной, хорошо разветвленной корневой системой; деятельность дождевых червей и насекомых; периодическое просушивание и промораживание почвы и другие процессы, о чем будет сказано ниже.

При движении от черноземной зоны на юго-восток и север отмечается ухудшение структуры почвы. В каштановой зоне оно вызвано меньшей обогащенностью почвы минеральными и особенно органическими коллоидами, а также появлением в поглощающем комплексе почвы иона натрия, обладающего низкой коагулирующей способностью. Менее интенсивно здесь воздействие на структуру почвы и биологических факторов, особенно травянистой растительности, которая развита в каштановой зоне значительно слабее, нежели в черноземной, и не образует сомкнутого травянистого покрова.

В подзолистой зоне травянистая растительность черноземных степей сменяется в основном древесной растительностью, дающей иной материал для гумусообразования — богатый смолами, дубильными кислотами. Разложение органических веществ здесь преимущественно грибное. Гумус и минеральные коллоиды из верхних горизонтов почвы в значительных количествах вымываются вместе с инфильтрационными водами. В результате в почве отмечается низкое общее содержание перегноя с преобладанием в нем фульвокислот. В минеральной части обычно преобладают пассивные механические элементы — песок и пыль; илистая фракция имеет подчиненное значение. Беден поглощающий комплекс почвы. В нем и в почвенном растворе незначительно содержание катиона кальция. В них присутствует катион водорода — сильный коагулятор, однако концентрация его в растворе много ниже, нежели концентрация иона кальция в почвенном растворе черноземов. Ранней весной и поздней осенью эта почва испытывает периоды переувлажнения.

В результате структура перегнойно-аккумулятивного горизонта подзолистых почв, особенно после их распашки, морфологически

выражена нечетко. Прочность, порозность и водопрочность ее значительно слабей, нежели в черноземах.

Смена условий структурообразования наблюдается не только при переходе из одной почвенной зоны в другую, но и в пределах одной зоны у разных подтипов почвы (табл. 44).

Таблица 44

Количество водопрочных агрегатов крупнее 0,25 мм в перегнойном гор. А в %
(по Н. И. Саввинову, совх. «Гигант» Ростовской обл.)

Почва		0—15 см	15—30 см
Мощный карбонатный тяжелосуглинистый чернозем	Целина	74,8	72,1
	Старопашка	57,6	70,3
Средний карбонатный тяжелосуглинистый чернозем	Целина	60,0	67,4
	Старопашка	39,2	59,3
Маломощный (южный) карбонатный тяжелосуглинистый чернозем	Целина	52,5	59,7
	Старопашка	29,4	54,5

Из таблицы следует, что оструктуренность почвы падает в направлении от чернозема мощного к чернозему южному. Это обусловлено уменьшением гумозности почв, содержания в них коллоидов и емкости поглощения в том же направлении. Из таблицы видно также, что при интенсивной распашке почв структура пахотного слоя ухудшается. Ее периодически нужно восстанавливать с помощью трав, органических и минеральных удобрений, полимеров и др.

Проведя подробный анализ условий и факторов почвообразования, можно объяснить характер структуры любой почвы и ее горизонтов и наметить мероприятия по искусственному изменению структуры в нужном для нас направлении.

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ НА СВОЙСТВА ПОЧВЫ

В зависимости от того, в каком состоянии, агрегатном или раздельночастичном, находится почва, по-разному будет выражена ее скважность. При раздельночастичном состоянии в почвах тяжелого механического состава подавляющее число пор представлено тонкими капиллярами с просветом скважин в десятые, сотые и тысячные доли миллиметра.

В случае агрегатного комковато-зернистого строения почвы в ней неизбежно образуются поры резко различного характера — от самых тонких капилляров — в комках, зернах и на их стыках —

до более крупных пор с диаметром в несколько миллиметров, а иногда и еще больше. Диапазон размеров пор в этом случае будет зависеть, как это описано в главе V, от величины комков и зерен, от характера упаковки (укладки) механических элементов в агрегатах, а также от плотности укладки самих агрегатов. Различие характера пор в почве в зависимости от структурного или бесструктурного ее состояния хорошо иллюстрируется рисунком 70.

Совершенно очевидно, что различный характер пор в структурной и бесструктурной почвах должен в первую очередь обусловить

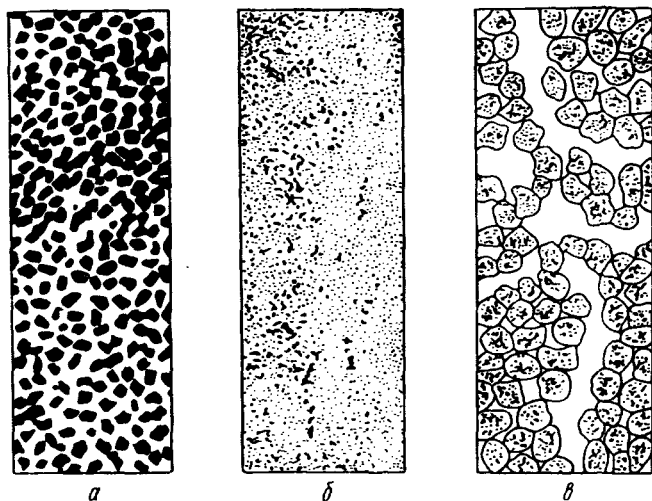


Рис. 70. Сквозность различных почв (по А. Стебуту):
а — песчаная почва — все поры крупные; *б* — бесструктурная глина, все поры тонкокапиллярные; *в* — структурная глинистая почва, между комками поры крупные, в комках — мелкие, капиллярные

различие и других физических свойств и режимов почвы: тепловых, водо- и воздухопроницаемость, влагоемкость, водоподъемную и испаряющую способность, а значит, и влажность почв, и др.

А так как водный, воздушный и тепловой режимы определяют характер процессов выветривания и синтеза в почве и условия развития в ней живого населения, то ясно, что вся совокупность почвенного процесса в структурной и бесструктурной почве тяжелого механического состава будет протекать по-разному. Данное положение можно подтвердить многочисленными примерами советских и зарубежных ученых. *Во всех случаях на почвах одного типа, одной генетической разности и в сходных агротехнических условиях структурная почва всегда характеризуется более благоприятными для сельскохозяйственных культур показателями, нежели бесструктурная или малоструктурная.* Здесь мы ограничимся приведением лишь немногих примеров.

В главе IV, в таблице 32, сопоставляется общая порозность различных почв, причем для сравнения на разных почвах взято одно и то же угодье — стерня зерновых культур. Структурность сравниваемых почв, по многочисленным данным разных авторов, ухудшается от черноземов к серым лесным землям и потом к подзолистым, а также от чернозема — к каштановым почвам. Как следует из таблицы 32, эта закономерность строго выдерживается и в характере порозности почв в профиле их до 200 см. В пахотном слое имеем ход порозности в % к объему почвы: дерново-подзолистая — 48,84; серая лесная — 50,38; чернозем обыкновенный — 57,44; каштановая солонцеватая — 51,55%.

Общая влагоемкость этих почв в весовых % соответственно была равна: 1-я — 28,5; 2-я — 32,6; 3-я — 38,4; 4-я — 29,1*.

В той же главе в таблице 36 и на рисунке 42 сопоставляется дифференциальная порозность еще более контрастных по типу и структурности почв: чернозема выщелоченного комковато-зернистого (в горизонте A_1), солонца ореховато-глыбистого и дерново-подзолистой почвы, характеризующейся в пахотном слое комковато-пылеватой структурой. Все три типа почв сравниваются в зацелинившемся состоянии. Как следует из приведенных данных, особенно для горизонта A_1 , по всем категориям порозности, если оценивать их по степени благоприятствования сельскохозяйственным культурам, резко выделяется чернозем. В A_1 — общая порозность его в % к объему почвы $> 60\%$; а в агрегатах $> 50\%$; поры обводнения в A_1 — свыше 40% ; причем поры аэрации составляют около 20% к объему почвы и около $1/3$ к общей порозности.

Резко отличны показатели дифференциальной порозности ореховато-глыбистого солонца: общая порозность его в толще $0-19$ см — около 50% ; порозность агрегатов — около 35% ; поры обводнения при общей влагоемкости почвы составляют около 40% ; но из них на капиллярную воду падает лишь 27% . Особо плохо представлена в этой почве во влажном ее состоянии порозность аэрации: в горизонтах A_1 и B_1 она уменьшается до $6-9\%$ к объему почвы или $14-18\%$ к общему объему пор.

Среднее место по качеству порозности среди сравниваемых почв занимает дерново-подзолистая почва, которая и по характеру структуры в пахотном слое значительно хуже чернозема, но более благоприятна, чем в солонце.

Можно высказать замечание, что в приведенных примерах сравниваются по структуре различные почвы, поэтому в дальнейшем мы приведем примеры в каждом случае для одного и того же типа почвы, но в разном структурном состоянии (рис. 71, табл. 45).

* Под общей влагоемкостью мы понимаем максимальное количество воды в почве в весовых или объемных процентах, которое она может удерживать в себе после длительного дождя или искусственного полива и после стекания из смоченных горизонтов или слоев свободной гравитационной воды.

Воздухопроницаемость агрегатов дерново-подзолистой почвы в зависимости от их крупности и степени увлажнения
(по А. Г. Дояренко) *

Размер агрегатов, мм	Относительная влажность почвы					
	почва сухая	20,2	38,4	62,3	84,8	100
>2	100	100	96,4	98,5	100	74,2
2—1	96,4	93,8	94,8	100	95,6	55,2
1—0,5	97,2	95,4	92,8	94,1	99,0	60,1
0,5—0,25	85,3	45,2	14,1	0	0	0
<0,25	43,4	10,2	0	0	0	0

* Прибор А. Г. Дояренко для определения воздухопроницаемости почвы см. во II части «Физики почвы».

На рисунке 71 видно, что лучше оструктуренная почва из-под многолетних трав второго года пользования оказывается более водопроницаемой и водопрочной, нежели почва из-под ржи, хотя последняя шла по черному пару.

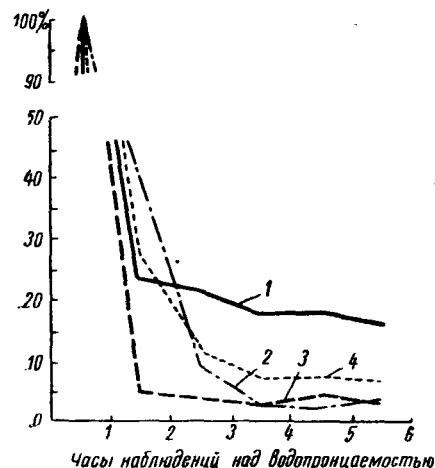


Рис. 71. Водопроницаемость и водопрочность агрегатов дерново-подзолистой суглинистой почвы из гор. А₁ в %. Московская обл., колхоз «Красноармеец». Метод определения Фадеева — Вильямса:

1 — клевер + тимофеевка 2 г. п.; 2 — клевер + тимофеевка 1 г. п.; 3 — рожь; 4 — лес лиственный

Из данных таблицы 45 отчетливо следует резкое различие воздухопроницаемости почвы в зависимости от крупности составляющих ее агрегатов и от степени увлажнения почвы. Четкая граница выявляется для агрегатов крупнее и мельче 0,5 мм: агрегаты > 0,5 мм сохраняют высокую воздухопроницаемость даже при насыщении водою до «полной» (по Дояренко) влагоемкости; в остальных интервалах смоченности до относительной влажности 85% воздухопроницаемость их при «открытой» капиллярной системе близка к 100%.

Резко снижается воздухопроницаемость почв в агрегатах < 0,5 и особенно < 0,25 мм. В почве, представленной этими агрегатами, заторможена воздухопроницаемость даже в сухом состоянии. При смачивании ее быстро возникает «замкнутая» капиллярная система,

в силу чего в агрегатах диаметром 0,5—0,25 мм воздухопроницаемость прекращается при относительной влажности в 62,3%, а в агрегатах диаметром < 0,25 мм при относительной влажности в 38,4%. Эти пределы установлены для малостойких агрегатов дерново-подзолистой почвы. В других почвах, например в черноземах, они будут иными. Но факт резкого различия воздухопроницаемости почвы в зависимости от ее структуры очевиден.

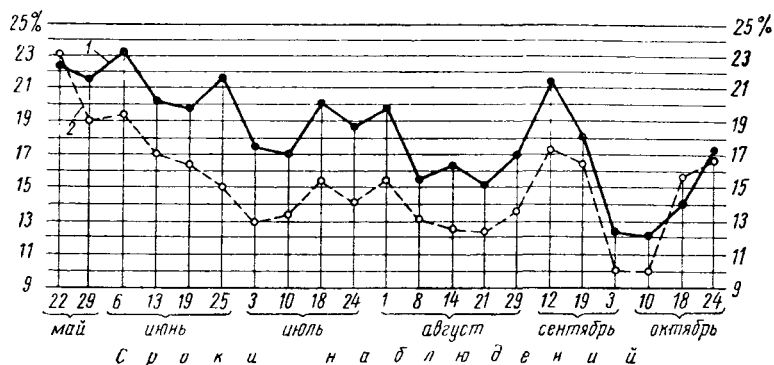


Рис. 72. Влажность дерново-подзолистой суглинистой почвы на раннем паре в % сухой почвы. Собакино опытное Московской области. Вершина склона, 1924:

1 — нормальный пар, 2 — распыленный пар

Характер структуры почвы и степень ее уплотнения сильно влияют на водоподъемную и испаряющую способность почв, а в конечном счете и на их влажность (табл. 46 и рис. 72).

Таблица 46

Испарение воды сероземом типичным, орошаемым в зависимости от структуры верхнего слоя, в г за период с 16/VIII по 14/X—1947 г. Ташкентская обл., правобережье р. Чирчик (по данным Б. Д. Михайлова)

Диаметр агрегатов верхнего слоя, мм	Толщина агрегатного слоя, см		
	5	10	15
<0,25	4250	3550	2750
2—3	2850	2250	1600
10—15	4350	2350	2000

Опыт Михайлова поставлен на орошаемом участке в испарителях без дна. Диаметр испарителей 35 см, высота 100 см. В начале опыта почва увлажнялась до «полевой» (общей) влагоемкости.

Расход воды на испарение учитывался путем периодического взвешивания лизиметров — испарителей. Работа выполнена с двойным контролем.

Как следует из таблицы, наименьшее испарение отмечено в лизиметрах, где верхний слой почвы состоял из структурных отдельностей с диаметром 2—3 мм, причем, чем толще был структурный слой, тем меньше была испаряющая способность почвы.

Мелкие агрегаты (< 0,25 мм), как и глыбистые (10—15 мм), по сравнению со структурными отдельностями в 2—3 мм, обуславливали большее испарение воды. Глыбистая почва при этом сохнет быстрее распыленной в поверхностном пятисантиметровом слое. В более глубоких слоях наибольший расход воды отмечен в лизиметрах, перекрытых с поверхности распыленным слоем (< 0,25 мм).

В этом же опыте Б. Д. Михайлова показано, что примесь распыленной части почвы к агрегатам с диаметром 2—3 мм в количестве 30% повышает испаряющую их способность на 20%, а такая же примесь к агрегатам 10—15 мм сопровождается повышением испарения на 30%.

Лучшая водопроницаемость структурных почв и меньшая испаряющая их способность обуславливают на незаболоченных территориях более высокую влажность почв структурных (рис. 72).

На опытных делянках площадью 160 м², каждая в одинаковых условиях рельефа, в одном случае поддерживался культурный ранний пар, который после весенней вспашки (20/V) с внесением навоза из расчета 20 т/га культивировался на глубину 6—10 см по мере развития сорной растительности (всего 4 культивации); в другом — такой же парующий участок после основной вспашки искусственно был распылен боронованием в 20 следов. Двойка обоих участков произведена 1/VIII; посев ржи осуществлен 12/VIII. Наблюдения за влажностью почвы с пятерным контролем на каждом участке проводились еженедельно до глубины 1 м. На рисунке 72 приведен ход влажности на обеих опытных делянках в пахотном слое (0—18 см).

Распыленная почва по сравнению с нормальной обработкой сильнее заплывала коркой после дождей. В силу худшей водопроницаемости и большей испаряющей способности она в течение всего вегетационного периода до глубины 0,5 м была суше структурной почвы. Только осенью, благодаря лучшему развитию озимы, на структурном участке обе делянки выравнились по влажности.

Всходы ржи на распыленном участке были худшими. Весной рожь на этом участке сильно пострадала от вымочек, и урожай ее составил лишь 33% от урожая на структурном поле (8,41 ц/га против 25,5 ц/га на структурной пашне).

Лучшие водный, воздушный и тепловой режимы в структурной почве обуславливают и лучшее развитие биологических процессов. Иллюстрируем это положение примером из работы В. В. Квасникова (табл. 47).

Опыт поставлен в 1922 г. в лаборатории опытного поля Петровской (ныне Тимирязевской) сельскохозяйственной академии.

Содержание нитратов в мг/кг дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы
(по В. В. Квасникову)

Диаметр фракций, мм	Сроки наблюдений					Среднее из 4-х наблюдений
	3/III перед началом опыта	10/III	17/III	24/III	31/III	
Смесь всех фракций	1,6	9,1	23,7	32,3	25,2	22,5
1—2	1,6	14,6	50,1	56,7	38,6	40,0
0,5—1	1,6	11,6	36,6	52,2	34,4	34,0
<0,5	1,6	5,3	4,8	4,0	следы	3,5

Почва при оптимальной влажности компостировалась в трубках диаметром 4,6 см и высотой 20 см. Контроль в работе четверной.

Как следует из данных таблицы, лучшие нитрификационные условия наблюдались в трубках, заполненных агрегатами диаметром 1—2 мм и 0,5—1 мм; худшие — в сосудах, где агрегаты по размерам были < 0,5 мм.

Структурная почва, обладая меньшей связностью, оказывает и меньшее удельное сопротивление при пахоте. Кроме того, обработку структурной почвы, в силу ее меньшей липкости (рис. 73), можно производить при более высоких стадиях увлажнения. Так, структурную дерново-подзолистую почву можно обрабатывать без залипания орудий обработки и без смазывания пласта при относительной влажности в 80%, в то время как та же почва в сильно распыленном состоянии допускает обработку лишь при относительной влажности 50%.

В заключение данного раздела кратко остановимся на направлении процессов в структурной и бесструктурной почвах в понимании В. Р. Вильямса*.

Бесструктурная почва характеризуется раздельночастичным строением. Это приводит к плотной упаковке частиц почвы, к тон-

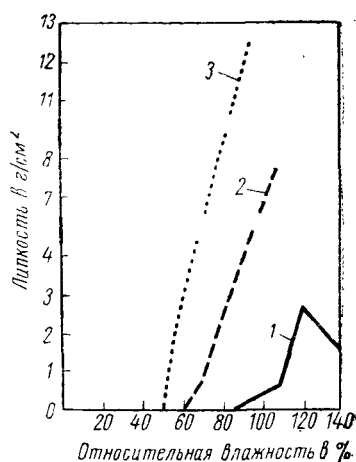


Рис. 73. Липкость дерново-подзолистой суглинистой пылевато-песчаной почвы в зависимости от оструктуренности, распыленности и влажности в г/см², Ап, стерня ржи:

1 — почва естественного сложения; 2 — почва, просеянная через сито в 1 мм; 3 — почва, просеянная через сито в 0,25 мм

* Некоторые положения Вильямса по этому вопросу не нашли экспериментального подтверждения и в настоящее время рассматриваются в несколько ином аспекте, но в его высказываниях много и ценных положений, поэтому считаем необходимым кратко их привести, сопроводив некоторыми критическими замечаниями.

кокапиллярной, волосной ее порозности. Такая почва плохо водопроницаема. Низкая порозность влечет за собой недостаточную влагоемкость, а следовательно, и незначительные запасы воды в почве. Вместе с тем почва обладает наивысшей капиллярной проводимостью. По капиллярам вода легко поднимается к поверхности почвы и испаряется в атмосферу. Этому в сильнейшей степени содействует корка с волосной порозностью, которой бесструктурная почва неизменно заплывает после каждого дождя и которая весной и осенью для озимых сильно препятствует всходам растений. Запасы воды в почве быстро исчезают в результате физического испарения, почва покрывается глубокими трещинами (рис. 74).

Водно-воздушный, а значит и тепловой, режим в бесструктурной почве резко меняется во времени. Во влажном состоянии в промоченном слое все поры занимаются водой; в почве отсутствует воздух или его очень мало. Процессы характеризуются анаэробнозисом. Мобилизация питательных веществ подавлена. Культурные растения в сырой почве задыхаются или страдают от недостатка кислорода.

По мере подсыхания почва быстро теряет всю капиллярную воду. Поры ее в основном заполняются воздухом. Анаэробный процесс сменяется аэробным, приводящим к более быстрому распаду перегноя, к минерализации его, что в еще большей степени обесструктурирует почву. Теперь растения страдают и гибнут уже от недостатка воды. Таким образом, вода, воздух и пища в бесструктурной почве — антагонисты.

Бесструктурная почва плотна, как дорога. Удельное сопротивление ее при пахоте предельно высоко (около 1 кг/см^2). Корни растений в такую почву проникают с трудом и размещаются приповерхностно.

Ввиду стихийности в бесструктурной почве водного, воздушного и питательного режимов она малоплодородна. Урожаи культурных растений на ней низки и неустойчивы.

Совсем иначе протекают процессы в структурной почве. Она складывается из зерен и комков размерами от 1 до 10 мм (рис. 75). Комки и зерна обладают капиллярной порозностью, а промежутки между ними представлены некапиллярами. Общая порозность и влагоемкость почвы высоки. Водопроницаемость ее отличная. По крупным порам вода легко проникает вниз, глубоко промачивая почву и рассасываясь по капиллярным ходам комочков и зерен. Все 100% осадков воспринимаются почвой. Поверхностный сток вод отсутствует, а значит, исключены и разрушительные процессы эрозии.

Во влажной структурной почве наблюдается диалектическое единство противоположностей. Капиллярные поры комков и зерен заняты водой, и процессы внутри их характеризуются анаэробнозисом. В этих условиях разложение органических веществ анаэробными бактериями сопровождается образованием ульминовой

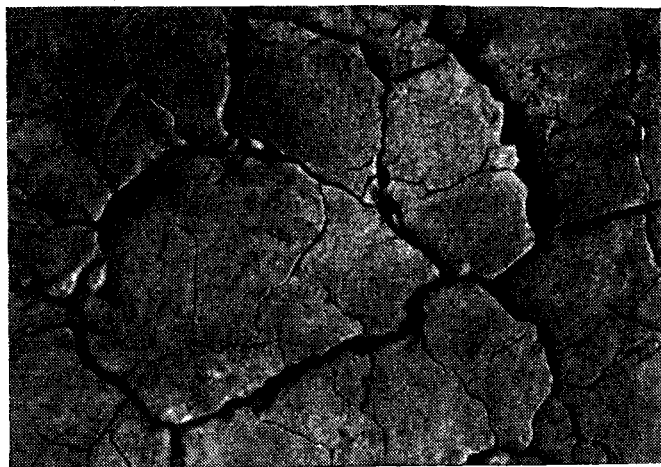


Рис. 74. Бесструктурная глинистая почва после ливневого
дождя и высыхания (вид сверху)

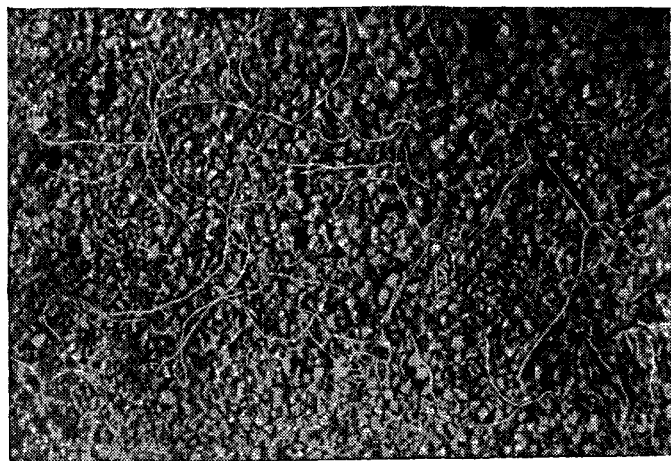


Рис. 75. Комковато-зернистая структура в пахотном слое
(вид сверху)

кислоты, дающей при замораживании в процессе денатурирования нерастворимый в воде ульмин.

Диаметрально противоположен водному и воздушному режимам, отмеченным для внутренних частей комков, процесс, протекающий в порах аэрации структурной почвы на поверхности комков и зерен. Эти поры заполнены постоянно обновляющимся воздухом. Здесь протекают аэробные процессы. Разложение органических веществ аэробными бактериями сопровождается образованием гуминовой кислоты, переходящей на холоду при денатурировании в гумин. Гуминовая кислота и гумин как быстрее минерализующиеся в меньшей мере, нежели ульминовая кислота и ульмин, способствуют склеиванию, оструктурированию почвенных частиц, но значение их велико как источника питательных веществ, которые высвобождаются при минерализации в усвояемых для растений формах.

Кислоты — гуминовая и ульминовая — получают при бактериальном разложении органических остатков травянистой растительности. Это (по Вильямсу), по-видимому, бактериальные экзо-энзимы, выделяемые микроорганизмами во внешнюю среду для воздействия на органическое вещество как источник энергии организма или его пищи. Оструктурирующее значение их особо возрастает при взаимодействии с ионом кальция. Гумат кальция гуминовой и особенно ульминовой кислот — драгоценный цемент почвенной структуры.

Структурные комочки, скрепленные гумином, ульмином и особенно гуматом кальция гуминовой и ульминовой кислот, механически упругопрочны и, что особенно важно, водопрочны, а потому длительно противостоят размывающему действию воды.

Так как гуминовая и ульминовая кислоты, переходя в гумин и ульмин, а также гумат кальция, свертываются в воде необратимо, то очевидно, что как структурный цемент они могут действовать лишь один раз. Отсюда важное следствие: созданную структуру нужно рациональной обработкой тщательно оберегать от разрушения, ибо будучи разрушена, она может быть воссоздана лишь при наличии новых порций свежееосажденного деятельного перегноя.

В структурной почве одновременно присутствуют вода и воздух и легче обеспечивается благоприятный тепловой режим. В ней при совмещении анаэробного и аэробного процессов многогранней проходит выветривание минеральной части почвы и бактериальное разложение гумуса с высвобождением питательных для растений веществ. «Каждый комок, — говорит академик Вильямс, — служит как бы сберегательной кассой, которая мешает почве сразу растратить все свои богатства. По мере того, как растение использует элементы пищи на поверхности комка, оно находит все новые и новые количества пищи, но запас, богатство почвы сохраняется, ибо не растрачивается впустую».

Будучи одновременно обеспечена водой, воздухом и пищей, структурная почва удовлетворяет все запросы растений и обеспечивает высокий устойчивый их урожай (Вильямс, 1919 и последующие публикации).

Разделяя в основном концепции В. Р. Вильямса о ходе процессов в бесструктурной и структурной почвах, мы сделаем к ним несколько замечаний.

Многочисленные определения порозности агрегатов с несомненностью показывают, что в агрономически ценной структуре таких почв, как черноземы, красноземы и некоторые другие, внутри самих агрегатов имеется значительное количество пор аэрации в форме отдельных канальцев и ячеек, которые при нормальном увлажнении почвы заполнены воздухом. С другой стороны, далеко не всегда между комками будут отмечаться некапилляры. Поэтому концепцию академика Вильямса о сочетании в культурной, структурной почве аэробных и анаэробных участков мы представляем себе как значительно более сложную. Эти участки могут и должны мозаично чередоваться как внутри самих структурных отдельных частей, так и между ними, хотя, естественно, максимум пор аэрации будет между комками, а пор капиллярных и неактивных — в комках (рис. 76).

Если поры аэрации располагаются преимущественно в комках, а межагрегатная порозность представлена капиллярами и ультрапорами, это показывает, что комки рыхлы, но плотно уложены, или промежутки между ними засыпаны пылью. В этом случае, как указывает Вильямс, структурная почва ведет себя, как бесструктурная. Наоборот, наличие пор аэрации только меж агрегатами говорит о рыхлой укладке плотных комков. Наилучшим строением почвы в пахотном слое будет такое, когда водопрочные пористые комки и зерна (пористость в суглинистых и глинистых почвах около 45—50%) уложены настолько плотно, что почва не садится,

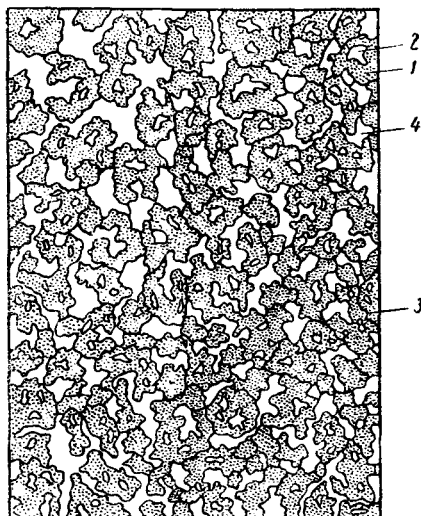


Рис. 76. Порозность культурной структурной почвы (схема по Н. А. Качинскому):

1 — тонкие, преимущественно капиллярные поры в комках, при смачивании почвы заполняются водой; 2 — средние по размерам поры в комках (ячейки, канальцы) при смачивании на короткий период заполняются водой, потом, после рассасывания ее, — воздухом; 3 — капиллярные поры на стыке комков в сырой почве большей частью заполнены водой; 4 — крупные поры между комками — обычно заполнены воздухом

однако при обязательном наличии пор аэрации между комками и зернами (общая порозность около 55—60%).

Влияние структурности почвы на урожай сельскохозяйственных культур проверяли в специальных опытах Вольни (1897), Квасников (1927, 1928), Константинов (1918—1928), Саввинов (1929), Иодер (1937) и многие другие. Во всех опытах подтверждается положительное влияние структуры почвы на ее плодородие и урожай растений. Здесь мы приводим результаты опытов Е. Вольни, как первых опытов по данному вопросу (табл. 48), и сводную таб-

Таблица 48

Урожай различных культур на распыленной и структурной суглинистой почве, по Е. Вольни (1897).

Полевой опыт с использованием бездонных сосудов *

Культура	Удобрение	Состояние почвы	Относительный урожай, %	
			зерно, клубни, бобы	солома, ботва, сено
Рожь	С удобрением	Распыленная	100,0	100,0
		Структурная	176,0	154,5
	Без удобрения	Распыленная	100,0	100,0
		Структурная	186,1	123,6
Бобы	С удобрением	Распыленная	100,0	100,0
		Структурная	120,3	157,3
	Без удобрения	Распыленная	100,0	100,0
		Структурная	120,5	132,4
Картофель	С удобрением	Распыленная	100,0	100,0
		Структурная	136,3	111,4
	Без удобрения	Распыленная	100,0	100,0
		Структурная	121,6	138,9
Луговое разнотравье	С удобрением	Распыленная	100,0	100,0
		Структурная	134,3	140,3
	Без удобрения	Распыленная	100,0	100,0
		Структурная	132,9	138,9

* Е. Wollny. Forschungen auf dem Gebiete der Agrikultur-Physik. XX Band, 1897—1898, S. 243.

Влияние структурности почвы на урожай сельскохозяйственных культур

Пункт наблюдений	Почва, культура	Варианты опыта	Средний урожай зерна	Автор
Краснокутская опытная станция. Полевые опыты за период 1918—1928 гг.	Каштановая тяжелосуглинистая солонцеватая. Пшеница белотурка	1. По мягким землям, частично распыленным 2. По житняковому пласту	6,06 ц — 100% 9,00 ц — 148,5%	П. Н. Константинов
Опытное поле Куйбышевского с-х. института. Вегетационные опыты 1927 г.	Чернозем террасовый тяжелосуглинистый с содержанием гумуса 4,5%. Просо Саратовское	1. Смесь пыли и зерен почвы (0—3 мм) 2. Структурная почва (2—3 мм)	13,9 г — 100% 16,2 г — 117%	В. В. Квасников
Совхоз «Гигант» Ростовской обл. Полевые наблюдения за 1925—1929 гг.	Чернозем мощный карбонатный. Овес	1. По мягким землям, частично распыленным 2. По обороту пласта	7,20 ц — 100% 8,73 ц — 121%	Н. И. Саввинов

лицу из наблюдений П. Н. Константинова, В. В. Квасникова и Н. И. Саввинова (табл. 49).

Как видно из данных таблиц 48 и 49, во всех случаях на более структурных почвах получен и более высокий урожай. Об этом говорят и опыты с полимерами (Алисон, Качинский, Гуссак, Паганис и др.).

Наряду с положительным влиянием на урожай сельскохозяйственных растений, структурность почв, как уже отмечалось, снижает удельное сопротивление почв при их обработке и, уменьшая или исключая поверхностный сток дождевых и талых вод, препятствует развитию процессов эрозии почв.

О МЕТОДАХ И УСЛОВИЯХ ОСТРУКТУРИВАНИЯ ПОЧВЫ

Раскрывая теоретическую сущность структурообразования, Костычев, Гедройц, Вильямс и их многочисленные ученики стремились выработать систему агротехнических мероприятий для оструктурирования почв в целях непрерывного повышения их плодородия.

До настоящего времени основными методами оструктурирования почв были агротехнические методы: а) методы обработки почвы;

б) любые способы обогащения почв гумусом типа гуминового и ульминового комплекса; в) известкование кислых почв и гипсование солонцов или применение заменителей извести и гипса; г) введение травопольных севооборотов при условии хорошего развития и высоких урожаев трав (урожай сена свыше 50 ц/га).

Здесь мы стремимся уточнить три вопроса: а) роль обработки и понятие о физической спелости почв; б) роль термического фактора в оструктуривании почв; в) роль многолетних и однолетних трав и других культурных растений в оструктуривании почв.

Наиболее часто применяемым методом оструктуривания почв и создания в них оптимальных для возделывания сельскохозяйственных культур физических свойств является метод обработки.

Грандиозность этого вида воздействия человека на почву может быть иллюстрирована следующими приблизительными величинами.

На всем земном шаре возделывается более 1 млрд. га земли. Если принять, что из этой площади ежегодно обрабатывается половина ее и что вспашка в среднем производится на 20 см глубины, то окажется, что земледельцы всего земного шара переворачивают ежегодно более 1000 км³ почвы — это в 7—10 раз больше того твердого материала, который реки всего земного шара ежегодно несут в моря и океаны.

Исключительная массовость и повсеместность воздействия человека на почву через обработку делает особо ответственным правильный подход к этому мероприятию, ибо всякая ошибка здесь неизбежно распространяется на миллионы гектаров, так же как и всякое рационализаторское предложение будет использовано миллионами человечества.

Крупнейший английский почвовед Э. Рассел на основе своих многолетних работ пришел к заключению, что «ни одну систему ведения сельского хозяйства нельзя применять постоянно, если она не обеспечивает сохранения соответствующей почвенной структуры; и неспособность сохранить структуру служит характерным признаком непригодности той или иной системы земледелия. Методы, применяемые для сохранения структуры, можно подразделить на четыре группы: правильное использование орудий обработки, климата, удобрений и возделываемых культур, причем эти методы должны способствовать как увеличению, так и уменьшению размеров структурных отдельностей» *.

В. Р. Вильямс первенствующее значение придавал культурной обработке почвы. Он писал: «Введение культурной вспашки плугом с предплужником представляет, без преувеличения, самую важную задачу советской революционной агрономии, так как о бесструктурность почвы разбивается эффект всех, без исключе-

* Э. Рассел. Почвенные условия и рост растений. Перевод с англ. М., ИЛ., 1955, стр. 400.

ния, агрономических мероприятий всех порядков» (1927). И в другом месте: «Задача обработки состоит в том, чтобы обратить весь пахотный горизонт почвы в комковатое состояние и при этом возможно меньше распылить почву» (1943).

На рисунке 77 показана динамика важнейших физико-механических свойств почвы — липкости и твердости, обуславливающих качество вспашки. Зависимость этих свойств от влажности почвы

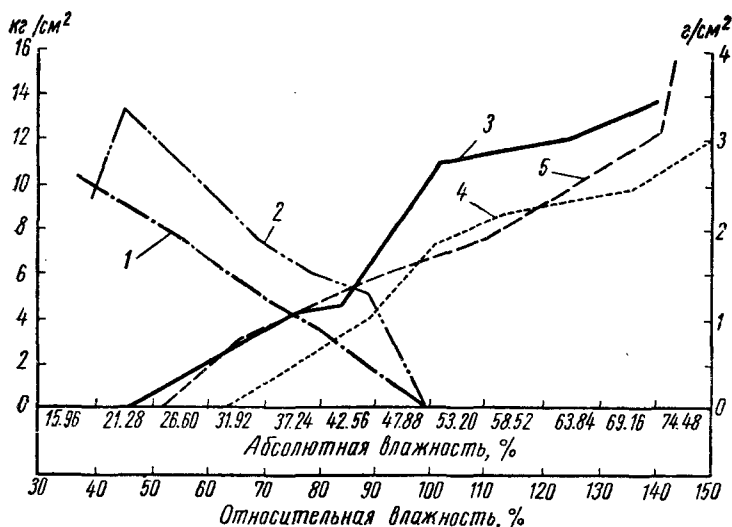


Рис. 77. Зависимость сопротивления почвы расклинованию и липкости от ее влажности. Приазовский карбонатный глинистый чернозем. Поле озимой пшеницы

1 — расклинование в $\text{кг}/\text{см}^2$ по Качинскому; 2 — расклинование в $\text{кг}/\text{см}^2$ по Голубеву; 3 — липкость в $\text{г}/\text{см}^2$ для глубины 1—3 см; 4 — то же для глубины 8—10 см; 5 — то же для глубины 16—18 см

диаметрально противоположна. Твердость, или сопротивление почв расклинованию, будучи близка к нулю в сырой почве, резко возрастает по мере ее подсушивания, достигая максимума в сухом состоянии. От этой закономерности уклоняются лишь почвы песчаные и в совершенстве оструктуренные. Те и другие в сухом состоянии приобретают рассыпчатое строение.

Прилипание структурных почв к шлифованной стали (А. Ф. Вадюнина, 1939) в интервале относительной влажности от нуля до 60—70%, как правило, отсутствует или выражается крайне слабо. В интервале относительной влажности до 80% оно невелико, а при дальнейшем увлажнении почвы до границы нижней текучести, по Аттербергу, значительно увеличивается.

Взаимное прилипание частиц почвы проявляется при более низкой (на 3—5%) относительной влажности, нежели прилипание почвы к шлифованной стали. Например, если почва к стали начи-

нает прилипать при относительной влажности 75%, то частицы и микроагрегаты почвы начинают склеиваться между собой при относительной влажности 70%.

Совершенно очевидно, что вспашку почвы не следует производить при слишком низких и при слишком высоких ее влажностях. В первом случае почва будет распыляться. Пашня на недостаточном оструктуренной почве получится глыбистая. Удельное сопротивление почвы будет велико.

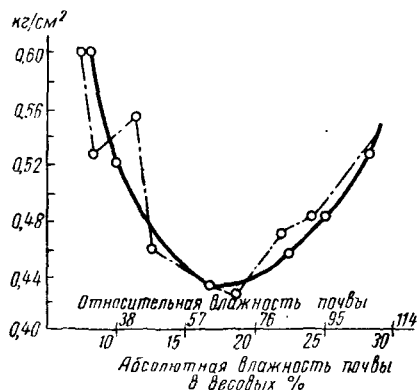


Рис. 78. Зависимость удельного сопротивления почвы при пахоте от ее влажности. Почва дерново-подзолистая суглинистая. Стерня ячменя. Плуг П-5-35 с предплужниками. Средние данные из 62 динамограмм (уравнение параболы 2-й степени) (по данным П. У. Бахтина)

Во втором случае, вследствие сильно выраженной липкости почвы, рабочие части плуга будут залипать. Внешнее трение почвы о поверхность отвала заменится внутренним трением: почва — почва. Удельное сопротивление почвы при пахоте снова сильно возрастает. Пашня получится смазанной и при высыхании превратится в сплошные глыбы. Как видно из данных, приведенных на рисунках, 26 и 77, оптимальной влажностью для вспашки характеризуемых здесь почв будет относительная влажность 70—80%. При этих условиях частички почвы будут взаимно склеиваться и агрегироваться, а залипание орудий обработки не будет наблюдаться. Пласт при этом хорошо крошится. Удельное

сопротивление почвы при пахоте благодаря незначительной ее твердости будет наименьшим.

В производственных условиях, когда период вспашки почвы вынужденно может растянуться на несколько дней, интервал относительной влажности, при котором еще обеспечивается удовлетворительное крошение почвы, допустимо расширить на 10% в обе стороны.

Существенно отметить, что прилипание распыленной почвы к металлу (а значит, к рабочим поверхностям трактора и плуга) выявляется при меньших влажностях и представлено величинами, в несколько раз большими, нежели в почве структурной. Следовательно, наряду с другими отрицательными характеристиками распыленная почва может быть обрабатываема без смазывания пласта лишь при значительном ее подсушивании, т. е. после непроизводительной потери около половины драгоценной для растений воды. На рисунке 78 показана зависимость удельного сопротивления почвы при пахоте от ее влажности.

При оценке оптимальной влажности для обработки почвы существенное значение имеет скорость хода трактора, на которой производится вспашка. До последнего времени вспашка производилась на первой скорости хода трактора ~ 1 м/сек — это лошадиная скорость при вспашке. Явно необходимо перейти на более высокие

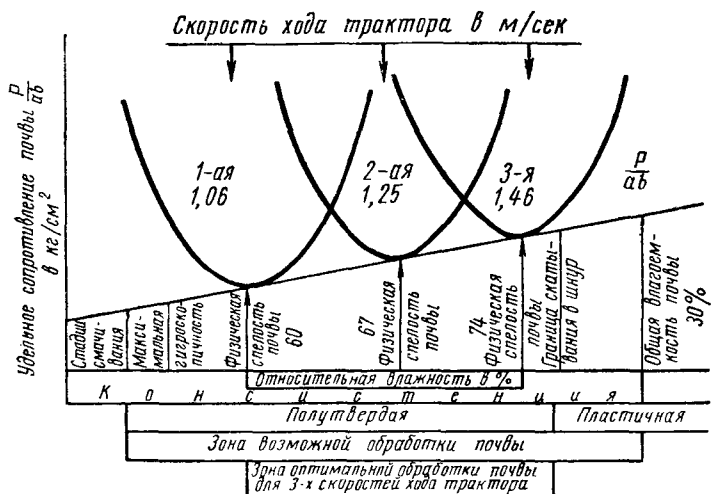


Рис. 79. Схема изменения физической спелости почвы в зависимости от скорости движения плуга. Почва дерново-подзолистая тяжелосуглинистая. Стерня ржи:

P — тяговое усилие трактора при вспашке в кг; ab — поперечник вспахиваемого пласта почвы в см²; кривые характеризуют удельное сопротивление почвы при пахоте ($\frac{P}{ab}$) в зависимости от ее влажности и скорости хода трактора в кг/см²

скорости, к чему обязывает нас и постановление январского (1961 г.) Пленума ЦК КПСС.

Экспедиции Почвенного института АН СССР производили исследования вспашки на разных скоростях движения трактора и выявили преимущества скоростной вспашки по производительности, по расходу горючего на единицу площади обработанного поля и по влиянию на структуру почвы (Качинский, Бахтин, 1952). На второй и третьей скоростях, по сравнению с первой, можно успешно обрабатывать более влажную почву, получая более структурную пашню. (Бахтин, 1958, рис. 79).

Важно отметить, что на обработку структурной почвы по сравнению с бесструктурной требуется значительно меньшая затрата энергии.

Говоря об оструктурировании почв при обработке их, нельзя пройти мимо влияния термического фактора, с которым связано просушивание почв и промораживание их. При подсыхании сырой почвы уменьшается толщина расклинивающих частицы почвы пле-

нок адсорбированной воды. Частицы сближаются. Взаимодействие между ними возрастает. Концентрация электролитов в почвенном растворе увеличивается и может достигнуть порога коагуляции, при котором свободные коллоиды (золь) коагулируют, образуя микроагрегаты. Кроме того, общеизвестно, что макроструктура почв, особенно грубая макроструктура, как глыбы, столбы, плитки, крупные орехи, образуется в процессе попеременного набухания почвенной массы при увлажнении и растрескивании ее при просушивании. Трещины закладываются при этом по линиям наименьшего сцепления и в различном почвенном субстрате приобретают разный характер. В случае однородной связности почвенного материала при подсыхании он растрескивается равномерно по трем осям координат, образуя структуру кубического (по Захарову) типа — комки, орехи, кубики. Если связность почвы в вертикальном направлении выражена слабее, нежели в горизонтальном, почва будет растрескиваться на плитки разной величины и формы. При обратном соотношении связности почва при подсыхании будет бороздиться вертикальными трещинами, распадаясь на параллелепипеды, вытянутые по оси *y*, столбики и столбы. Структура этого типа интересна как один из морфологических показателей для характеристики почв, но агрономически, особенно для условий пахотного слоя, она должна быть расценена как явление отрицательное.

Что касается промораживания почвы, то его влияние на структуру может быть и положительным, и отрицательным. При промораживании и оттаивании оптимально увлажненной почвы (60—70—80—90% относительной влажности) структура почвы улучшается. Природа этого явления многосторонняя. В первую очередь замерзает в почве лишь свободная вода в более крупных капиллярах, при этом объем ее увеличивается примерно на 9%. Участки почвы по периферии крупных пор с замерзшей водой уплотняются. При давлении создаются лучшие условия для ортокинетической коагуляции коллоидов. Процессу коагуляции способствует и вымораживание чистой воды, в силу чего повышается концентрация электролитов в незамерзшей части раствора, и может быть достигнут порог коагулирующего действия их на коллоиды, чего не наблюдалось во всем объеме незамерзшего раствора почвы.

Наконец, давление замерзшей воды способствует сближению почвенных частиц в незамерзших микрозонах, а следовательно, и лучшему проявлению по границам их соприкосновения сил Ван-дер-Ваальса.

Иной процесс будет наблюдаться при замораживании и оттаивании переувлажненной почвы. В этом случае свободная, замерзшая при незначительных отрицательных температурах, вода пропитывает всю толщу почвы, в том числе и внутренность набухших комков. Твердая фаза почвы как бы плавает в воде. При замерзании

воды, сопровождающемся расширением ее, структурные отдельности будут разрываться. Такая почва при оттаивании получает киселеобразную консистенцию и в сильнейшей степени обесструктурируется (Качинский, 1927).

Наконец, сухая почва, просушенная до влаги завядания растений, замерзает лишь при температурах порядка -20°C и ниже. Такая почва, оттаивая, заметно не меняет своих свойств.

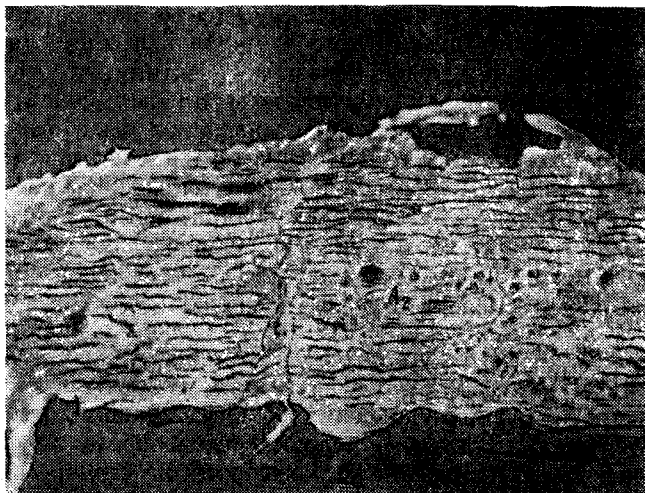


Рис. 80. Характер замерзания воды в подзолистом горизонте (A_2) дерново-подзолистой суглинистой почвы. Видны темные горизонтальные прослойки льда

В качестве примера влияния промораживания непереувлажненной почвы на ее структуру приводим рисунок 80 с изображением характера замерзания воды в подзолистом горизонте A_2 дерново-подзолистой почвы. При слабой водопроницаемости тяжелой по механическому составу дерново-подзолистой почвы впитываемая в нее вода задерживается на поверхности иллювиального горизонта B_1 и распределяется в толще подзолистого горизонта A_2 в горизонтальном направлении. При замерзании она образует многочисленные горизонтально напластованные линзочки, расклинивающие толщу A_2 на пластинки и листочки в том же направлении. Этот процесс в пределах горизонта A_1 дерново-подзолистой почвы нивелируется воздействием густой сети корневой системы растений, чего не наблюдается в A_2 , так как мощность корневой системы в этом горизонте сокращается в десятки раз и на структуру его влияет слабо.

Говоря о системе удобрений как средстве оструктурирования почвы и улучшения питательного ее режима, Вильямс рекомендует

такие формы и дозы внесения удобрений, чтобы они потреблялись растениями, а не лежали бы мертвым капиталом в почве. Изыскивая удобрения, необходимо наряду с заводскими минеральными туками и даже в первую очередь полностью использовать местные удобрения — навоз и навозную жижу, торфофекалии, компост, куриный помет, золу, а также гипс и известь.

Оценивая роль навозного удобрения, Вильямс придавал ему двойное значение: а) биологического оживления почвы и б) обогащения ее питательными веществами. Относя первое положение, он пишет: «Не подлежит никакому сомнению, что не для того мы вносим две-три тысячи пудов навоза на десятину, чтобы удобрить ее теми тридцатью-сорока пудами минеральных солей, которые заключаются в этом навозе, такая операция была бы слишком невыгодна, слишком наивна. Нет, мы вносим навоз только для того, чтобы вновь оживить в мертвой почве те биологические процессы, которые угасли вследствие несовершенной, не отвечающей цели обработки, и без которых в ней замрет всякое движение веществ».

Однако отметив столь ярко роль навоза как средства активизации биологических процессов в почвах, тесно связанных с оструктурированием их, Вильямс в другом месте подчеркивает и его питательное значение «как одного из лучших минеральных и азотистых удобрений» (1927 г.).

И обработка почв, и удобрение их могут максимально проявить свою эффективность лишь в условиях севооборота.

Исходя из того положения, что в естественной природной обстановке комковатая водопрочная структура создается в рыхлокустовой стадии лугового дернового процесса под покровом многолетних бобовых трав и рыхлокустовых злаков (в подзонах обыкновенных, тучных и мощных черноземов), Костычев, Вильямс, Рассел и ряд других исследователей развили тезис о необходимости в севообороте злаково-бобовых травосмесей как одного из главнейших условий обогащения почвы гумусом, оструктурирования почв, восстановления и повышения их плодородия.

Вопрос этот нуждается в тщательном анализе. Как показано работами Мюнца и Жирара, В. Г. Ротмистрова, А. П. Модестова, И. В. Красовской, Ю. Соколовского, Казакевича, И. В. Ларина, Уйвера, Н. В. Орловского, Н. И. Саввинова, А. П. Малянова и др., а также многолетними исследованиями Н. А. Качинского с сотрудниками (табл. 50), действительно бобово-злаковая травосмесь, а из бобовых особенно люпин и люцерна имеют корневую систему, по массе обычно превосходящую корневую систему льна, овса, ржи, пшеницы и особенно весьма слабую корневую систему «изнеженных» культурой растений, как картофель, капуста, свекла столовая (не считая мясистого корня). Однако ряд однолетних культур — пшеница, подсолнечник, кукуруза и некоторые другие — развивают весьма мощную корневую систему, приближающуюся по массе к корневой системе луговых трав и превышающую

Соотношение абсолютно сухого вещества подземных и надземных частей растений

Растение	Надземные части (А) с площади 625 см ² , г	Подземные части (В) соответственно с площади 625 см ² в г до глубины 2 м	$\frac{В \cdot 100}{А} \%$	Почва
<i>Barbarea vulgaris</i> (сурепка)	24,3	10,31	42,4	Среднеподзоленный суглинок
<i>Zinum usitatissimum</i> (лен)	25,2	9,38	37,2	Подзол суглинистый А _п —9 см, А ₂ ненарушенный—18 см
<i>Avena sativa</i> (овес)	42,72	12,10	28,3	
<i>Avena sativa</i> (овес)	71,84	21,31	29,7	Подзол суглинистый А _п и А ₂ перемешаны до глубины 27 см
<i>Avena sativa</i> (овес)	126,46	17,21	13,8	Подзол суглинистый А ₂ заменен А _п до глубины 24 см
<i>Triticum vulgare</i> (пшеница)	44,77	31,20	69,7	Западнопредкавказский выщелоченный чернозем
Пропашные				
<i>Solanum tuberosum</i> (картофель)	21,18	9,38 (без клубней)	44,3	Среднеподзоленный суглинок
<i>Solanum tuberosum</i> (картофель)	21,18	35,68 (с клубнями)	160,8	То же
<i>Beta vulgaris</i> (свекла столовая без мясистого корня, с мясистым корнем)	12,44	9,78	78,6	Среднеподзоленный суглинок
	12,44	66,75	536,6	То же
<i>Helianthus annuus</i> (подсолнечник)	152,39	38,40	25,2	Западнопредкавказский выщелоченный чернозем
<i>Zea mays</i> (кукуруза)	280,71	44,88	16,0	То же
Луговые травы	44,0	70,07	160,7	Подзол суглинистый
»	32,2	32,45	97,7	Сильноподзоленная супесчаная почва на суглинке
»	52,9	41,75	78,9	Слабоподзоленная супесчаная почва на песке
»	42,62	59,23	139,0	Серая глинистая лесная земля
»	28,93	41,31	142,8	Западнопредкавказский выщелоченный чернозем
Бобовые	35,9	24,83	69,2	Среднеподзоленный суглинок
<i>Trifolium pratense</i> (клевер луговой)				

Растение	Надзем- ные части (А) с пло- щадью 625 см ² , г	Подземные части (В) со- ответственно с площади 625 см ² в г до глубин- ны 2 м	$\frac{B \cdot 100}{A}$ %	Почва
<i>Lupinus perennis</i> (люпин многолетний)	45,1	33,71	74,7	Среднеподзолен- ный суглинок
<i>Medicago sativa</i> (люцерна посевная)	34,3	58,55	170,7	То же
<i>Medicago sativa</i> (люцерна посевная)	35,05	57,91	165,2	Серая глинистая лесная земля
<i>Medicago sativa</i> (люцерна посевная)	28,93	53,21	166,0	Западнопредкавказ- ский выщелоченный чернозем

иногда корневую систему клевера красного (рис. 81). Следовательно, эти растения при своем развитии, как и травы, будут оструктурировать почву в ризосфере корней за счет деятельности перегноя, образуемого в форме комплексных соединений из азотосодержащих продуктов автолиза тел бактерий и уроновых кислот (Рудакова, 1949—1953) и вследствие расчленения ее густой сетью своих корней на зернышки и комочки. Заслуживает внимания среди однолетних растений кукуруза. Общеизвестна ее ценность как высокопродуктивной зерновой и силосной культуры. Здесь хотелось бы отметить, что и по корневой системе среди изученных однолетних растений она при хорошем развитии занимает и по массе корней, и по глубине укоренения, и по широте охвата почвы первое место. Так на западнопредкавказском выщелоченном глинистом черноземе в среднем на 1 га в почве до глубины 2 м в период цветения растений найдено корней пшеницы 5 т, подсолнечника — 6,14 т, залежной двулетней растительности — 6,6 т, кукурузы — 7,18 т, люцерны второго года пользования — 8,51 т (см. табл. 50 и рис. 81, 82).

Однако сказанное об оструктурирующей роли однолетних растений по сравнению с многолетними справедливо лишь для периода их вегетации. Дело в том, что однолетние растения к периоду плодоношения концентрируют все питательные вещества — белки, углеводы, жиры — в продуктивных органах — в зерне, в семени. В стеблях и корнях их ко времени запахивания остаются преимущественно древесинные остатки, клетчатка — соединения наименее пригодные для гумусообразования. При наличии многолетних трав запахиваются живые корни и корневища, пожнивные живые остатки стеблей и почки возобновления, содержащие значительное количество белков, углеводов и других пластических соединений и питательных веществ. Осо-

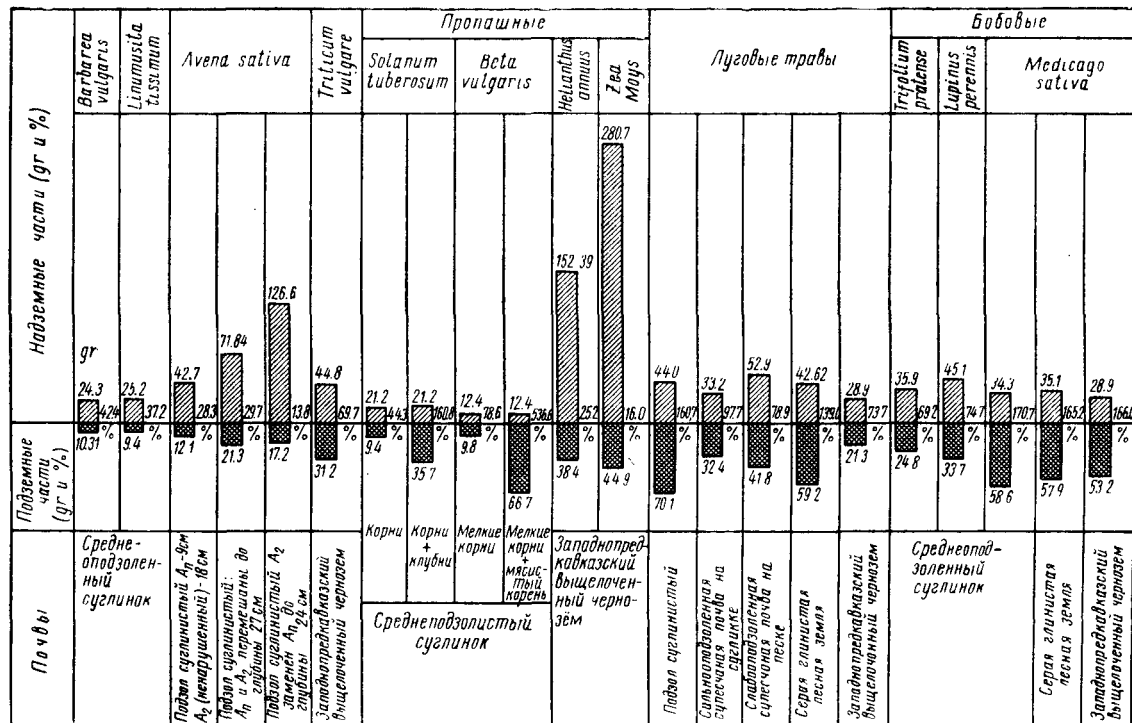


Рис. 81. Соотношение абсолютно сухого вещества надземных и подземных частей растений для площади 625 см² и глубины столба почвы 200 см

бенно это относится к бобовым растениям — клеверам, люцерне, сероделле, эспарцету, люпину, на корнях которых поселяются азотфиксирующие из воздуха клубеньковые бактерии (*Rhizobium trifolii* и др.). Следует помнить также, что бобовые травы, особенно клевер и люцерна, — кальциефиллы. Концентрируя известь в своих корнях и стеблях, они при запахивании пласта обогащают его

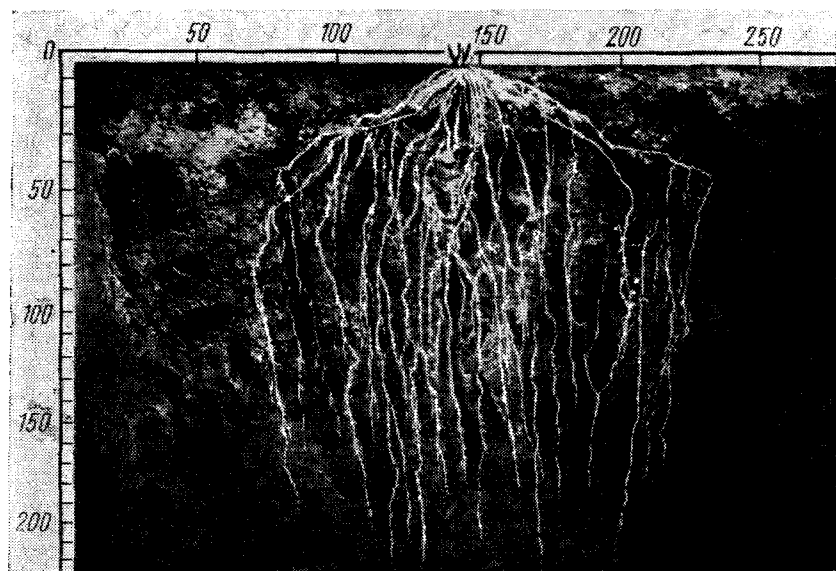


Рис. 82. Корневая система кукурузы в период ее цветения на западно-предкавказском выщелоченном глинистом черноземе

пахотный слой, что очень важно на кислых почвах. Степень возврата извести в почву с поукосными остатками будет зависеть от количества отчуждаемых с поля продуктов урожая в форме сена или зеленого корма.

Роль многолетних трав как высокоценного витаминного корма для скота, богатого белками, углеводами и минеральными элементами, а также как мелиоратора почвы высоко расценивается в Западной Европе, в США и Канаде. По данным Д. Н. Прянишникова, в Западной Европе количество трав в севообороте в среднем составляет 20—25% *, а в США и Канаде, по данным сельскохозяйственной статистики ФАО, на 1957—1958 гг. среди всех культур

* Д. Н. Прянишников. Избранные сочинения. Т. III. Из. с.-х. лит-ры, 1963, стр. 181—189.

по площади травы наряду с кукурузой занимают одно из двух первых мест, третье — пшеница, четвертое — овес и т. д.*

У нас и за рубежом можно указать многие работы, в которых отмечается оструктурирующее влияние трав на почву.

На рисунке 83 показаны водопроницаемость и водопрочность агрегатов чернозема обыкновенного. Оструктуренность оценивалась по методу Фадеева — Вильямса применительно к ненарушенным почвенным образцам. Как видно из приведенных данных, почва из-под люцерны оказывается значительно более водопрочной и водопроницаемой, нежели из-под ржи, хотя последняя шла по черному пару (см. также рис. 71). Лучшая оструктуренность почвы из-под трав доказана и прямым определением агрегатности почвы методом мокрого просеивания, и оптическим путем.

Говоря об оструктурирующем действии трав на почву, следует помнить, что положительное действие их можно ожидать лишь тогда, когда они хорошо развиваются (урожай сена свыше 50—60 ц/га). В этом случае они и при жизни своей корневой системой способствуют мелиорации почвы и после отмирания дают богатый материал для гумусообразования. Если травы плохо развиваются и дают мизерные урожаи, конечно и значение их в оструктурировании почвы невелико.

Поскольку в настоящее время по директивам XXII съезда КПСС, зональных совещаний по сельскому хозяйству и мартовского (1964 г.) Пленума ЦК КПСС травы в севооборотах по экономическим соображениям сокращены до минимума, а иногда и полностью исключены, а вопрос о благоприятных для растения физических

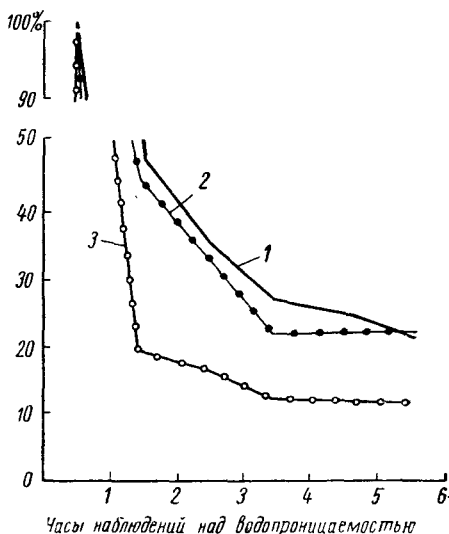


Рис. 83. Водопроницаемость и водопрочность агрегатов чернозема обыкновенного легкоглинистого из гор. А₁ в %. Волгоградская обл. Деминская МТС. Метод определения Фадеева — Вильямса (по И. В. Васильевой):

1 — лесная полоса; 2 — люцерна третьего года; 3 — рожь

* Отчет о работе VII Международного конгресса почвоведов. АН СССР. Всес. ин-т научной и технической информации. М., 1962, стр. 129.

Э. Х и Г б и. География сельского хозяйства США. М., ИЛ. 1961, стр. 23—24.

В. Мацкевич. Что мы видели в США и Канаде. Госполитиздат, 1956, стр. 192.

свойствах почвы, а следовательно, и о структуре, которая обуславливает эти свойства, остается в силе, нужно своевременно найти заменители трав в части благоприятного влияния их на структуру почвы, на содержание в почве гумуса, на обогащение ее азотом и т. д. * В интенсивном сельском хозяйстве такие заменители давно применяются: это известкование кислых почв и гипсование солонцов или применение заменителей извести и гипса; внесение в почву в должной мере навоза, торфонавоза, запахивание, особенно на легких по механическому составу почвах, сидератов и других органических удобрений; систематическое внесение в почву минеральных (NPK) удобрений, с учетом потребности возделываемых растений; борьба с сорной растительностью и паразитическими грибами в почве путем обработки ее и широкого применения гербицидов; введение в пропашные севообороты бобовых культур, как горох, кормовые бобы, соя и др. Наконец, в настоящее время в связи с развитием химии полимеров открываются широкие возможности использования полимеров в сельскохозяйственном производстве и, в частности, для быстрого оструктурирования почв. Этому вопросу посвящается следующий раздел настоящей главы.

В заключение отметим, что не должно быть догмы в системах земледелия. Правомочна та система агротехнических мероприятий, которая строится с учетом природных факторов и запросов, предъявляемых государством к данному хозяйству в данное время. Но так как любая система агротехнических мероприятий должна стремиться к наивысшему урожаю сельскохозяйственных культур, то для почв, тяжелых по механическому составу, — суглинистых и глинистых, особенно в богарных условиях земледелия, тезис о структурных почвах как наиболее плодородных остается в силе. *Культурная почва — это структурная почва*, и для оструктурирования ее нужно использовать любые методы: биологические, химические, физико-химические, физические и механические. Однако сердцевиной их остается необходимость обогащения почв высококачественным гумусом и коллоидальной частью в целом.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ ОСТРУКТУРИВАНИЯ ПОЧВ

К теории взаимодействия полимеров с почвами. Среди приемов агротехники быстрым методом улучшения структуры пахотного слоя является культурная обработка ее при оптимальной влаж-

* Под многолетними травами в перспективе остается 11 млн. га против 16,8 млн. в 1960 г. Но достижение намеченной урожайности — 35 центнеров с гектара — позволяет собирать этого ценного витаминного, богатого белками и минеральными элементами корма значительно больше, чем сейчас при урожайности 12—14 центнеров. «Подъем сельского хозяйства — все-народное дело». «Коммунист», 1962, март, № 4, стр. 8.

ности. Однако если исходная почва не обладает уже до обработки наличием прочных, водопрочных и пористых агрегатов, то улучшение физического ее состояния за счет обработки кратковременно. Взрыхленная пашня быстро садится, а в случае ливневого дождя или полива и обесструктурируется. Комки и зерна ее размываются водою, почва покрывается вредоносной коркой.

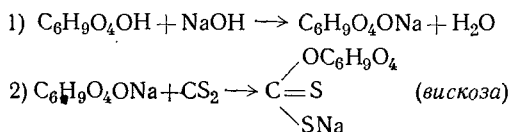
Значительно более фундаментальное оструктурирование почвы достигается в результате возделывания в севообороте трав, особенно многолетних. Созданная под травами в случае высокого их урожая и хорошо развитой корневой массы структура сохраняется несколько лет и лишь постепенно, через 4—5 лет, утрачивается под пропашными и особенно злаковыми зерновыми культурами. Казалось бы, этот метод оструктурирования почвы вполне удовлетворителен для сельскохозяйственного производства. Однако это не так. Существенное оструктурирование почв, например подзолистых, достигается под травами (смесь клевера красного с тимофеевкой) лишь в результате двухлетнего их пользования, а максимум оструктурирующего действия более сложной травосмеси (4—5 компонентов трав) отмечается через 4—5 лет произрастания трав. Таким образом, срок, необходимый для оструктурирования почв в травопольном севообороте, составляет примерно половину того времени, на которое в последующем продлится эффект оструктурирования. Баланс весьма скромный, особенно если учесть экономическую невыгодность трав по сравнению с другими высокоурожайными зерновыми, зернобобовыми и пропашными культурами. Поэтому естественные поиски агрономической мысли по изысканию более быстрых и более эффективных методов улучшения физических свойств почвы путем внесения в нее каких-либо мелиорирующих веществ. Такими веществами издавна были: навоз, торфяные крошка и компост, известь, гипс. Целью внесения этих удобрений было не только обогащение почвы питательными веществами, но и улучшение ее реакции (при внесении извести и гипса) и улучшение физических свойств почвы. Положительное мелиорирующее действие этих приемов на свойства почвы, на ее плодородие — очевидно. Но очевидно также, что потребные дозы их для мелиорации почвы, измеряемые многими тоннами, велики, а темп улучшения физических свойств и структуры почвы замедленный. Этим нужно объяснять, что поиски методов искусственного оструктурирования почв продолжались и особенно активизировались в последние десятилетия.

Первую попытку приготовить искусственный клей для оструктурирования почвы в конце прошлого века сделали А. А. Фадеев и В. Р. Вильямс. Они получали аммиачную гумусовую вытяжку из северного чернозема и использовали ее в опыте для оструктурирования смеси «воробьевского» третичного песка и илистой фракции из «гжельской» глины. Аналогичную попытку делали Свен Оден и Н. И. Саввинов, получая щелочную вытяжку из торфа (1936).

С 1932 по 1936 г. обширные исследования в области искусственного оструктурирования почв были проведены в АФИ под руководством А. Ф. Иоффе и Д. Л. Талмуда (Ф. Е. Колясев, П. В. Вершинин, В. П. Константинов, Н. Я. Солечник). В качестве структуров были использованы битумы, торфяный клей, смоляный клей и др. Среди них особое значение придавалось двум препаратам — вискозе и коллоиду А Талмуда.

Коллоид А получается по рецепту Талмуда путем воздействия на сульфитные щелока глутинном, добываемым из осеина костей. Предназначен он для кислых почв. Вносится в почву сухим порошком. В почвенном растворе пептизируется. Катион щелочи структуров входит в поглощающий комплекс почвы, вытесняя из него водород. Реакция раствора подкисляется, вследствие чего коллоид А коагулирует и скрепляет механические элементы почвы.

Второй препарат вискоза получается из целлюлозы путем обработки ее 17—18-процентной NaOH, а затем CS₂. Реакция проходит так:



Вискоза — вязкий гель, растворимый в воде. Вносится в почву в жидком виде при отношении концентрации — вискоза : вода = 1 : 1; 1 : 2; 1 : 4; 1 : 8; 1 : 12. Оструктурируемая почва пропитывается раствором. После подсыхания почвы «до 50—60% от влагоемкости», она обрабатывается для получения нужной по форме и размерам структуры. При подсушивании почвы вискоза свертывается и получается прочная и водопропрочная структура.

В основу действия этих препаратов на почву полагалась теория Д. Л. Талмуда — теория молекулярного припоя (1932). По этой теории оструктурирующие вещества должны одевать почвенные частички сплошным мономолекулярным слоем. Этот поверхностно-активный слой изменяет поверхностную энергию на границе раздела двух контактирующих твердых фаз и обуславливает их склеивание.

По данным П. В. Вершинина, для оструктурирования почвы означенными препаратами требуется их от 0,5 до 1% к весу почвы (1958). Если рассчитать это количество на пахотный слой толщиной в 20 см при объемном его весе 1,2 г/см³, то для оструктурирования 1 га пахотного слоя потребуется структуров 12—24 т.

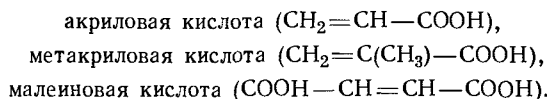
В полевых опытах при внесении вискозы урожай овса получился менее контрольного. При внесении торфяного клея и коллоида А были получены прибавки урожая в 3—5 ц/га при величине урожая на контроле 20,06 ц/га.

Высокая доза структуров, необходимая для оструктурирования почв, небольшие и неустойчивые прибавки в урожай и кратковременность действия предложенных структуров были причинами того, что они не вошли в сельскохозяйственное производство.

Аналогичные работы по оструктурированию почв были выполнены в 1944—1948 гг. в США. Для оструктурирования почв использовались: силикат натрия, кремнеорганические соединения, метилцеллюлоза, стеариновая, альгиновая, абиетиновая кислоты и другие аналогичные препараты. Эти исследования не дали практически приемлемых результатов и в практику сельского хозяйства также не вошли.

Принципиально новое направление в оструктурировании почв наметилось с 1950 г. Для этой цели были использованы новые высокомолекулярные соединения — полимеры и сополимеры, получившие собирательное название «крилиумов». Остановимся кратко на теории и истории этого вопроса.

Крилиумы — в основном производные трех органических кислот: акриловой, метакриловой и малеиновой (Чичибабин, 1957). Приводим их формулы:



Как видно из формул, все эти кислоты обладают двойными этиленовыми связями, способными (под влиянием различных катализаторов) к раскрытию. Следствием раскрытия двойной связи в мономере является возникновение двух других ковалентных связей в молекуле данного вещества. Из мономера, скажем, акриловой кислоты ($\text{CH}_2=\text{CH}-\text{COOH}$) возникает мономерное звено: ($-\text{CH}_2-\text{CH}-\text{COOH}$). По линии вновь возникших ковалентных

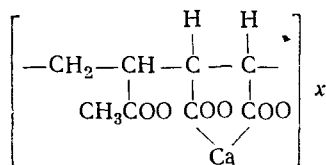
связей может идти присоединение новых молекул. Получается цепь (возможно глыба) молекул, или полимер. В полимерной цепи могут участвовать и производные названных кислот, содержащие активные функциональные группы, как карбоксильная (COOH), нитрильная ($-\text{CN}$), аминогруппа ($-\text{NH}_2$), амид кислоты ($-\text{CO}-\text{NH}_2$) и др.

Приводим примеры таких производных: акрилонитрил ($\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CN}$) мономер; акрилонитрил после раскрытия двойной этиленовой связи ($-\text{CH}_2-\text{CH}-\text{CN}$) — мономерное звено;

в результате полимеризации звеньев акрилонитрила возникает цепь ($-\text{CH}_2-\text{CH}-\text{CN}$) x — полимер акрилонитрила, в написа-

нии которого x означает коэффициент полимеризации, указывающий количество полимерных звеньев, участвующих в цепи.

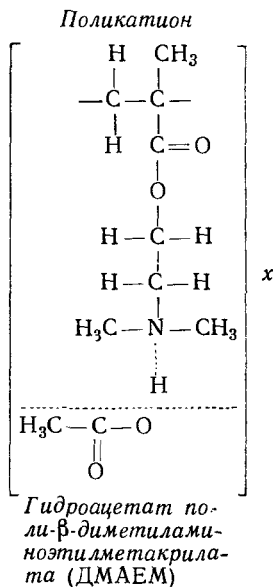
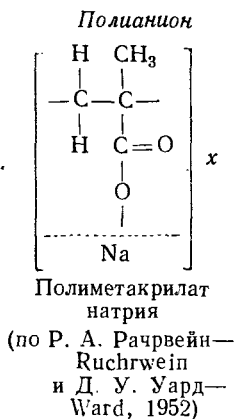
Если в полимерной цепи участвуют одинаковые мономерные звенья, цепь образует *полимер*. Если цепь образована различными полимеризующимися звеньями, она носит название *сополимера*. Примером последнего может быть кальциевая соль сополимера винилацетата и малеиновой кислоты:



Количество мономерных звеньев, участвующих в полимерной или сополимерной цепи, может достигать многих тысяч, в результате чего возникает гигантская молекула с молекулярным весом в десятки и сотни тысяч единиц.

Так как вышеназванные полимеризующиеся соединения в растворе способны диссоциировать преимущественно по связям активных функциональных групп, то в результате отдиссоциации ионов — анионов или катионов — в мономерных звеньях возникают *полианионы* или *поликатионы*, несущие заряды.

Приведем примеры поликатиона и полианиона; пунктиром показана линия отдиссоциации ионов



Полиэлектролиты, несущие то положительные, то отрицательные заряды, в почве взаимодействуют с почвенными коллоидами,

CRD — 186), гидролизированный полиакрилоамид ($-\text{CH}_2 - \text{CH} -$
 $-\text{CO} - \text{NH}_2)_x$ (сокращенное название «Seraпан»), натриевая соль
гидролизованного полиакрилонитрила (HPAN — CRD — 189).

Эти препараты были испытаны во многих лабораториях и полевых опытах. В почву они вносились в виде порошка на глубину 6 дюймов (15 см) с последующим тщательным ее перемешиванием, и в виде раствора — путем дождевания в дозах от 0,025 до 0,1% к весу почвы.

Результаты работ опубликованы в специальном выпуске журнала «Soil science» за 1952 г., № 6 и в том же журнале за 1954, 1955, 1957 гг. и др.

Предварительные выводы сводились к следующему: а) крилиумы повысили водопрочность и порозность агрегатов; увеличили число пластичности почвы при одновременном снижении ее липкости, что способствует облегчению обработки поля; б) значительно увеличилась водопроницаемость почв и уменьшилась испаряющая их способность; в) «крилиумы» — CRD — 186 и CRD — 189 не препятствуют всхожести растений, не подавляют микробиологической деятельности почвы и не угнетают почвенную фауну, вместе с тем они якобы не подвержены быстрому разложению микроорганизмами.

В дальнейшем исследования по изучению «крилиумов» на почву продолжались в США, Англии, Бельгии, Италии, ФРГ, ГДР, Венгрии, Румынии, Польше и в некоторых других странах, где также стали изготавливать свои препараты крилиумов. В ФРГ, например, был синтезирован и испытан препарат — «Rohagit» — кальциево-натриевая смесь соли сополимера метакриловой кислоты и метилового ее эфира — вносится в почву в виде порошка; в ГДР предложен «крилиум» «Verdickung AN» — вязкий, растворимый в воде гель натриево-аммонийной соли полиакриловой кислоты.

В СССР исследования по использованию структурных клеев проведены в Агрофизическом институте (П. В. Вершинин, И. Б. Ревут, Г. Л. Масленкова и др.). См. публикации института за 1958, 1959, 1960, 1961 гг. В частности, Г. Л. Масленковой под руководством И. Б. Ревута выполнены тщательные эксперименты по выявлению взаимодействия гидролизованного полиакрилоамида с каолинитом. Она пришла к выводу, что микроструктура каолинита обуславливалась в основном коагуляционным процессом, а процесс макроструктурообразования почвы при взаимодействии с нею полимеров имеет в своей основе возникновение межмолекулярных водородных связей.

Использованием полимеров для оструктурирования почв стали заниматься и в ряде других учреждений: во Всесоюзном научно-исследовательском институте удобрений и агропочвоведения (ВИУА, В. И. Штатнов), в лаборатории эрозии почв Института почвоведения Узбекской ССР (В. Б. Гуссак и К. П. Паганяс), в Украин-

ском научно-исследовательском институте физиологии растений (УНИИФР, Власюк П. А. и С. А. Гордиенко).

В лаборатории физики и технологии почв Почвенного института АН СССР (В. Н. Димо, С. А. Модина, А. Г. Бондарев) до 1961 г. и на кафедре физики и мелиорации почв биолого-почвенного факультета МГУ (А. И. Мосолова, Т. Н. Красильникова, Л. Х. Таймуразова и др.) использование полимеров для искусственного оструктурирования и мелиорации почв изучается лабораторными и полевыми методами с 1956 г.

До настоящего времени как в оценке зарубежных ученых, так и в исследованиях, проведенных в СССР, нет единства мнений о значимости полимеров. В научной литературе по данному вопросу можно встретить самые различные мнения, хотя большинство исследователей склоняется к положительной оценке влияния высокомолекулярных соединений на почву.

Разногласия по данному вопросу понятны. Дело в том, что один и тот же структур по-разному действует в разных почвенных и климатических условиях и даже на разные горизонты одной и той же почвы. Огромное значение имеет доза структуратора, вносимого в почву, метод его внесения, растения, под которыми он испытывался, а также химический характер самого полимера.

Вкратце осветим несколько методических вопросов, а затем синтезируем результаты исследований различных авторов на почвах СССР.

Из работ, проведенных под руководством Качинского, прежде всего следует, что оценку действия полимера нужно учитывать в строгом соответствии со свойствами почвы, в которую он внесен. Одна и та же доза полимера по-разному скажется на оструктурировании почв разного типа и даже на различных горизонтах одной и той же почвы (табл. 51 и рис. 84).

Как следует из данных таблицы и рисунка, оструктурирующий эффект полимеров, особенно слабо действующих, как полиакрилонитрил и Verdickung AN, разный в зависимости от почвенного материала. Особенно резкая разница наблюдается для горизонта A_{Π} и A_2 дерново-подзолистой почвы, которые сильно различаются и по составу:

Горизонты	Гумус по Тюрину	Сумма погл. катионов м-экв.	Содержание ила ($<0,001$ мм)
A_{Π} 0—20	1,80	5,45	6,02
A_2 25—35	0,31	1,55	3,61

Наблюдается строгая закономерность: чем почва богаче гумусом и коллоидами вообще, т. е. чем выше ее потенциальная способность к оструктурированию, тем сильнее на такую почву действие крилиумов. На основе таблицы 51 и рисунка 84 можно отметить еще одну общую и очень важную закономерность влияния всех испытанных крилиумов на прочность и водопрочность агрегатов. Они в несколько раз

Таблица 51

Водопрочность агрегатов по Саввинову в зависимости от типа структур. Фракции $> 0,25$ мм в % к весу почвы

Тип структур	Дерново-подзолистая суглинистая почва				Светлокаштановая солонцеватая суглинистая почва				Примечание
	A _п , 0—20 см		A ₂ , 25—35 см		A ₁ , 0—15 см		B ₁ , 15—37 см		
	агрегаты								
	естест.	искусст.	естест.	искусст.	естест.	искусст.	естест.	искусст.	
Контроль	20,22	0,12	2,42	0,0	17,14	0,63	31,71	15,77	Искусственные агрегаты готовились из фракции <0,25 мм без перематия почвы при относительной влажности 70%.
Полиакрилонитрил гидролизированный	43,78	6,86	11,94	2,62	32,84	10,11	77,23	27,73	
Verdickung AN	47,40	5,88	37,52	3,20	64,21	23,46	84,26	40,43	В анализ шли естественные и искусственные агрегаты размером 5—7 мм.
Separan	86,96	39,13	77,13	39,16	77,98	40,90	93,70	41,86	
Vama	62,62	9,28	43,34	21,93	—	—	—	—	Структуры внесены в жидком виде в дозе 0,1% к весу почвы

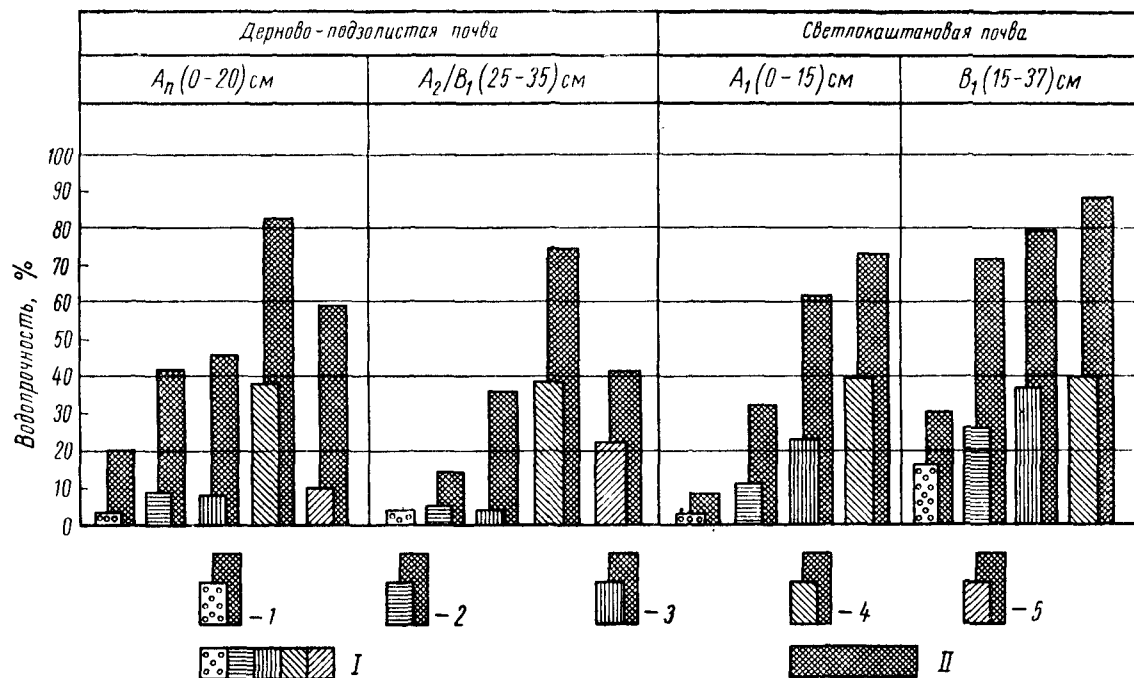


Рис. 84. Водопрочность агрегатов (по Саввинову) в зависимости от типа структора. Фракции $> 0,25 \text{ мм}$ в % к весу почвы. Доза структора 0,1% к весу сухой почвы (по материалам С. А. Модинной и А. И. Мосоловой)

1 — контроль; 2 — гидролизированный полиакрилонитрил; 3 — Verdickung AN; 4 — Separan; 5 — Vama; I — искусственные агрегаты; II — естественные агрегаты

сильнее обеспечивают прочность и водопрочность уже существующих в почве агрегатов по сравнению с искусственными агрегатами, создаваемыми из распыленной почвы. При этом чем выше водопрочность естественных агрегатов, тем сильнее она закрепляется с помощью полимеров. Например, гидролизированный полиакрилонитрил повышает количество водопрочных агрегатов из A_n дерново-подзолистей почвы с 20,22% до 43,78% — приращение на 23,56%, а та же доза структуратора в подзолистом горизонте A_n увеличивает процент водопрочных агрегатов лишь на 9,52% — с 2,42% до 11,94%. Такая же закономерность наблюдается и в отношении других структуров. Как видно из таблицы 51, максимальный эффект в содержании водопрочных агрегатов в обоих исследованных почвах и в обоих их горизонтах достигнут для тех образцов, которые и в природном состоянии обладают лучшей по сравнению с другими образцами водопрочностью.

Видимо, существующий в почве коллоидный и другой природы цементирующий агрегаты «каркас», взаимодействуя с полианионами и поликатионами крилиумов, приобретает возрастающую прочность и водопрочность. В случае же разрушения этого необратимо свернутого «каркаса» крилиум сам по себе в малых дозах не в состоянии его восстановить и обеспечить суммарный эффект цементации, возможный при сложении цементирующих систем почвы и структуратора. Отсюда вывод, что при всех условиях, в том числе и при использовании крилиумов в сельском хозяйстве, имеющаяся агрономически ценную структуру в почве нужно путем рациональной обработки разумно сохранять, ибо для создания новой структурной пашни из распыленной массы почвы потребуются значительно больше сил и средств, чем для улучшения уже имеющейся структуры.

При изготовлении искусственных агрегатов для испытания их в лаборатории на механическую прочность, водопрочность и т. д. нужно придерживаться всегда одной и той же методики затворения, так как от нее не в меньшей мере, чем от испытываемого полимера, зависит качество агрегатов.

Из работ Виленского, Вершинина, Копосова и других известно, что из любого почвенного материала тяжелого механического состава, кроме сильно известковых и засоленных пород, после тщательного перемятия и плотной упаковки его, можно создать весьма водопрочную структуру, не прибегая ни к каким крилиумам. Водопрочность в этом случае обуславливается образованием в агрегате преимущественно неактивных пор, заполняемых при увлажнении агрегата адсорбированной и тонкокапиллярной водой. Но мы уже отмечали выше, что такая структура агрономически неприемлема.

Критерием степени допустимой упаковки агрегатов при их затворении должна быть их порозность, удовлетворительные размеры которой колеблются от 40 до 45%, хорошие от 45 до 50%

и отличные $> 50\%$. Но порозность и водопрочность в известной мере антагонисты (табл. 52). Как видно из данных таблицы 52, для контрольных агрегатов и для всех крилиумов наблюдается одна и та же закономерность: по мере усиления перемешивания образца почвы при затворении агрегатов порозность их сокращается, а водопрочность возрастает. В этом случае целесообразно не добиваться максимальной водопрочности за счет недопустимого снижения порозности агрегатов, а остановиться на перемешивании образца при затворении агрегатов в интервале 1—2 мин (1,5 мин). Здесь же попутно отметим, что структуры Vama и Serapan обеспечивают высокую водопрочность искусственных агрегатов при хорошей их порозности.

Следующий методически важный вопрос — целесообразная влажность затворения искусственных агрегатов из распыленной массы почвы. Из уже упомянутых работ Виленского и других известно, что наиболее плотной упаковки механических элементов в агрегате при обработке и наибольшей его водопрочности легче достичь при влажности почвы, равной общей ее влагоемкости*. Однако, во-первых, агрегаты в этом случае будут мало пористыми, а во-вторых, при такой влажности невозможна работа с орудиями обработки в поле. Проведя ряд сравнительных экспериментов, мы рекомендуем производить затворение искусственных агрегатов всегда при одной и той же степени смоченности почвы, а именно в интервале 70—75% относительной ее влажности.

Для действия крилиумов имеет значение и способ внесения их в почву: во всех случаях оструктурирующее действие крилиумов сказывается скорее и сильнее при внесении их в почву не порошком, а раствором, так как в этом случае достигается более полное и более равномерное взаимодействие полимера с почвой.

Краткие итоги использования полимеров для искусственного оструктурирования почв в СССР. Как отмечалось выше, ряд научных учреждений в СССР занимается проблемой искусственного оструктурирования почв с помощью полимеров. К настоящему времени накопился значительный экспериментальный материал по оценке полимеров (то же крилиумов, структуров) как отечественного, так и зарубежного производства в означенных целях. Большая часть материалов относится к зонам таежной (подзолистой), каштановой и сероземам. Это естественно, так как именно в этих зонах почвы характеризуются не вполне удовлетворительной природной структурой и издавна привлекают внимание необходимостью искусственного их оструктурирования. До сих пор такая цель достигалась обработкой, известкованием кислых почв, гипсованием солончак, применением органических и минеральных удобрений, травосеянием: Почвы черноземные, структурные от природы, меньше при-

* Под общей влагоемкостью понимается максимальное количество воды, которое почва воспринимает в данных условиях и удерживает в себе при наличии свободного оттока гравитационной воды.

Влияние интенсивности перемешивания и перематия на водопрочность и порозность искусственно полученных агрегатов при закреплении их полимерами
 (анализ водопрочности по Андрианову, расчет водопрочности в % по Качинскому; дерново-подзолистая почва $A_{п0}$ (0—20 см))

Структор	Без перемешивания		Слабое перемешивание 0,5 мин		Среднее перемешивание 1 мин		Сильное перемешивание 2 мин		Перематие в течение 3 мин	
	водопрочность	порозность	водопрочность	порозность	водопрочность	порозность	водопрочность	порозность	водопрочность	порозность
Контроль (без структурора)	15,0	48,92	70,1	48,58	95,0	44,54	95,0	45,18	97,9	36,06
Полиакрилонитрил гидролизированный	76,2	49,42	85,6	46,84	94,7	43,58	98,5	39,14	99,5	37,83
Verdickung AN	89,0	50,18	89,1	50,33	95,7	46,50	98,7	42,70	99,9	37,76
Separan	95,9	55,80	99,2	53,16	100	49,20	100	47,07	100	36,40
Vama	95,4	52,10	95,9	51,44	97,8	45,62	99,9	41,29	99,8	36,74

Примечание. Искусственные агрегаты готовились из фракции $< 0,25$ мм. Размер агрегатов 5—7 мм. Структоры внесены в раствор в дозе 0,1% к весу почвы. Порозность естественных агрегатов $A_{п0}$ —41,79%. За 100% водопрочности принимается водопрочность агрегатов, которые капиллярно насыщенными не распадаются под водой за 10 мин.

влекали внимание земледельцев с этой стороны. И в данное время в разбираемой нами проблеме черноземы не являются объектами первоочередного внимания, но в подзоне южных черноземов, на старопашках о них не следует забывать хотя бы в целях борьбы с засухой и с ветровой эрозией почв.

Разными исследователями получены материалы, характеризующие влияние полимеров не только на структуру почв, но и на другие ее свойства, как объемный вес, порозность, водопроницаемость, влажность и др. В данной работе мы не имеем возможности входить в рассмотрение всех этих свойств, а ограничимся в основном лишь примерами структурного ее состава. К этому побуждает и тесная связь всех физических свойств почвы с структурным ее состоянием: если с помощью полимеров улучшается структура почвы, то это неизбежно повлечет за собой изменение в положительную сторону других свойств и режимов почвы.

В сводной таблице 53 приводим результаты исследований, выполненных разными авторами на дерново-подзолистых почвах.

Как следует из данных таблиц 51 и 53, все испытанные полимеры значительно повысили содержание водопрочных агрегатов в почвах, при этом, естественно, с повышением дозы крилиума повышается и степень оструктуренности почвы. Если ограничиться содержанием в почве водопрочных агрегатов, превышающим 50—60% от общего веса почвы, то потребное количество крилиума для этой цели выразится в среднем 0,1% к весу почвы.

Меньше структурных клеев требуется для агрегирования почв, легких по механическому составу, но зато и срок их действия на легких почвах значительно короче. Так, по данным американских почвоведов, по исследованиям Н. А. Качинского, В. И. Штатнова, Н. И. Щербаковой, В. Б. Гуссака, оструктурирующее действие полимеров на суглинистых и глинистых почвах сохраняется от 3 до 5 лет, тогда как, по материалам П. А. Власюка и С. А. Гордиенко, на супесчаных и песчаных почвах Полесья оно ограничивается одним вегетационным сезоном.

Значительные результаты по оструктуриванию комплекса почв каштановой зоны, включая солонцы, были достигнуты в опытах А. И. Мосоловой в Волгоградской области и в опытах С. А. Гордиенко в Херсонской области Украины. На рисунке 85 показана часть этих работ, относящихся к подзоне светлокаштановых почв.

Как видно на рисунке, в контрольном образце подавляющая масса всех агрегатов была представлена фракцией $< 0,25$ мм (рис. 85, 1). Внесение структуров в естественные агрегаты почвы в дозе 0,1% к ее весу во всех случаях сопровождалось повышением их водопрочности. Особенный эффект отмечен для Separap. Агрегаты, закрепленные этим препаратом, повысили свою водопрочность до 65—80%.

Значительно слабее оструктурирующее действие полимеров проявилось при агрегировании распыленной почвы. В этом случае

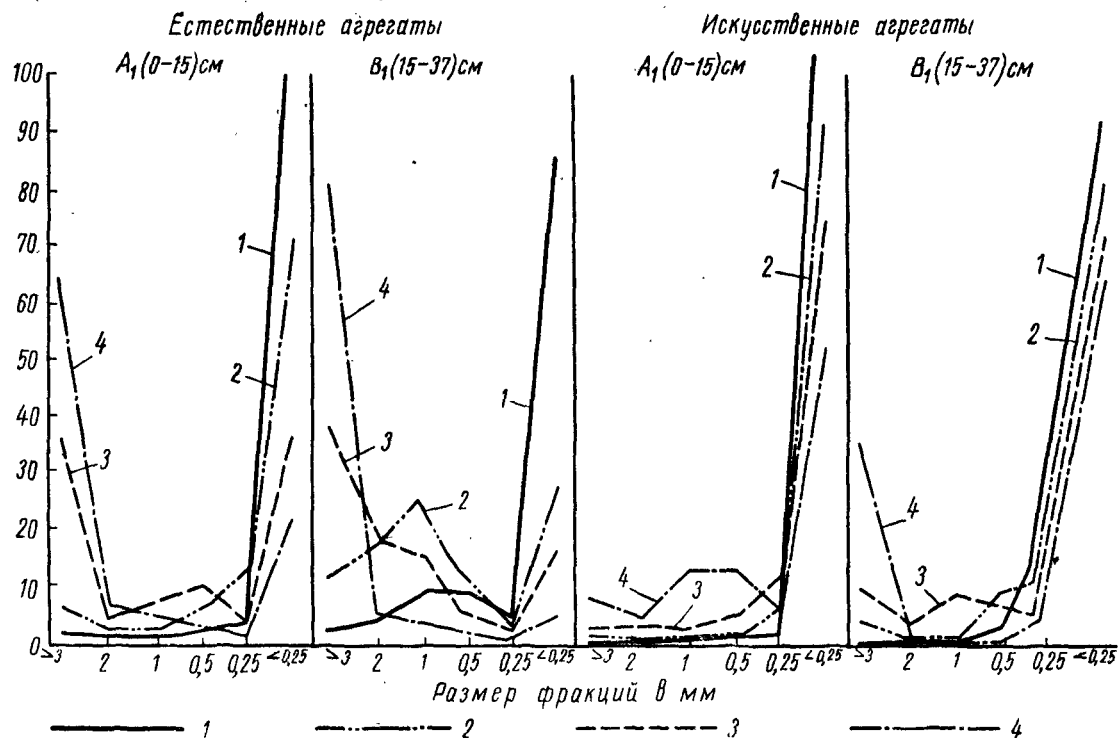


Рис. 85. Содержание водопрочных агрегатов в светлокаштановой солонцеватой тяжелосуглинистой почве в % в зависимости от характера структур (для дозы 0,1% к весу почвы, водопрочность — по Саввинову):

1 — контроль; 2 — полиакрилонитрил; 3 — Verdickund AN; 4 — Separan

Т а б л и ц а 53

Влияние различных полимеров на образование водопрочной макроструктуры почвы ($>0,25$ мм), %
(метод учета водопрочных агрегатов по Саввинову)

Почва	Крилим	Метод внесения	Доза крилима к весу сухой почвы, %							Автор эксперимента
			0	0,001	0,01	0,025	0,05	0,1	0,25	
Дерново-подзолистая суглинистая. Ленинградская обл.	Кальцевая соль винилацетата и малеиновой кислоты Vama (США)	Порошком Раствором	— —	— —	— —	— —	38,8 48,7	62,4 66,0	70,2 74,2	П. В. Вершинин, 1959
	Гидролизированный полиакрилонитрил СССР	Порошком Раствором	— —	— —	— —	— —	33,8 33,0	45,6 53,2	68,4 72,6	
Дерново-подзолистая тяжелосуглинистая. Московская обл.	Полиакрилоамид-ПАА (СССР)	Эмульсией Порошком	41 —	— —	— —	50	50 43	— —	50 —	В. И. Штатнов, Н. И. Щербакова, 1963
	Сополимер метакриловой кислоты с метакриламидом СОП-8 (СССР)	Эмульсией	41	—	—	—	53	—	48	
Дерново-подзолистая супесчаная. Житомырская обл.	Полиакрилоамид-ПАА (СССР)	Эмульсией	9,5	28,7	45,6	—	63,0	—	—	П. А. Власюк, С. А. Гордиевко, 1962
	Сополимер метакриловой кислоты с метакриламидом СОП-8 (СССР)	Эмульсией	9,5	25,0	51,0	—	60,3	—	—	

ни один из полимеров не поднял водопрочность агрегатов до удовлетворительного уровня.

По силе агрегирования использованные препараты можно расположить в ряд: гидролизированный полиакрилонитрил (СССР), Verdickung AN (ГДР), Separan (США) *.

Значительные исследования по искусственному оструктуриванию сероземов выполнили в лаборатории эрозии почв Почвенного института Узбекской ССР В. Б. Гуссак и К. П. Паганяс. Как известно, сероземы обладают отличной микроструктурой при слабо выраженной макроструктуре почвы. В орошаемом же земледелии и особенно при культуре хлопчатника большую роль играет и макроструктура. В случае плохой ее выраженности почва оказывает высокое сопротивление при пахоте. При поливах она обладает недостаточной водопроницаемостью и влагоемкостью, а после поливов заплывает коркой, ускоряющей непроизводительное испарение воды из почвы и препятствующей всходам растений. Для борьбы с коркой требуются частые культивации полей, что осложняет и удорожает производство хлопка. Для оструктурирования сероземов обычно в хлопковые севообороты вводят на несколько лет люцерну. Однако этот метод оструктурирования сероземов — затяжной: он длится около трех лет, поэтому изыскание искусственных методов оструктурирования почв под хлопчатник в сероземной зоне приобретает особо важное значение.

В. Б. Гуссак и К. П. Паганяс выполнили для этой цели исследования в лаборатории и в полевых условиях. Для искусственного оструктурирования сероземов ими испытан ряд полимеров зарубежного и отечественного производства. Наиболее эффективным из них, по заявлению авторов, оказался полимер К-4 — полиакрилонитрил, гидролизированный по способу Института химии Академии наук Узбекской ССР (табл. 54).

Таблица 54

Выход водопрочных агрегатов ($> 0,25$ мм)
в полевых опытах 1960—1962 гг., %
(серозем типичный суглинистый на лёссе;
структур вносился в слой почвы 0—8 см)

Глубины, см	1960 г.			1961 г.			1962 г.	
	контроль, лето	К-4 150 кг/га		контроль, весна	К-4 150 кг/га		контроль, весна	К-4 150 кг/га весна
		лето	осень		весна	осень		
0—5	17	28	25	18	43	15	4	30
5—20	8	10	12	3	6	5	1	3
20—40	9	11	8	4	5	4	1	2

* При оценке препаратов следует учитывать, что Separan и Verdickung AN синтезировались специально для оструктурирования почв, тогда как гидролизированный полиакрилонитрил получен нами из сырья текстильной промышленности СССР.

Как видно из данных таблицы 54, при дозе К-4 150 кг/га на слой почвы толщиной 8 см содержание водопрочных макроагрегатов ($> 0,25$ мм) ни в одном случае не достигло 50% к весу почвы, но по сравнению с контрольной делянкой в отдельные годы, особенно весной, оно возрастало на 11—25—26%. Этого оказалось достаточно, чтобы резко снизить коркуемость и испаряющую способность серозема при одновременном повышении его порозности и водопроницаемости. Вследствие таких изменений в несколько раз сократилось количество необходимых культиваций почвы за вегетационный период, улучшился ее водный режим, снизилась эродлируемость пахотного слоя при поливах, повысился коэффициент полезного действия минеральных удобрений, а в конечном счете повысился и урожай хлопчатника.

Влияние полимеров при оструктурировании почв на урожай сельскохозяйственных культур. В почвенной и агрономической практике можно найти по этому вопросу самые разноречивые утверждения, начиная от признания высокого действия полимеров на урожай растений (например, Гуссак, Гусаняс, Паганяс, 1963) до полного отрицания или признания слабого положительного действия полимеров на урожай растений (Дон Киркхам, Р. Е. Филипс и др., 1959). Это вполне объяснимо. Полимеры применяются в первую очередь для оструктурирования почв и улучшения физических их свойств. Ясно, что если почва от природы обладает хорошей естественной водопрочной структурой, как, например, обыкновенные или тучные черноземы, и благоприятными для растений физическими свойствами, то, во-первых, не возникает необходимости такую почву оструктурировать и, во-вторых, некоторое еще дальнейшее повышение водопрочности агрегатов в этом случае не даст агрономического эффекта или он будет очень слабым.

Наоборот, оструктурирование с помощью полимеров почв от природы бесструктурных или слабо структурных в корне изменит в положительную сторону все их физические свойства, как порозность, водопроницаемость, влагоемкость, мобильность воды в почве, испаряющую ее способность, а также физические режимы — водный, воздушный, тепловой. Но физические режимы в почве не существуют изолированно. С ними тесно связаны химические, физико-химические и биологические режимы, а значит, и почвенное плодородие. В этом случае при искусственном оструктурировании бесструктурных почв, как следствие, должно повышаться их плодородие, а значит, и урожай на них сельскохозяйственных растений. Такая закономерность подтверждена опытами.

Так, Аллисон (США, 1956) в результате длительного испытания крилиумов Vama и HPAN на солонцах, обладающих от природы отрицательными физическими свойствами, пришел к заключению, что эффект от применения крилиумов на урожае растений, при прочих равных условиях, сказывался тем сильнее, чем более злостным был исходный солонец. На солонцах с содержанием поглощен-

ного натрия 29, 40 и 47% от емкости поглощения почвы урожаями сладкой кукурузы на фоне внесенных крилиумов соответственно возрастали на 75, 200 и 260%.

В СССР рядом опытов показано резкое увеличение урожаев при внесении в почву полимеров. На опытном поле Института кормов при станции Луговая Московской области с дерново-подзолистой суглинистой почвой внесение лигносульфоната аммония (АК1) и лигносульфоната кальция (АК7) в дозе 0,2% к весу почвы до глубины 0—20 см привело к прибавке урожая в год внесения (1959) — по травосмеси в 15% при общем укосе сена на контроле 75 ц/га (С. А. Модина, А. Г. Бондарев). Площадь опытных делянок 8 × 8 м², повторность в опыте шестерная, прибавка в урожае достоверная.

На опытном поле Барыбино Московской области проведены четырехлетние опыты на дерново-подзолистых тяжелосуглинистых почвах Всесоюзным институтом удобрений и агропочвоведения. В различных комбинациях опытов под разные культуры испытаны: полиакрилоамид (ПАА) и сополимер метакриловой кислоты с метакриламидом (СОП-8). Повторность в опытах четверная. Авторы опыта (В. И. Штатнов и Н. И. Щербакова) отмечают прибавку в урожае в год внесения полимеров (1960) на разных культурах, по сравнению с контрольными делянками, для ПАА от 10 до 67% и для СОП-8 от 11 до 16%.

В 1960 г. на опытных участках кафедры физики и мелиорации почв МГУ в Волгоградской области также получены определенные результаты при внесении полимеров в светлокаштановую солонцеватую тяжелосуглинистую почву (табл. 55).

Т а б л и ц а 55

Урожай зеленой массы кукурузы
(площадь опытных делянок 15 м², повторность в опыте тройная,
А. И. Мосолова, Т. Н. Красильникова)

Варианты опытов	Доза структурора в % к весу почвы на слой 20 см	Высота растений в см при начале цветения	Урожай зеленой массы	
			кг/га	%
Контроль	0	60—80	5 490	100
Лигносульфонат NH ₄ ⁺	0,1	100—120	5 800	106
Лигносульфонат Са ⁺⁺	0,1	140—150	9 090	166
Контроль	0	60—80	5 600	100
Лигиосульфонат NH ₄ ⁺	0,2	160	11 880	212
Лигиосульфонат Са ⁺⁺	0,2	120	7 080	128

Увеличение дозы структурора АК7 вплоть до 1% к весу почвы сопровождалось нарастающим эффектом в развитии растений, тогда как структурор АК1 уже при дозе 0,5% к весу почвы подавлял всходы и развитие растений или губил их полностью.

Как отмечалось выше, высокий эффект по оструктурированию типичных поливных сероземов и по повышению урожайности хлопчатника при внесении в почву полимера К-4 в Узбекской ССР отмечен в опытах Почвенного института республики (В. Б. Гуссак и К. П. Паганя). При норме полимера 150 кг/га «действующего начала» прибавка урожая в поле составляла 4—5 ц/га при урожаях на контроле > 30 ц/га. Авторы опыта считают, что прибавки в урожае по мере оструктурирования почвы полимером К-4 носят настолько закономерный характер, что их можно выразить уравнением регрессии: прибавки в урожае хлопка сырца постоянны на каждую единицу оструктуренности почвы.

Казалось бы, из приведенных примеров можно сделать вывод, что повышение урожаев на слабо оструктуренных почвах при внесении в них полимеров сопряжено с повышением структурности этих почв и с улучшением в них физических свойств. Однако вопрос этот нуждается в дальнейшем анализе. Дело в том, что все испытанные полимеры содержат в себе и питательные вещества, необходимые растениям, и прежде всего азот. В опытах Штатнова и Щербаковой повышение урожая от внесения ПАА и СОП-8 наблюдалось лишь в первый год их внесения, хотя оструктурирующее действие полимеров на почву сохранялось и в последующие годы. Авторы приходят к заключению, что в данном случае полимеры повышали урожай растений за счет улучшения азотного их питания.

П. А. Власюк и С. А. Гордиенко также считают, что в их опытах повышение урожаев сельскохозяйственных культур зависело не только от оструктурирования почв полимерами, но и от влияния их как длительно действующих азотных удобрений. Кроме того, внесенные в почву полимеры повышали подвижность калий- и фосфорсодержащих минеральных соединений в почве и тем способствовали улучшению питательного их режима.

В опытах, проведенных на кафедре физики и мелиорации МГУ, на дерново-подзолистых и светлокаштановых солонцеватых почвах с внесением в них АК1 и АК7 (см. выше) повышение урожаев трав и зеленой массы кукурузы в первый год внесения структуроров зависело, по-видимому, также больше от действия их как азотистых удобрений, а не как структурообразователей. Такой вывод следует из факта слабого улучшения структуры почв от внесения АК1 и АК7 в дозах 0,1—0,2% к весу почвы, а также из резкого падения (почти до нуля) прибавки в урожаях растений на второй год действия этих структуроров.

В противовес трем отмеченным опытам В. Б. Гуссак и К. П. Паганя доказывают, что на типичных поливных сероземах Узбекистана повышение урожаев хлопка-сырца при внесении в почву полимеров

и особенно структур К-4 определялось исключительно благоприятным влиянием их на структуру почв и физический их режим.

Очевидно, что вопрос о природе взаимодействия различных полимеров с почвами и о влиянии их на урожай растений нуждается в дальнейшем исследовании.

О длительности действия высокомолекулярных соединений на структуру почв и урожай растений. Полимеры, о которых говорилось в предыдущих разделах настоящей главы, как гидролизованный полиакрилонитрил, гидролизованный полиакрилоамид и др. (СССР), а тем более импортные, как Vama, HPAN, Sepapan (США) и др., пока весьма дороги. Поэтому, естественно, возникает вопрос о длительности их действия: чем длительнее будет наблюдаться положительное влияние полимера на почву и урожай растений, тем экономически он станет более рентабельным.

Имеющиеся до настоящего времени опытные материалы говорят о том, что лучшие образцы крилиумов фирмы Monsanto Chemical Co сохраняют свое действие около 5 лет. Другие структур, как АК1, АК7, практически утрачивают свое цементирующее действие через 1—2 года. Разрушение агрегатов, закрепленных полимерами, во времени происходит в основном вследствие двух причин: а) механическое разрушение их при обработках почвы и б) биологическое разрушение агрегатов микроорганизмами.

По этим вопросам в литературе имеется очень мало сведений. Мы поставили опыты для выяснения этих вопросов. В таблице 56 приведены данные для характеристики воспроизводимости цементирующей силы структур в случае повторного разрушения и затворения агрегатов. Из таблицы явствует, что различные структур в разной степени обладают сохранностью своей цементирующей силы. Наиболее стойким оказался Sepapan, наименее стойкими гидролизованный полиакрилонитрил и Verdickung AN. Цементирующая сила действия этих двух последних структур полностью утрачивается после четвертого затворения. Сильно сказываются в данном случае и свойства почвы. Так, Sepapan стойко сохраняет цементирующую способность для дерново-подзолистой почвы: снижение цементирующей способности после четвертого агрегирования равняется лишь 3—4%. Но этот же препарат на светлокаштановой почве после четвертого затворения агрегатов почти полностью утратил цементирующую способность, снизив ее с 92 до 31% при контроле в 23%.

В американских работах (Д. Р. Нильсена, Дон Киркхама и Р. Е. Филиппа, 1959) отмечается, что на почвах штата Айова полная утрата цементирующего действия крилиумов, внесенных в количестве 1 т на акр, на структуру почв наблюдается к пятому-шестому году после их внесения.

Для выяснения влияния крилиумов на развитие микроорганизмов в почве и влияния последних на длительность действия крилиумов, на кафедре физики и мелиорации почв МГУ были поставлены

**Потеря водопрочности искусственными агрегатами при повторном
разрушении и агрегировании**
(анализ по Андрианову, расчет водопрочности в % по Качинскому)

Структор	Повторность агрегирования	Почвы	
		дерново-подзо- листая А _П , (0—20) см	светлокашта- новая солонце- ватая А ₁ , (0—15) см
Без структора (контроль)	—	73,3	23
Полиакрилонитрил гидролизированный (СССР)	1	86,2	73
	2	74,8	34
	3	74,0	25
	4	74,7	22
Verdickung AN (ГДР)	1	89,0	92
	2	75,3	51
	3	73,0	32
	4	72,7	31
Separan (США)	1	100	84
	2	99,8	70
	3	98,2	51
	4	96,6	32
Vama (США)	1	99,9	—
	2	95,9	—
	3	93,4	—
	4	84,2	—

Примечание. Искусственные агрегаты готовились из фракции < 0,25 мм с перемешиванием в течение 1,5 мин при относительной влажности 70%. Размер агрегатов 5—7 мм. Структоры внесены в раствор в дозе 0,1% к весу почвы.

специальные опыты *. Испытывалось влияние структоров: лигно-сульфоната аммония (АК1), лигносульфоната кальция (АК7) и гидролизованного полиакрилонитрила на развитие чистых культур: *Azotobacter chroococcum*, *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus mycoides* и на общее микронаселение почвы.

Закладывалось два варианта опыта: а) количественный учет микроорганизмов; б) выявление качественного влияния структора на микроорганизмы.

* Исполнители опытов — Г. В. Шаклеина (1956) и Т. Н. Красильникова (1961), консультант — Ю. А. Худякова.

Исследуемая почва при оптимальной влажности (70% от общей влагоемкости) помещалась на 6 дней для «оживления» в термостат при t , равной 25°C . В «оживленную» почву в заданной дозе вносился структор и фиксировалось время. Через 4, 15, 30 дней после

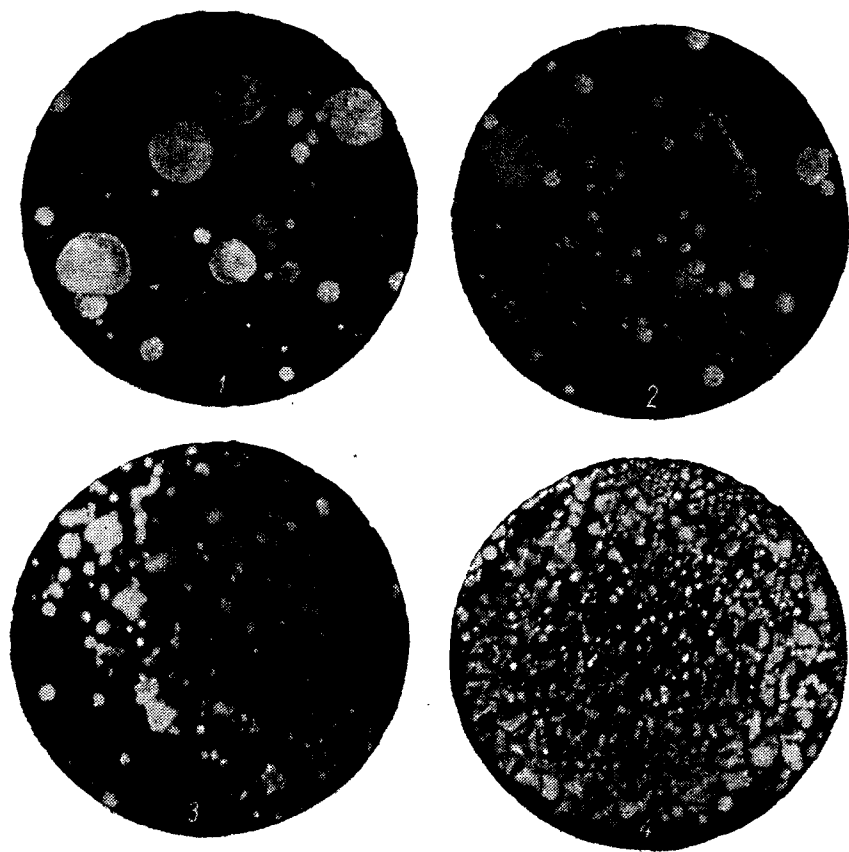


Рис. 86. Развитие гетеротрофных бактерий на среде МПА при посеве почвенной «болтушки» из гор. A_1 светлокаштановой солонцеватой почвы с добавлением структора АК7:

1 — горизонт A_1 , контроль; 2 — АК-7, доза к почве 0,25%; 3 — АК-7, доза к почве 1%; 4 — АК-7, доза к почве 2%

внесения каждого структора из почвы готовилась болтушка из расчета 1 г почвы на 100 мл воды, предварительно простерилизованной. Болтушка высевалась на разные среды: МПА, Эшби и среду Чапека. После двухдневного выдерживания кристаллизаторов в термостате при $25-30^{\circ}\text{C}$ производился учет колоний микроорганизмов.

Отмечено, что при внесении структур АК7 из болтушки, приготовленной на почвенном материале A_1 и B_1 светлокаштановой почвы, количество гетеротрофных бактерий через 4 суток было примерно такое же, как и на контроле. При посевах через 15 и 30 дней количество микроорганизмов резко повышалось, достигая максимума при дозах структур в 1 и 2% к весу почвы (рис. 86, 1, 2, 3, 4).

По-видимому, АК7 в малых концентрациях является благоприятной средой для гетеротрофных бактерий.

Несколько иная закономерность отмечена для почвенной болтушки с внесением гидролизованного полиакрилонитрила. В данном случае на первых этапах опыта (через 4 дня после внесения структур) для вариантов опыта с A_1 и B_1 отмечалось определенное угнетение микрофлоры со снижением микроорганизмов в 2 раза и более. На 15 сутки опыта наступает выравнивание с контролем, а в дальнейшем при наличии структур наблюдается стимуляция биологических процессов.

Стимулирующее действие малых доз, испытанных в данном опыте, структур на развитие микроорганизмов подтверждается и во втором качественном опыте по методу Редидиша. На поверхность пластинки из агара с произведенными на нее засевами почвенной болтушки из контроля и со структурами разной концентрации ставились алюминиевые цилиндрики с внешним диаметром 8 мм, внутренним — 6 мм, высотой 10 мм. Внутрь цилиндров вносилось по 4 капли раствора структур разной концентрации. После четырехдневной инкубации отмечено бурное развитие микроорганизмов по периферии цилиндров при концентрации структур до 1% к весу почвы (рис. 87, 1, 2, 3.). Очевидно, и в данном случае структуры стали питательной средой для микроорганизмов.

Дозы лигносульфоната аммония $> 0,5\%$, а лигносульфоната кальция $> 1\%$ к весу сахарозы вызывают сильное токсическое действие на развитие *Azotobacter chroococcum* (см. рис. 88).

Влияние крилиумов на развитие микроорганизмов в дерново-подзолистой почве изучали П. А. Власюк и С. А. Гордиенко (1963). В таблице 57 приводим часть их исследований.

Как следует из данных таблицы 58, крилиум ПАА стимулирует развитие микроорганизмов на обеих средах, будучи внесен в почву в малой дозе (0,1%), и подавляет развитие их (по крайней мере в начальной стадии действия) при высоких дозах — 0,5 и 1%. Наоборот СОП-8 резко повышает микробиологическую деятельность в почве при высоких его дозах и слабо сказывается на ней при дозе 0,1% к весу почвы.

Стимулирующее влияние полимеров на развитие микроорганизмов в почве отмечали в своих работах Боннер С. и Хели Ф. В. (1953, 1954), Л. Н. Абросимова (1960) и ряд других исследователей. Сам факт повышения микробиологической активности почвы за счет внесения в нее полимеров — явление положительное, так как это

Влияние ПАА и СОП-8 на развитие бактерий в почве
(в тысячах на 1 г почвы) *

Вариант опыта	Мясо-пептонный агар		Глюкозо-пептонный агар	
	6, VI	14, VI	6, VI	14, VI
Контроль	1 950	7 100	3 450	11 900
ПАА—1%	900	700	2 450	1 650
ПАА—0,5%	1 600	4 900	2 850	8 900
ПАА—0,1%	4 850	25 700	7 800	22 900
СОП-8—1%	12 400	54 100	3 200	13 350
СОП-8—0,5%	5 900	13 800	3 350	10 150
СОП-8—0,1%	2 300	6 900	3 550	8 100

* Дозы полимеров указаны в % к весу почвы.

соответствует повышению плодородия почвы. Однако природа действия полимеров в данном случае двоякая. Оструктуривая почву, они улучшают все физические ее свойства, водный, воздушный и тепловой режимы почвы, что в свою очередь повышает микробиологическую деятельность в ней. Но эта деятельность повышается и за счет того, что крилиумы, будучи органо-минеральными соединениями, богатыми азотом, становятся источником пищи, жизнедеятельности микроорганизмов, вследствие чего полимеры более или менее быстро распадаются и оструктурирующая их роль в почве прекращается.

Подводя итог испытанию крилиумов в целях оструктурирования почв, отмечаем:

1. Доказано, что, используя различные кондиционирующие вещества, можно быстро (в несколько дней) оструктурировать почву, создав в ней водопрочные, пористые агрегаты и сообщив ей рыхлое, благоприятное для механической обработки строение.

2. Лучшими для этой цели препаратами из испытанных являются крилиумы фирмы Monsanto Chemical Co — Sepagan и Vama, синтезированные специально для мелиорации почв. Наименьшая доза их, обеспечивающая переход слабоструктурной почвы в структурную, равна 0,05% к весу почвы, или 1,2 т/га при глубине мелиорируемого пахотного слоя 20 см. Для слоя в 10 см эта доза будет вдвое меньше.

3. Недостаточно изученным остается вопрос о длительности действия кондиционирующих веществ, утрачивающих свою цементирующую силу в процессе механического и биологического разрушения агрегатов.

4. Основным препятствием к использованию крилиумов для мелиорации почв в настоящее время является их дороговизна.

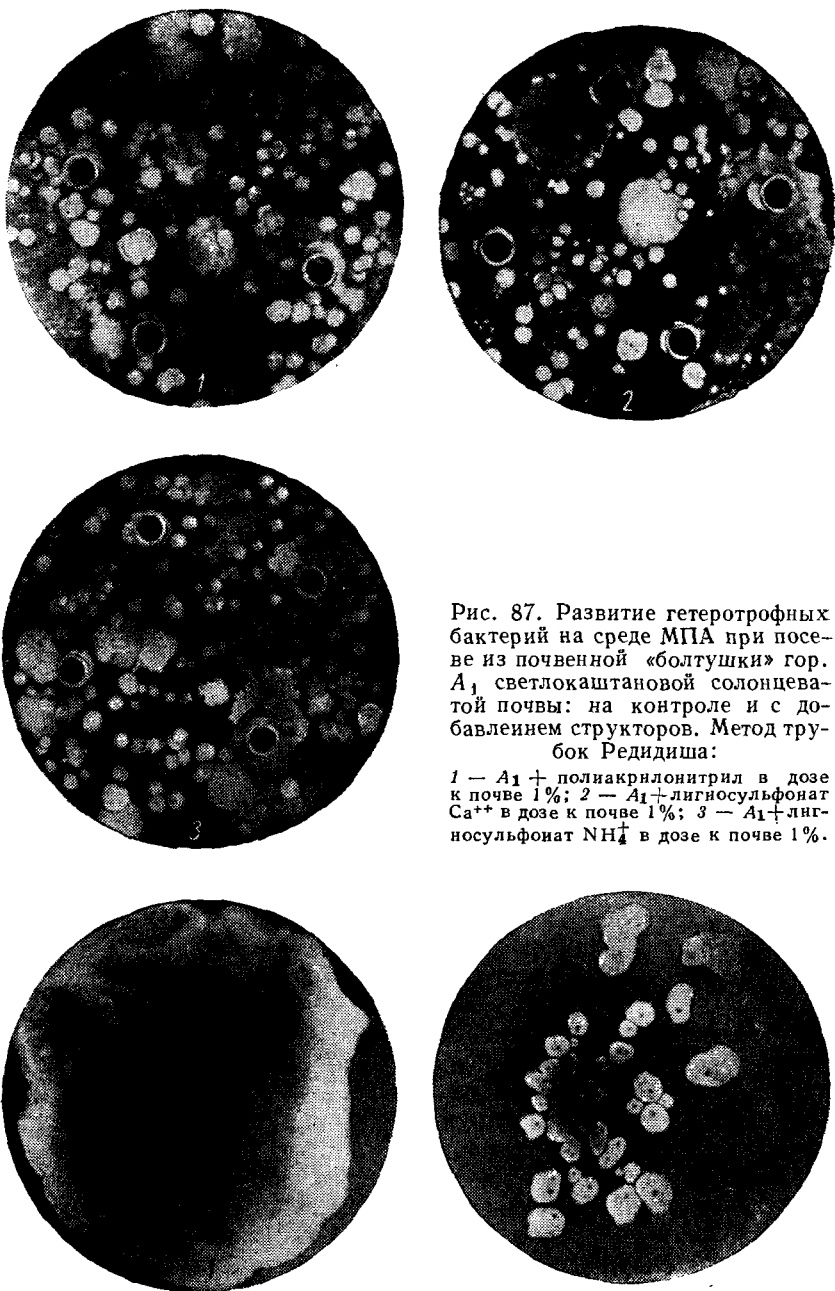


Рис. 87. Развитие гетеротрофных бактерий на среде МПА при посеве из почвенной «болтушки» гор. A_1 светлокаштановой солонцеватой почвы: на контроле и с добавлением структуров. Метод трубок Редидиша:

1 — A_1 + полиакрилонитрил в дозе к почве 1%; 2 — A_1 + лигносульфонат Ca^{++} в дозе к почве 1%; 3 — A_1 + лигносульфонат NH_4^+ в дозе к почве 1%.

Рис. 88. Развитие *Azotobacter chroococcum*:

1 — на контроле, 2 — на среде Эшби + лигносульфонат Ca^{++} в дозе 1% к весу почвы

На дороговизну крилиумов, как на препятствие к их широкому использованию в США, указывают и американские почвоведы (Д. Р. Нильсон, Дон Киркхам, Р. Е. Филипс, 1959).

Заканчиваем рассмотрение данного вопроса формулировкой требований к характеру структуров, которые желательно синтезировать:

а) структуры, или почвенные клеи, должны способствовать созданию структуры пористой, упругопрочной и водопроочной;

б) структуры не должны быть инертной примесью к почве и ядами для биологического ее населения;

в) они должны быть гидрофильны и умеренно набухаемы (не выше, чем набухаемость почвы, которая подвергается оструктуриванию), но после коагуляции или денатурирования — не растворимы в воде;

г) должны содержать запас питательных веществ, которые при постепенном распаде цементирующей массы будут усваиваться растениями;

д) процесс биологического распада «клеев» должен быть длительным (не менее одной ротации севооборота), иначе оструктурирующая роль «клея» будет неоправданно кратковременной;

е) наиболее правильным было бы изыскивать пути искусственного приготовления гумусоподобных веществ типа гуминового и ульминового комплексов;

ж) «структор» должен быть дешев и настолько «активен», чтобы эффект оструктурирования почвы достигался при малом его количестве, не выше $0,5-1 \text{ м/га}$, иначе использование его будет ограниченным.

Отмеченные препятствия к использованию кондиционирующих веществ в сельском хозяйстве в настоящее время не должны снимать этот вопрос с дальнейшей проработки. Напротив, надо устранить эти препятствия.

Для этого требуется глубже изучать вопрос о кондиционирующих веществах в различных зонах и на различных типах почв. Ведь они могут быть использованы не только для оструктурирования почв, но и для других нужд сельского и всего народного хозяйства, например, для закрепления сыпучих песков, для борьбы с пылью, пылью на аэродромах, для закрепления дна и откосов крупных каналов и др.

В разрешении этого вопроса необходимо объединить усилия почвоведов, агрономов, биологов, химиков, технологов. Нужен опытный завод и опытная лаборатория по синтезированию высокомолекулярных соединений специально для нужд сельского хозяйства, по синтезированию препаратов, доступных экономически и с высокой силой действия на почву. Полимеры и сополимеры должны войти в агрономическую практику для целей мелиорации почв, повышения их плодородия и урожаев всех сельскохозяйственных культур.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ОЦЕНКИ АГРЕГАТНОСТИ ПОЧВ. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ ПОЧВЫ К ОСТРУКТУРИВАНИЮ

В настоящем разделе излагаем лишь принципы методов учета и оценки агрегатности почв *.

В главе третьей мы уже отмечали, что о потенциальной способности к оструктуриванию почв суглинистых и глинистых можно судить на основе параллельно проведенных анализов — механического и микроагрегатного. Для этой цели предложены расчетные формулы Качинского, Фогелера, Леммермана, Бевера и Роадеса, Соколовского, А. Ф. Вадюниной.

А. Ф. Тюлин для оценки потенциальной способности почв к оструктуриванию предложил метод «дробной пептизации коллоидов».

Исходной концепцией в его дальнейших логических построениях, экспериментах и предлагаемой методике является деление «частиц» почвы на три группы: $< 1 \text{ мк}$; $1\text{—}10 \text{ мк}$ и $> 10 \text{ мк}$. Первая фракция, по мнению А. Ф. Тюлина, представлена гелями отрицательно заряженных коллоидов, которые всей своей массой могут участвовать в физико-химических реакциях. Вторая фракция ($1\text{—}10 \text{ мк}$) — механические элементы, покрытые коллоидальными «шубками», оседающими на минеральном каркасе и состоящими из полуторных окислов, кремневой кислоты и органических веществ. Эта вторая фракция — «пленки — гели», или первичные микроагрегаты, в свою очередь по составу и свойствам делится на две группы в зависимости от микрозоны в почве, где они формируются. В межкорневых пространствах, по Тюлину, где нет скопления ризосферных микроорганизмов, а существуют другие физиологические группы микроорганизмов, вторичные частички относятся к первой группе. Для них характерно пониженное количество несиликатных полуторных окислов и органических веществ. Органические кислоты скоагулированы в этом случае преимущественно катионами Ca^{++} и Mg^{++} .

Если образование таких вторичных частиц происходит в корнеобитаемом слое почвы, пишет Тюлин, вблизи корней в зоне значительного сгущения, где усиленно развиваются ризосферные микроорганизмы, то такие вторичные частицы относятся ко второй группе. Для них характерно присутствие повышенных количеств несиликатных полуторных окислов, органических веществ особой природы (лигнина, геммицеллюлозы, клетчатки, органических кислот бурой окраски) и вытекающая отсюда способность легко агрегироваться в водопрочные комочки до $0,25 \text{ мм}$ за счет самослипания без замет-

* Техника выполнения методов изложена в руководстве А. Ф. Вадюниной и З. А. Корчагиной. «Методы исследования физических свойств почв и грунтов», М., 1961.

ного участия свободных коллоидов, скоагулированных катионами Ca^{++} и Mg^{++} . Эти микроагрегаты богаты N, P, K и другими питательными элементами.

Агрегирование пылеватых частиц в комочки крупнее 0,25 мм в присутствии частиц I группы идет только за счет коагуляции таких частиц, а в присутствии частиц II группы еще и за счет слипания частиц II группы (Тюлин, 1958).

Отсюда большая водопрочность «прикорневых» агрегатов, большее содержание в них питательных веществ, а значит, и более высокая агрономическая их ценность.

Третья фракция «частиц» по Тюлину, диаметр которых более 10 мк представлена, по его мнению, элементарными частицами минералов, которые играют в структурообразовании пассивную роль. Это «голые» частицы, лишенные коллоидных пленок.

Для выделения вышеотмеченных трех фракций микроагрегатов и механических элементов почвы, обуславливающих качество ее структуры, А. Ф. Тюлиным предложена специальная методика.

Коллоидно-химический и микроскопический метод для качественной оценки агрегатов почвы предложили И. Н. Антипов-Каратаев, В. В. Келлерман и Д. В. Хан. В этом методе почвенные агрегаты последовательно обрабатываются растворами с нарастающей реактивной силой: водой, смесью $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ и NaOH , раствором Тамма и, наконец, гипобромитом натрия. После каждой обработки исследуются вещества, перешедшие в раствор, а микроскопически учитывается характер изменений, происшедших в агрегате. В результате, по мнению авторов, выявляются следующие фазы агрегирования почвы:

1) прилипание коллоидальных минеральных частиц друг к другу, по-видимому, за счет остаточных сил валентностей или сил Ван-дер-Ваальса;

2) упрочнение первичных «проагрегатов» в результате склеивания их гидратами полуторных окислов, силикагелями, иногда простыми солями, гумином. Наиболее устойчивыми и агрономически ценными являются агрегаты, скрепленные последним цементом; особенно прочными являются связи в том случае, когда молекулы гумусовых веществ полярно сорбированы на внутренних поверхностях глинных минералов монтмориллонитовой группы; второе место занимают связи, в которых клеящее органическое вещество адсорбировано на поверхности минеральных частиц через монокгенные группы гидратов окисей железа, алюминия и отчасти при помощи обменных щелочно-земельных катионов (1948, 1959).

В отмеченной теории структурообразования трех авторов не учитывается процесс коагуляции коллоидов.

Нам представляется это безосновательным. Разноименная зарядка коллоидов или коллоидов и ионов диссоциировавших электролитов, как и тепловое движение коллоидальных частиц в растворе, — исходный момент сближения механических элементов

и первичных микроагрегатов. Лишь после такого сближения вступают в действие силы Ван-дер-Ваальса и другие процессы, усиливающие водопрочность агрегатов.

Эта методика последовательной обработки агрегатов почвы реактивами с нарастающей силой их действия и последующие анализы дают для познания природы структурообразования ценные материалы. Но едва ли можно полагать, что при этом вскрывается процесс структурообразования в порядке последовательности его возникновения. Конечно, в агрегатах, тем более после просушивания почвы, имеет место старение коллоидов, явление гистерезиса. В частности, по теории трех авторов, самая активная часть коллоидов — органические вещества как бы замыкают процесс агрегатобразования, тогда как их действие должно быть первоочередным.

Не вырисовывается в этой теории также место и степень биологических процессов в агрегировании почв.

Методы анализа Тюлина, Антипова-Каратаева и других авторов, упомянутых выше, касаются природы возникновения агрегатов и дают материал к познанию их свойств, но эти методы сложны по своему выполнению; они не могут быть применены в массовых анализах при изучении почв. Ниже опишем ряд более доступных методов, которые широко вошли в практику почвенных исследований.

Метод «сухого» агрегатного анализа. Издавна в почвоведении для характеристики структуры почв используется ситовой метод. Средняя проба почвы в воздушно-сухом состоянии просеивается через колонку сит с отверстиями в 10, 7, 5, 3, 1, 0,5, 0,25 мм. Фракции агрегатов, оставшиеся на каждом сите, учитываются количественно и вычисляются в процентах к исходной навеске на воздушно-сухую или абсолютно сухую почву. Фракция диаметром < 0,25 мм находится по разности навески и суммы всех фракций крупнее 0,25 мм. Результаты анализа весьма грубы. На них влияет степень раздробленности воздушно-сухой почвы перед анализом, энергия толчков при просеивании, диапазон качания сит и др. Лучшие результаты получаются при механизации процесса просеивания: со стандартизацией размаха качания сит, частоты качаний в единицу времени, длительности процесса просеивания.

Значительно более ценные результаты дает метод рассеивания почвы на ситах в поле при естественной влажности, когда механизированным способом просеивается большая масса почвы через комплекс сит (обычно сетчатых) с различными размерами меж (квадратных отверстий). Такие определения целесообразны в поле при сравнительной оценке орудий обработки почвы, например, при испытании различных плугов и культиваторов, когда требуется установить степень крошения и агрегирования ими почвы; при сравнительной оценке пашни при разных скоростях хода трактора и др.

Наряду с размерами агрегатов, получаемых при обработке почвы, важно знать их механическую прочность. Для определения такой прочности сконструирован ряд приборов (Михаэлиса, Виленского, Вершинина и др.), позволяющих измерить усилие, потребное для раздавливания, разрезания или разрыва агрегата в воздушно-сухом его состоянии.

На рисунке 89 изображено приспособление к техно-химическим весам, с помощью которого можно определять сопротивление почвенных агрегатов раздавливанию. Над одной из чашек весов (правой) закреплена металлическая скоба с втулкой и винтом в центре (1). Винт заканчивается цилиндрическим жомом (2), который может подниматься и опускаться в центр плексигласового круга (3), заменяющего правую чашку весов и уравнивающего левую чашку.

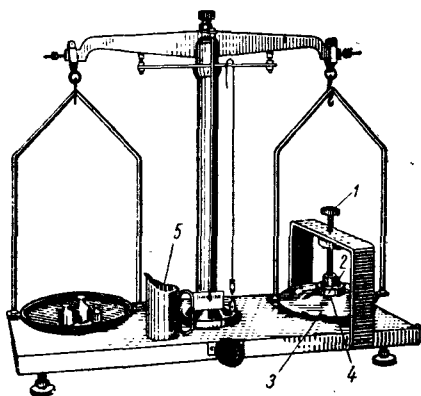


Рис. 89. Приспособление к техно-химическим весам для определения механической прочности агрегатов

Испытуемый комок почвы (4) помещается в центр этого круга. Левая чашка весов и круг с почвой после этого уравниваются разновесами. Жом (2) с помощью винта (1) подводится вплотную к агрегату. Арретир весов открывается. На левую чашку весов из сосудов с оттянутым горлом (5) постепенно высы-

пается мелкая дробь или сухой песок. Почва сжимается между диском, заменяющим правую чашку весов, и жомом. Начало и конец раздавливания агрегата будут отмечены отходом стрелки весов от нулевой точки на шкале. Взвешивая дробь или песок, потребовавшиеся для раздавливания агрегата, находим механическую прочность его в граммах. Определение нужно выполнить минимум с пятерным контролем. Агрегаты для сравнительных определений требуется брать всегда приблизительно одной формы и величины: комочки диаметром 5,7 или 10 мм.

Агрегатный состав пашни и механическая прочность агрегатов необходимы для оценки качества вспашки, но количественные их показатели сохраняются лишь до первого значительного дождя или искусственного полива почвы. После увлажнения пашня претерпит изменения, и они будут тем больше, чем меньше водопрочность агрегатов.

Вот почему наряду с «сухим» агрегатным анализом почвы возникла необходимость «мокрого» агрегатного анализа, т. е. необходимость определения водопрочности агрегатов.

Метод «мокрого» агрегатного анализа почвы в подвижной воде. Впервые методика «мокрого» агрегатного анализа почвы была предложена советскими почвоведом еще в тридцатых годах (А. Ф. Тюлин, Е. Г. Петров, Г. И. Павлов и Н. П. Карпинский). Позже она была уточнена М. Х. Пигулевским, Н. И. Саввиновым, П. В. Вершининым, И. М. Бакшеевым, а за рубежом — Де-Бу (в Бельгии), Иодером (Joder) и Таннером (Tapner) в США и др. Сущность метода заключается в том, что взятый для анализа образец почвы (50—100 г) просеивается под водою через гнездо сит с отверстиями в 5, 3, 2, 1, 0,5 и 0,25 мм (рис. 90). Два сита с крупными отверстиями (диаметр — 10 и 7 мм) в «мокром» анализе не применяют, так как комки крупнее этих размеров обычно в воде быстро распадаются. Точность «мокрого» агрегатного анализа почвы зависит от постоянства условий при анализе: диапазона погружения и поднятия сит в воде и от быстроты их движения. Поэтому в новых вариантах анализа Бакшеева и других процесс «купания» почвы в воде на ситах механизирован. В приборе Бакшеева проводится парное определение водопрочности агрегатов. Два гнезда сит с почвой помещаются в особые, герметически закрытые цилиндры, подвижно закрепленные на вертикальной стойке, как показано на рисунке 91. Цилиндры, заполненные водой, с гнездами сит внутри их приводятся в качательное движение от моторчика, смонтированного на той же вертикальной стойке. Диапазон, быстрота и время качания сит постоянны (процесс просеивания длится 12 мин).

По истечении этого времени мотор выключается. Вода из цилиндров вместе с микроструктурой фракций ($< 0,25$ мм) сливается через нижнее выводное отверстие, для чего нужно вынуть пробку в сливном хоботке. С цилиндров снимаются крышки, и из них извлекаются гнезда сит. Фракции агрегатов, оставшиеся на ситах, учитываются количественно. Микроагрегатная фракция ($< 0,25$ мм), ранее слитая, может быть учтена непосредственно или найдена по разности навески и суммы всех фракций $> 0,25$ мм.

Результаты анализа, рассчитанные на абсолютную сухую навеску почвы, изображаются графически, причем по оси абсцисс откладываются размеры фракций в мм, а по оси ординат процентное содержание фракций (см. рис. 85).

Определение водопрочности агрегатов в стоячей воде. Метод предложен П. И. Андриановым (1947). Сущность его состоит в учете времени распада под водой структурных отдельностей почвы (чаще комочков с поперечником около 5 мм). Процесс размачивания агрегатов проводится на сите с отверстиями в 2—3 мм, затопленном в стеклянный кристаллизатор. Сито для анализа перекрывается фильтровальной бумагой с наколотыми в ней отверстиями, поверх которой равномерно по площади размещаются 50 испытуемых комочков. До затапливания комочков водою они предварительно насыщаются ею на сите капиллярно, чтобы удалить из почвы воз-

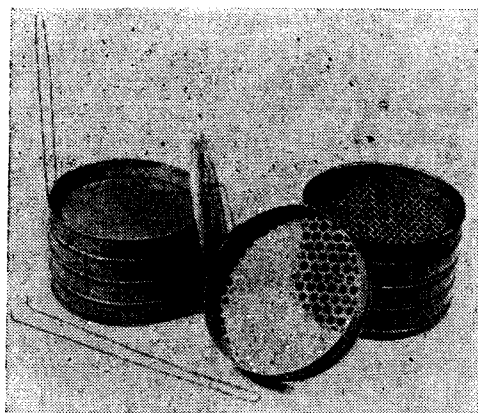


Рис. 90. Гнездо сит для «сухого» и «мокрого» просеивания почвы

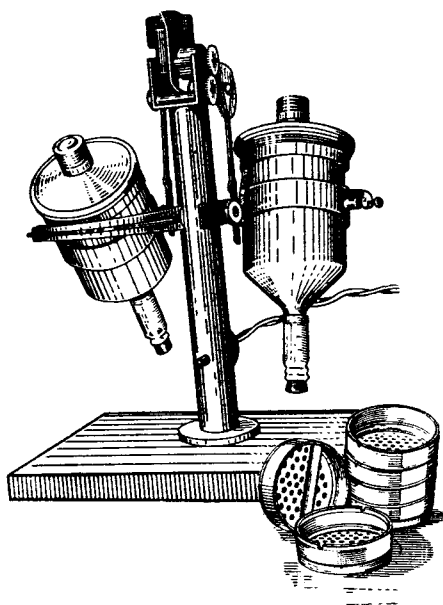


Рис. 91. Прибор Бакшеева для «мокрого» агрегатного анализа почвы

дух. Эта операция необходима; в противном случае при погружении комков в воду воздух будет заземляться ею и получит взрывную силу.

Анализ по методу Андрианова (размачивание почвы под водою) длится 10 мин. Комки, не распавшиеся под водою за 10 мин, считаются максимально водопрочными.

В описанный здесь метод Андрианова Н. А. Качинским внесены поправки в технику анализа и в расчеты результатов.

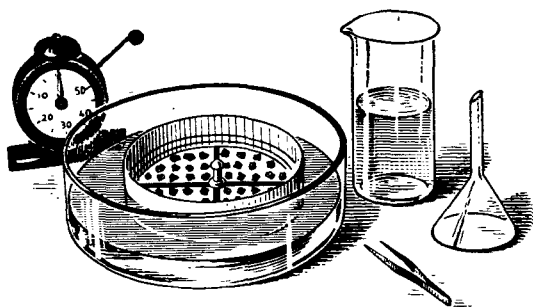


Рис. 92. Определение водопрочности агрегатов в стоячей воде

При выполнении анализа по Андрианову результаты искажались вследствие создания неровностей (бугристости) на фильтровальной бумаге с разложенными на ней агрегатами в процессе капиллярного подпитывания агрегатов и особенно при затоплении их водой. Для устранения этого дефекта в сито вводится для анализа вырезной латунный круг с четырьмя радиальными лучами из центра к периферии, который накладывается в сите поверх фильтровальной бумаги (рис. 92). Агрегаты почвы размещаются в секторах круга между радиальными лучами.

Учет разрушения агрегатов проводится не через 2,5 мин, как в инструкции Андрианова, а через каждую минуту в течение 10 мин. Принимается, что водопрочность агрегатов, не распавшихся под водой в течение 10 мин = 100%. Агрегаты, распавшиеся в интервал времени от 9 до 10 мин, имеют водопрочность:

$$\frac{90+100}{2} = 95;$$

от 8 до 9 мин соответственно

$$\frac{80+90}{2} = 85$$

и т. д. Агрегаты, распадающиеся в интервал от начала опыта до конца первой минуты, характеризуются водопрочностью:

$$\frac{0+10}{2} = 5.$$

Суммарный расчет водопрочности в % к максимально возможной величине выразится формулой

$$B_{\text{агр}} = \frac{(a_1 \cdot 5 + a_2 \cdot 15 + a_3 \cdot 25 + \dots + a_{10} \cdot 100) 2}{100}, \quad (68)$$

где a_1, a_2, a_3 и т. д. — количество агрегатов, распавшихся под водой в течение 1-й, 2-й, 3-й и т. д. минут. По этой формуле водопрочность агрегатов любой почвы укладывается в рамки от 5 до 100%, тогда как по формуле Андрианова этот интервал равен — от единицы до бесконечности, что, конечно, не соответствует фактическому различию в водопрочности агрегатов разных почв.

Капельный метод определения водопрочности агрегатов почвы проф. Д. Г. Виленского. В этом методе агрегаты подвергаются разрушению силой падающих капель воды: чем больше воды требуется для разрушения агрегата, тем выше его водопрочность. Точность анализа зависит от стандартизации живой силы капель и выровненности агрегатов по величине и форме. В приборе Д. Г. Виленского, сконструированном для этой цели, в анализе испытываются комочки диаметром око-

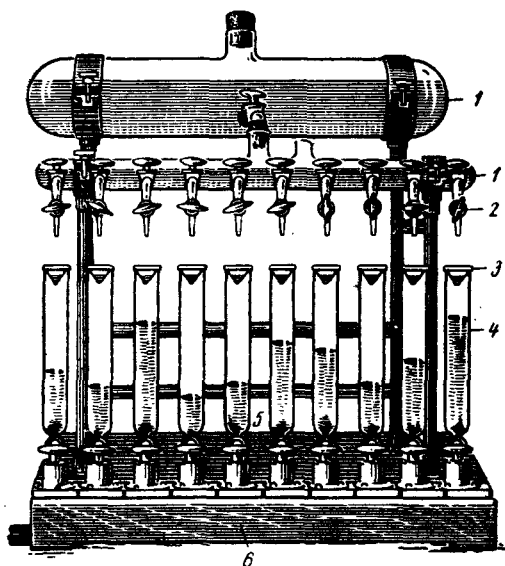


Рис. 93. Прибор Д. Г. Виленского для определения водопрочности почвенных агрегатов

ло 5 мм. Живая сила капель регулируется постоянным напором воды в резервуарах, питающих капельники (рис. 93, 1), одномерностью капельников 2 и постоянством пути (5 см) для капли от конца капельников до агрегата.

Испытуемые агрегаты помещаются на нержавеющие воронки из спиралей с просветом между отдельными мотками проволоки в 1 мм (3). Капли, ударившись об агрегат, стекают в мерные цилиндры (4). Анализ продолжается до тех пор, пока материал разрушенного агрегата полностью не пройдет сквозь вороночку в мерный цилиндр. По окончании анализа вода из мерных цилиндров с помощью кранов (5) сбрасывается в водоотвод (6).

Учитывая, что просвет между витками спирали у воронок равен 1 мм, следует считать, что по данному методу учитывается водо-

прочность агрегатов > 1 мм, так как макроагрегаты с диаметром 1—0,25 мм могут проваливаться в просветы поддерживающих их воронок. Уменьшить же просветы между витками воронок оказалось невозможным: в этом случае они заиливаются и разрушенный почвенный материал в цилиндры не проходит.

Определение водопрочности по капельному методу требует десятков повторностей, после чего выводятся средние величины.

Косвенные методы определения водопрочности почвенной структуры. В ранее описанных методах размеры агрегатов, их механическая прочность и водопрочность учитывались непосредственно. Но о качестве структуры, особенно пахотного слоя, можно судить и косвенно: по объемному весу, по скважности, по водопроницаемости почвы. Структурный пахотный слой суглинистых и глинистых почв под сельскохозяйственными культурами характеризуется объемным весом 1,0—1,2 г/см³, общей порозностью — 55—60%, выровненной по всей площади поля, устойчивой во времени водопроницаемостью > 100 мм вод. ст. в первый час полива. Используя эти характеристики, Фадеев и Вильямс предложили свой метод определения водопрочности почвенных агрегатов. Принцип метода — оценка водопрочности агрегатов по кривой фильтрации воды сквозь насыпной слой агрегатов определенной крупности и однородной укладки. Фильтрация воды во времени затухает вследствие набухания агрегатов, постепенного распада их и заиливания пор. Чем больше водопроницаемость агрегатов в десятисантиметровом слое при определенной плотности упаковки их и чем устойчивее она во времени, тем выше водопрочность почвенной структуры. Определение водопрочности производится с использованием прибора Фадеева—Вильямса, несколько измененного К. С. Хвyleй (рис. 94).

Как видно на рисунке, прибор представляет собой сочетание двух стеклянных воронок. Испытуемая почва помещается в нижнюю большую воронку. Вода подается через верхнюю воронку под постоянным давлением, проходит через почву снизу вверх и через сливную трубку собирается в мерную посуду. При начале опыта учет профильтровавшейся воды производится каждые 10 мин. По мере затухания водопроницаемости интервалы отсчетов увеличиваются до 30 мин, а потом до 1 часа. Результаты определения изображаются графически: по оси ординат откладывается количество профильтровавшейся воды в единицу времени или в % к максимальной фильтрации воды, отмеченной в первые 10 мин опыта; по оси абсцисс — часы наблюдения (см. рис. 83). Опыт следует продолжать до установления постоянной фильтрации, когда кривая фильтрации идет параллельно оси абсцисс.

Аналогичный с методом Фадеева—Вильямса способ определения водопрочности почвенной структуры предложил Н. Курон (ФРГ, 1958). Но в методе Курона сквозь почвенный образец фильтруется «глинистая вода». О водопрочности структуры судят по

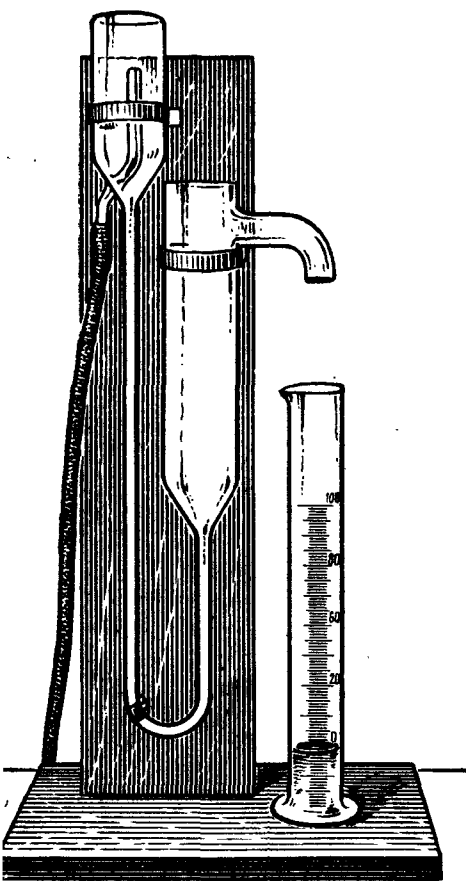


Рис. 94. Прибор Фадеева—Вильямса для определения водопрочности почвенной структуры

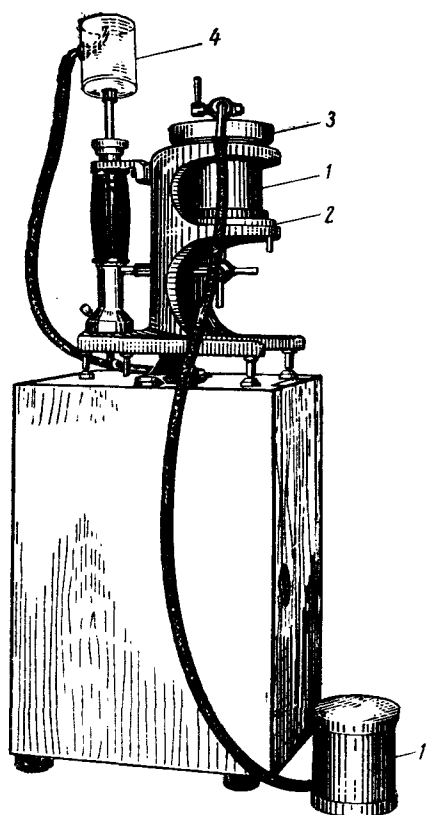


Рис. 95. Прибор для определения водопрочности почвенной структуры в образцах естественного сложения по принципу Фадеева — Вильямса

быстроте заилиения почвенных пор: чем быстрее заилиение, тем хуже почвенная структура. Характер заилиения пор контролируется микроскопически на шлифах.

Недостатком метода Фадеева—Вильямса является искусственный отбор агрегатов условленной крупности и искусственная их упаковка в воронке для фильтрации.

Н. И. Саввинов, используя принцип определения водопрочности почвенной структуры по Фадееву—Вильямсу, впервые (1934) сконструировал прибор, в котором стеклянная воронка для помещения испытуемых агрегатов заменена металлическим цилиндром. В цилиндр врезается ненарушенный образец почвы, через который, под постоянным давлением, снизу вверх фильтруется вода. Позже прибор Саввинова конструктивно совершенствовался.

На рисунке 95 дано фото прибора для определения водопрочности почвенной структуры по принципу Фадеева—Вильямса, сконструированного на кафедре физики и мелиорации почв МГУ (Н. А. Качинский и З. А. Корчагина).

В этом приборе, как и в приборе Саввинова, испытуемый образец почвы помещается в цилиндр из нержавеющей стали (1). Высота цилиндра 85 мм; диаметр — 80 мм; толщина стенок — 1—1,5 мм. При отборе почвенных образцов цилиндры закрываются хорошо пригнанными крышками. К каждому прибору дается 10—20 цилиндров. При анализе цилиндр с почвенным образцом с обеих сторон закрывается сеткой с отверстиями в 0,25 мм и с помощью резиновых колец герметически монтируется в металлических гнездах (2, 3). Вода из крана подается под постоянным давлением (чаще — 50 мм) через воронку (4). Циркуляция воды следует снизу вверх, для чего в металлических гнездах (2 и 3) имеются вводная и выводная трубки с кранами. Интервалы учета профильтровавшейся воды те же, что и в приборе Фадеева—Вильямса и тот же метод изображения полученных результатов.

В таблице 58 приводятся результаты сравнительной оценки различных методов «мокрого» агрегатного анализа почвы по данным доктора И. Г. Бребурда (кафедра физики и мелиорации почв МГУ, 1962). Определения выполнены с контролем по Саввинову, Бакшееву и Фадееву—Вильямсу — 3, по Андрианову — 50×4 ; по Виленскому — с 50-кратной повторностью. Во всех случаях анализировалась воздушно-сухая почва.

Как явствует из таблицы, все сравниваемые методы качественно весьма согласно характеризуют обе исследованные почвы. Наилучшей структурой в них при анализе воздушно-сухих образцов обладают перегнойно-аккумулятивные горизонты. По мере движения в глубь почвы, качество структуры прогрессивно ухудшается, но в разных методах с различной интенсивностью.

По результатам четырех первых методов лучшей структурой обладает серая лесная земля, а по методу Фадеева—Вильямса — дерново-подзолистая почва, что маловероятно.

Сравнение двух близких по технике анализа методов (Саввинова и Бакшеева) показало, что более нмзкий выход макроагрегатов ($> 0,25$ мм) во всех горизонтах почв по методу Саввинова. Это по-видимому, обусловлено более интенсивным встряхиванием гнезда сит вручную по сравнению с встряхиванием их приводом от мотора.

Наконец, поскольку можно судить по величинам вариационного коэффициента, воспроизводимость результатов анализа выше всего

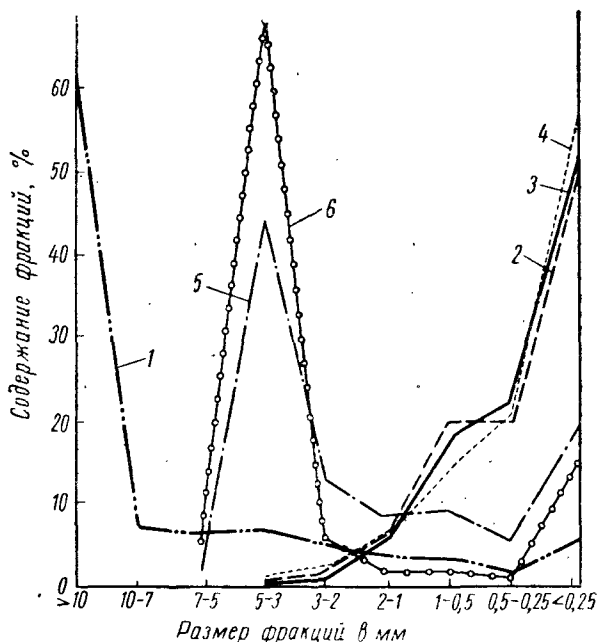


Рис. 96. Агрегатный состав в % веса сухой почвы. Чернозем южный тяжелосуглинистый иловато-пылеватый. Гор. А₁:

Сухое просеивание: 1 — почва воздушно-сухая. Мокрое просеивание: 2 — почва абсолютно сухая; 3 — почва воздушно-сухая; 4 — почва при влажности, соответствующей максимальной гигроскопической; 5 — почва, капиллярно насыщенная в течение 3 дней; 6 — почва, капиллярно насыщенная в течение 40 дней

в методе Андрианова, далее следуют методы Саввинова и Бакшеева и последнее место занимают методы Виленского и Фадеева — Вильямса.

Каким бы методом ни определялась водопрочность почвенной структуры, нужно учитывать, что это величина динамичная. В течение вегетационного периода она изменяется в широких пределах в зависимости от влажности почвы и длительности ее увлажнения (рис. 96), а также от степени развитости биологических процессов.

Таблица 58

Результаты «мокрого» агрегатного анализа почв, полученные различными методами

Почвы	Горизонт	Глубины взятия образца, см	Водопрочность почвенных микроагрегатов									
			по Саввинову (фракции > 0,25 мм)		по Бакшееву (фракции > 0,25 мм)		по Виленскому		по Андрианову		по Фадееву — Вильямсу	
			%	вариацион- ный коэф- фициент, %	%	вариацион- ный коэф- фициент, %	см ³	вариацион- ный коэф- фициент, %	%	вариацион- ный коэф- фициент, %	см ³ мин	вариацион- ный коэф- фициент, %
Дерново-подзоли- стая легкосуглинистая почва. Ст. Луговая Моск. обл.	A ₁	3—8	54,89	—	70,91	—	377,80	4,3	92,4	0,65	64,13	11,3
	A ₂	10—15	28,50	4,7	58,18	2,4	11,7	4,8	49,5	0,48	16,50	11,6
	B ₁	40—50	24,19	—	33,32	2,3	3,0	9,4	25,0	—	1,25	2,7
	B ₂	60—75	9,04	1,5	—	—	1,0	6,4	25,0	—	—	—
Серая лесная су- глинистая земля. Ста- рожилово Рязанской обл.	A ₁	0—12	69,27	2,26	89,24	0,5	647,9	4,3	94,7	0,90	46,69	1,7
	A ₁ /A ₂	22—34	43,43	1,38	61,02	2,0	15,98	13,1	30,6	1,56	0,95	12,18
	A ₂ /B ₁	40—50	14,43	2,7	41,31	4,8	3,0	8,1	30,4	0,64	0,86	17,50
	B ₂	90—100	11,98	3,4	—	—	1,6	5,8	25,0	—	—	—
	C	106—111	—	—	—	—	2,89	6,0	25,0	—	0,44	2,5

Исходя из этого, структурность почвы нужно учитывать несколько раз за вегетационный сезон и производить анализ с почвенными образцами при естественной их влажности.

В заключение настоящего раздела главы о структуре почвы еще раз напомним, что одной из важнейших характеристик структуры является порозность агрегата как по общей ее величине, так и по качеству. В добавление к сказанному об этом в главе четвертой отметим, что в агрегатах следует выделять: микропоры диаметром < 30 мк; мезопоры от 30 до 100 мк и макропоры > 100 мк. Микро- и мезопоры — это водозадерживающие скважины в почве, тогда как макропоры при свободном оттоке воды из почвы и при наличии в ней давления водного столба $> 0,03$ атм являются дренирующими порами.

Указанные размеры пор и их свойства нужно рассматривать как приблизительные. В почвах, различных по химическому и минералогическому составу, даже в порах, одинаковых по абсолютным размерам, диаметры активных и неактивных пор будут различны: чем выше адсорбционная способность почв, тем больший объем в них представлен неактивными порами. Кроме того, один и тот же размер пор может быть неактивным в глинах или торфах и он же будет соответствовать активным порам в песках и супесях.

Как было показано в главе IV, общая порозность агрегатов может быть точно учтена фиксажным методом, а качественный состав пор успешно выявляется при микроскопировании почвенных шлифов, особенно при постепенном (повторном) их подшлифовывании.

ЛИТЕРАТУРА

Антипов-Каратаев И. Н., Келлерман В. В., Хан Д. В. О почвенном агрегате и методах его исследования. Изд. АН СССР, 1948.

Андрянов П. И. Теплота смачивания и удельная поверхность почв. Изд. ВАСХНИЛ, М., 1937; он же. «Коллоидный журнал», т. VIII, № 4, 1946, стр. 193—198.

Брунауэр С. Адсорбция газов и паров. Т. I — «Физическая адсорбция». М., ИЛ., 1948.

Вадюнина А. Ф. и Корчагина З. А. Методы исследования физических свойств почв и грунтов. М., 1961.

Вершинин П. В. Твердая фаза почвы как основа ее физического режима. «Основы агрофизики», ч. II. М., 1959.

Вильямс В. Р. Почвоведение. Ч. II, гл. 10. М., 1936.

Качинский Н. А. Физика почвы в работах VII Международного конгресса почвоведов. Вест. МГУ, № 3, 1961.

Качинский Н. А. Проблема использования высокомолекулярных соединений для оструктурирования почв. Вест. МГУ, № 4, 1962, сер. 6, биология, почвоведение.

Качинский Н. А. Структура почвы (итоги и перспективы изучения вопроса). Изд. МГУ, 1963.

Кин Б. А. Физические свойства почвы. М.—Л., 1933.

Киселев А. В. Новые адсорбционные методы определения поверхности адсорбентов. Успехи химии, т. XIV, вып. 5, 1945.

Кононова М. М. Органическое вещество почвы. М., АН СССР, 1963.

Красильников Н. А. Микроорганизмы почвы и высшие растения. Ч. II. АН СССР, 1958.

Мельникова М. К. Водные свойства почвы и их физическая природа. Передвижение капельно-жидкой влаги в почве под воздействием различных физических сил. «Основы агрофизики», ч. IV, гл. 1 и 2. М., 1959.

Митчерлих Э. А. Почвоведение. М., ИЛ, 1957.

Путилова И. Н. Руководство к практическим занятиям по коллоидной химии. М., 1952.

Рассел Э. Почвенные условия и рост растений. М., ИЛ, 1955.

Ремезов Н. П. Почвенные коллоиды и поглощательная способность почв. М., 1957.

Тюлин А. Ф. Органо-минеральные коллоиды в почве, их генезис и значение для корневого питания высших растений. М., АН СССР, 1958.

Wollny E. Forschungen auf dem Gebiete der Agrikulturphysik. XX Band, S. 243, 1897—1898.

Baver L. D. Soil physics. New-York, 1948, 1956.

Marshall T. I. The Nature, Development, and Significance of Soil Structure. International soil conference New Zealand 1962. Division of Soils, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Adelaide, Australia.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие	3
Введение	4

Глава первая

Краткая история развития учения о физике почвы	7
--	---

Глава вторая

Механический и микроагрегатный составы почвы	22
--	----

Механические элементы почвы и микроагрегаты	23
Происхождение механических элементов почвы	24
Свойства механических элементов почвы	31
Классификация механических элементов почв по их крупности . . .	40
Подготовка почв к микроагрегатному и механическому анализам . . .	51
Микроагрегатный анализ	51
Механический анализ	53

Метод Н. А. Качинского. Подготовка почвы к анализу без химической ее обработки путем растирания почвы в состоянии сырой пасты (55). «Международный» метод А (55). Судан-метод (55). Метод Пури (56). Группа методов, в которых диспергирование почвы достигается путем обработки ее растворами различных натриевых солей (56)

Оценка методов	56
Принципы и техника механического анализа почвы	69
Определение механического состава почвы в поле (без приборов)	69
«Сухой» метод (1864) (69). «Мокрый» метод (69)	
Ситовой метод механического анализа почв	70
Ситовой анализ песков	71
Механический анализ почвы в струе воздуха	72
Механический анализ почвы в водной среде	74
Механический анализ почв в текучей воде	77

Метод Небея (1864) (77). Прибор и метод Шене для механического анализа почв в текучей воде (1867) (78). Прибор Колецкого для механического анализа почвы в текучей воде (1901, 1914) (80)

Механический анализ почвы в стоячей воде	83
Механический анализ почвы способом двойного отмучивания с малой навеской, по Сабанину (1903) (85). Уравнение Стокса (91). Механический анализ почвы с помощью пипетки (96). Механический анализ почвы с помощью гидростатических весов (99)	
Метод механического анализа почвы на основе измерения плотности дисперсии	103
Ареометрический метод (103). Метод механического анализа почвы по Вигнеру (1918) (107). Система механических анализов почвы и необходимость единого метода для производства массовых анализов (111). Основные замечания к варианту пипет-метода механического анализа почвы по Н. А. Качинскому (112)	
Техника микроагрегатного анализа почвы	117
Коэффициенты дисперсности и структурности почвы	119
Классификация почв по механическому составу	122
О принципах построения классификации	—
Классификация Н. М. Сибирцева (128). Классификация А. Н. Сабанина, В. В. Геммерлинга и И. П. Жалнинского (129). Классификация Г. М. Тумина и С. А. Захарова (129). Классификация В. В. Охотина (130). Классификация Н. А. Качинского (132). Зарубежные классификации почв по механическому составу (139)	
Оформление данных механического анализа почвы	140
Метод дифференциальной кривой (140). Метод кумуляционной (интегральной) кривой (141). Метод циклограммы (141). Метод треугольника Гиббса — Розебома (141). Профильный метод (143)	
О точности механического анализа почвы	145
Бонитировка почв по механическому составу	—
Литература	147

Глава третья

Удельные и объемные веса почвы

Удельный вес твердой фазы или твердого субстрата почвы	150
Удельный вес скелета почвы	155
Буровой метод определения удельного веса скелета почвы . . .	156
Другие методы определения удельного веса скелета почвы . . .	161
Фиксажный метод (161). Определение объемного веса почвы путем погружения ее в жидкость (162)	
Использование удельного веса скелета почвы	165
Абсолютный вес почвы	167
Гаммаскопический метод определения плотности почвы . . .	—

Глава четвертая

Порозистость почвы

Общая порозистость или скважность почвы	169
Дифференциальная порозистость почвы	177
Литература	190

Глава пятая

Удельная поверхность почвы и поверхностная почвенная энергия

Удельная поверхность почвы	192
Поверхностная почвенная энергия	—
Возникновение электрических зарядов на частицах почвы	193
Строение коллоидной мицеллы	194
Амфотерные коллоиды или амфолитонды	199
Методы определения удельной поверхности и поверхностной энергии почвы	202
Визуальный микроскопический метод определения поверхности механических элементов	203
Геометрический метод расчета удельной поверхности почвы	204
Расчет удельной поверхности и поверхностной энергии почвы по сорбции и адсорбции ею паров воды*	206
Метод Митчерлиха для определения общей, внешней и внутрен- ней (или мицеллярной) удельной поверхности почвы (206). Уравнение Лэнгмюра и расчет удельной поверхности почвы по изотерме адсорбции паров воды (по методу БЭТ) (210). Опре- деление удельной поверхности по теплоте смачивания почвы (223)	
Некоторые другие методы характеристики удельной поверхно- сти и поверхностной энергии почвы	233
По адсорбции почвой красящих веществ (233), по емкости по- глощения почвою катионов (233), по скорости фильтрации сквозь нее воды и газов (233)	

Глава шестая

Структура почвы

Понятие о структуре почвы. Качественная ее оценка	236
Генезис структуры почвы	239
Взаимное осаждение коллоидов	—
Коагуляция коллоидов под влиянием электролитов	242
Роль химических, физических и биологических процессов в по- вышении прочности и водопрочности структурных агрегатов	248
Влияние структуры на свойства почвы	253
О методах и условиях оструктурирования почв	265
Использование высокомолекулярных соединений для оструктури- вания почв	278
К теории взаимодействия полимеров с почвами (278). Краткие итоги использования полимеров для искусственного оструктурирования почв в СССР (289). Влияние полимеров при оструктурировании почв на урожай сельскохозяйственных культур (295). О длительности действия высокомолекулярных соединений на структуру почв и урожай растений (298)	

Методы определения и оценки агрегатности почв. Потенциальная способность почвы к оструктурированию	305
Коллоидно-химический и микроскопический метод (306). Метод «сухо- го» агрегатного анализа (307) Метод «мокрого» агрегатного анализа почвы в подвижной воде (309) Определение водопрочности агрегатов в стоячей воде (309). Капельный метод определения водопрочности агрегатов почвы проф. Д. Г. Виленского (312). Косвенные методы определения водопрочности почвенной структуры (313)	
Литература	318

Никодим Антонович Качинский

ФИЗИКА ПОЧВЫ

Часть I

Редактор *И. М. Шагирова*

Художник *В. П. Заикин*

Технический редактор *С. П. Передерий*

Корректоры *В. В. Кожуткина и Г. Н. Четкина*

Т-02489 Сдано в набор 2/XII 1964 г. Подп. к печати
3/V 1965 г. Формат 60×90^{1/16}. Объем 20,25 печ. л.
Уч.-изд. 20,32 л. Изд № Е 57/63. Тираж 4 500 экз. Зак. 637
Цена 86 коп.

Москва, И-51, Неглинная ул., д. 29/14,

Издательство «Высшая школа»

Сводный тематический план 1965 г.

учебников для вузов и техникумов. Позиция № 372

Московская типография № 16

Главполиграфпрома

Государственного комитета Совета Министров СССР
по печати.

Москва, Трехпрудный пер., 9