

А.А. Кононова, Д.Д. Хайдапова

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (г. Москва)

ОЦЕНКА СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ПОЧВ МЕТОДАМИ ФИЗИКО-МЕХАНИКИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-04-01297-а).

В данной статье рассмотрены особенности структуры почв на основе свойств механической прочности агрегатов и обоснована возможность характеристики механической прочности агрегата поверхностной энергией твердой фазы, определяемой по теплоте смачивания. В свою очередь, энергия твердой фазы почвы определяется по теплоте смачивания. Показано, что механическая прочность агрегатов возрастает от дерново-подзолистых почв к черноземам и зависит от комплекса свойств поверхности почвы, а теплота смачивания является удобной генерализованной характеристикой, позволяющей описать поверхностную энергию почвы, и может быть использована при изучении механической прочности, так как прочность сухих агрегатов функционально зависит от теплоты смачивания, также являясь величиной, зависящей от свойств поверхности.

Ключевые слова: структура почв; механическая прочность агрегатов; поверхностная энергия почвы.

Вопросами структурообразования занимались такие классики российского почвоведения, как В.В. Докучаев, П.А. Костычев, В.Р. Вильямс, К.К. Гедройц, И.В. Тюрин и многие другие ученые. Почвенная структура описывается в работах И.Н. Антипова-Каратаева, А.Д. Воронина, Я.А. Пачепского, М.Х. Пигулевского, Ю.Г. Гельцера и др. [1]. И все же до сих пор исследование природы и свойств почвенного агрегата – одна из труднейших проблем научного почвоведения. Работ, посвященных изучению сопротивления почвы сдвигу, относительно немного, при этом нет единой системы характеристики прочности агрегата, что очень усложняет сравнение данных, полученных разными авторами. Кроме того, подавляющая часть экспериментов проведена для растертой почвы, хотя в природе недеформированный агрегат может вести себя совсем по-другому.

Механическая прочность агрегата характеризует сопротивление почвенных отдельностей внешней нагрузке. Учитывая, что все протекающие в почве процессы в той или иной степени связаны с поверхностными явлениями на границе раздела фаз, механическая прочность зависит от числа контактов между элементарными почвенными частицами и силы каждого контакта в отдельности, т.е. прочность – функция поверхности почвы и её поверхностной энергии. Удобным показателем поверхностной энергии, объединяющим влияние удельной поверхности, содержание гумуса, ила, обменных катионов и многих других пара-

метров, т.е. описывающим свойства поверхности, является величина теплоты смачивания, которая характеризует молекулярно-ионный уровень структурной организации почв. В настоящее время теплота смачивания не так часто используется в физических экспериментах, однако этот показатель представляет собой наиболее генерализованную характеристику поверхности, так как она количественно характеризует энергию взаимодействия воды с твердой фазой почвы. Так, при взаимодействии воды с поверхностью почвы, при наличии третьей (газовой) фазы, наблюдается явление смачивания. Степень смачивания зависит от соотношения работ адгезии и когезии, которое проявляется в наклоне поверхности жидкости к поверхности твердого тела. При взаимодействии жидкой воды с твердой поверхностью раздела выделяется теплота, которую называют теплотой смачивания, она зависит от природы взаимодействующих фаз. Чем больше тепла выделяется при смачивании, тем интенсивнее энергетическое взаимодействие жидкости с поверхностью.

Материалы и методики исследования

В качестве объектов исследования были выбраны:

1. Дерново-подзолистая почва, отобранная на территории УО ПЭЦ «Чашниково», расположенной в 45 км на северо-запад от Москвы. Данная почва – вариант среднесуглинистой почвы с иллювиально-эллювиальной дифференциацией профиля, сформированная на двучленной породе – покровных суглинках, подстилаемых более тяжелой по гранулометрическому составу московской мореной. В результате распашки на месте гумусового горизонта формируется специфический пахотный горизонт, а ниже залегает уплотненная плужная подошва.

2. Серые лесные почвы были отобраны на территории Владимирского научно-исследовательского института сельского хозяйства (г. Суздаль). Почвы Владимирского Ополя характеризуются высокой комплексностью почвенного покрова, обусловленной палеокриогенным микрорельефом. Так, для целей исследования были выбраны две почвенные разности: серая лесная остаточно-карбонатная и серая лесная со вторым гумусовым горизонтом, имеющим пониженную плотность пахотного и подпахотного горизонта за счет высокого содержания гумуса.

3. Образцы типичного чернозема отбирались на территории Центрально-черноземного заповедника (Курская область). Целинные черноземы заповедника служат эталоном, в сравнении с которым определяется степень деградации окружающих пахотных земель, и представляют большой научный интерес в качестве экспериментальной модели. Для сравнения были взяты образцы чернозема целинного, пашни и «вечного» пара.

4. Из слитого чернозема был отобран образец горизонта А (0–20 см) вблизи г. Майкоп (Республика Адыгея). Глиноморфная тяжелосуглинистая почва во влажном состоянии сильно набухает, после чего при иссушении образует широкие и глубокие трещины.

Механическая прочность агрегатов почвы определялась методом конического пластометра Ребиндера [2]. Для предотвращения одновременного

испарения воды с поверхности почвенные агрегаты 3–5 мм капиллярно насыщались на керамической плитке до состояния максимальной капиллярной влагоемкости в закрытой емкости. Температура воды была на несколько градусов ниже температуры окружающей среды и агрегатов для выравнивания разницы температур вода/почва, а не расширения пузырьков воздуха за счет выделяющейся теплоты смачивания. Медленное насыщение на керамической плитке (в течение суток) было необходимо для постепенного вытеснения почвенного воздуха из капилляров без разрушения агрегатов. Дальнейшее высушивание агрегатов проводилось в закрытой емкости, и через определенные промежутки времени измерялась механическая прочность 10 агрегатов и их влажность. Прочность определялась нагрузкой, необходимой для разрушения агрегата, и выражалась в $\text{кг}/\text{см}^2$.

Определение теплоты смачивания проводилось в изотермическом комплектном калориметре смешения [3]. Была проведена апробация прибора и разработана методика, отвечающая требованиям достоверности результатов. Из растертой, просеянной через сито 1 мм и предварительно высушенной до абсолютно сухого состояния в сушильном шкафу почвы бралась навеска из расчета 20 г почвы на 150 мл воды. При смешении навески с водой фиксировалось изменение температуры суспензии. Измерение проводилось в трехкратной повторности. Способ расчета, применяемый при использовании калориметрического метода, позволяет характеризовать теплоту смачивания величиной Q (кал/г или Дж/г).

Основная гидрофизическая характеристика (ОГХ) была определена в области от 0 до 4 pF методом центрифугирования [4–5], верхняя часть кривой – методом десорбции паров воды над различными солями. На основе ОГХ были рассчитаны основные гидрофизические константы. Удельная поверхность была определена десорбцией паров воды над солями по методу БЭТ. Гранулометрический состав почв определялся пипет-методом с обработкой пирофосфатом Na [6]. Содержание органического вещества определялось на экспресс-анализаторе.

Результаты исследования и обсуждение

При рассмотрении величин прочности воздушно-сухих агрегатов в исследуемом ряду почв видна объяснимая поверхностными явлениями тенденция к увеличению прочности от дерново-подзолистых почв к черноземам (рис. 1). Коэффициент корреляции между прочностью агрегата и удельной поверхностью почвы 0,7.

По данным Т.А. Зубковой [7], прочность целого агрегата зависит и от количества контактов, и от прочности единичного контакта. Соответственно, с ростом удельной поверхности значительно возрастает и число контактов между частицами. Кроме роста удельной поверхности в этом же ряду почв увеличивается и содержание гумуса. Роль гумуса двояка: влияние гумусовых веществ на физические свойства почв, их взаимодействие с минеральной частью обусловлено, с одной стороны, составом и структурой минеральной части, особенностями ее поверхности, а с другой – структурой молекул гуму-

совых веществ, их размерами и формой. Поскольку ароматические кольца обладают гидрофобными свойствами, а боковые радикалы гидрофильны, в зависимости от их соотношения изменяются гидрофильные свойства органического вещества. Поэтому гумус может как упрочнять структуру, так и снижать ее прочность.

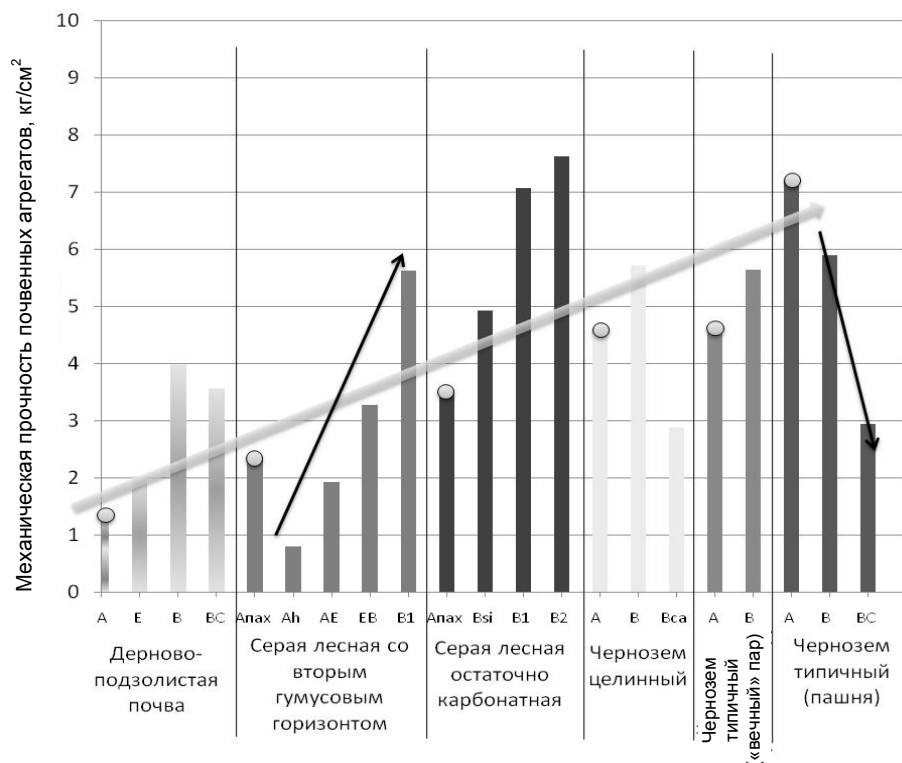


Рис. 1. Механическая прочность воздушно-сухих агрегатов в различных типах почв

Если у органических веществ когезионная прочность меньше адгезионной, что, вероятно, характерно для гумусовых кислот почвы, то при малом содержании органического вещества (1–3%), покрывающего тонким слоем минеральные частицы, усиливается прочность почвенных агрегатов, так как разрыв связей в этом случае должен происходить по прочным адгезионным контактам. При повышенном содержании гумуса (5–10%), когда прослойка скрепляющего вещества утолщается, эффект проклейки снижается, так как разрыв будет происходить по когезионным, в данном случае более слабым связям. Вероятно, этот механизм склеивания может иметь место в верхних горизонтах серой лесной почвы со вторым гумусовым горизонтом. Так, наиболее обогащенный гумусом горизонт A_h имеет самую низкую прочность (рис. 2). Значения P_m для воздушно-сухих агрегатов горизонта A_h не превышают 0,79 кг/см². Аналогичная картина наблюдается и для ряда чернозема.

Целинный чернозем, имеющий максимальное количество гумуса (8,5%), менее прочен чернозема пашни, который содержит 5,1% гумуса.

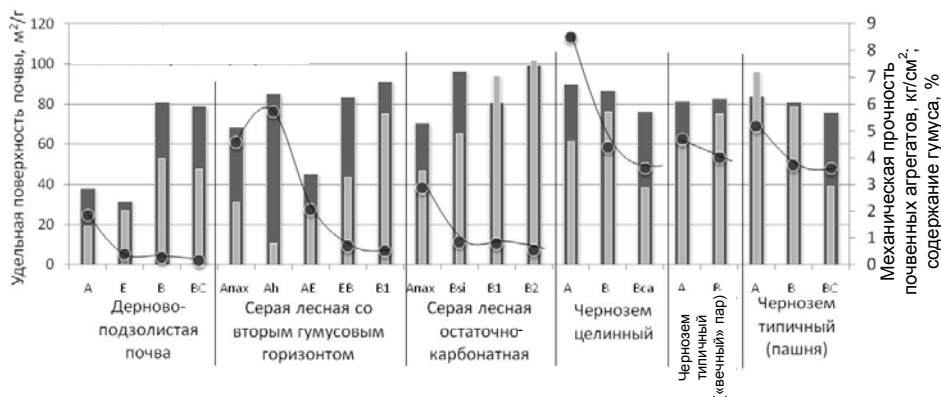


Рис. 2. Изменение механической прочности агрегатов, удельной поверхности и содержания гумуса в различных типах почв

Также прочность увеличивается вниз по профилю в иллювиальных и деградированных почвах и уменьшается в ненарушенном и слабонарушенном черноземах. В первом случае это вызвано вымыванием илистых частиц и гумуса в нижележащие горизонты, во втором – наличием большого количества гумуса и высокой удельной поверхностью в верхних горизонтах.

Таким образом, механическая прочность агрегатов – функция поверхности почвы, что объединяет влияние удельной поверхности, содержания гумуса, ила, обменных катионов и многих других показателей. Показателем поверхностной энергии, величина которого объединяет все перечисленные факторы, является теплота смачивания, которая характеризует молекулярно-ионный уровень структурной организации почв. Этот показатель представляет собой наиболее точную характеристику поверхности, так как она выражает энергию взаимодействия воды с почвой [8]. Для отражения сродства поверхности к воде, обусловленного силами межмолекулярного взаимодействия, А.Ф. Вадюнина качество поверхности описывала величиной гидрофильности [6]. В данном случае гидрофильность рассчитывалась как отношение теплоты смачивания к удельной поверхности. Очевидно, что чем больше тепла выделяется при смачивании, тем интенсивнее энергетическое взаимодействие жидкости с поверхностью. С этих позиций применение теплоты смачивания для характеристики механической прочности агрегатов обоснованно.

Проведенные исследования показали, что, исключая высушиванием определяющую роль количества и качества почвенной влаги, на величину теплоты смачивания оказывают влияние дисперсность почвы, ее удельная поверхность и содержание гумуса. Наибольший эффект выделения теплоты смачивания достигается за счет ила и содержащихся в нем коллоидов. Это хорошо видно на примере дерново-подзолистой почвы, где горизонты А и В содержат соответственно 2 и 23% ила и практически не различаются по содержанию мелкого и среднего песка. Теплота смачивания в этих горизонтах различается

в 2 раза (9 и 18 Дж/г). В то же время удельная теплота смачивания, характеризующая единицу поверхности, схожа для обоих горизонтов и равна $0,25 \text{ Дж/м}^2$, т.е. существенных различий в качестве поверхности нет. Та же закономерность прослеживается не только с увеличением содержания ила, но и с ростом общей удельной поверхности. Значения теплоты смачивания в исследуемом ряду почв увеличиваются от дерново-подзолистой почвы к черноземам параллельно с увеличением удельной поверхности. Высокий коэффициент корреляции ($r = 0,9$) свидетельствует о тесной зависимости теплоты смачивания и удельной поверхности. Наибольшее значение характерно для слитой почвы с максимальной удельной поверхностью до 36 Дж/г .

Удельная теплота смачивания, характеризующая качество поверхности, изменяется в зависимости от содержания гумуса и оценивается коэффициентом корреляции $0,6$. В горизонтах, обладающих повышенным содержанием органического углерода, удельная теплота смачивания закономерно возрастает от $0,25 \text{ Дж/м}^2$ в дерново-подзолистой почве до $0,35 \text{ Дж/м}^2$ в черноземах (таблица).

Гранулометрический состав исследованных почв

Почва	Горизонт	Глубина, см	>0,25, мм	0,25–0,05, мм	0,05–0,01, мм	0,01–0,005, мм	0,005–0,001, мм	<0,001, мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Дерново-подзолистая почва	А	0–20(28)	3,23	21,69	47,26	14,99	10,84	1,99
	Е	30–40	12,27	32,14	37,48	5,02	6,58	6,51
	В	40–115	2,78	18,32	39,31	6,06	11,58	21,95
	ВС	115–150	4,66	33,24	19,29	5,90	13,37	23,55
Серая лесная почва со вторым гумусовым горизонтом	Апах	0–22	0,35	8,75	47,82	6,23	16,33	20,52
	Аh	22–35	0,08	6,22	54,78	8,00	18,23	12,69
	АЕ	35–45	0,13	11,34	50,62	8,71	11,93	17,27
	ЕВ	45–80	нет	6,16	47,00	6,88	12,64	27,32
	В1	80–100	нет	5,25	41,75	1,05	19,31	32,64
Серая лесная остаточно карбонатная почва	Апах	0–25	0,06	10,45	50,00	9,30	16,94	13,25
	В1	40–68	0,02	8,21	43,25	8,80	12,84	26,88
	В2	68–110	0,01	6,99	45,87	7,69	15,23	24,21
Чернозем типичный (пашня)	А	10...15	нет	4,10	47,20	11,80	13,90	22,70
	В	60...65	нет	7,76	50,25	9,05	11,64	21,30
	ВС	140 дно	нет	3,20	41,30	13,90	15,50	25,90
Чернозем типичный (пар)	А	10...15	нет	6,95	50,10	5,60	18,74	18,61
	В	50...55	нет	7,43	51,44	6,56	16,66	17,91

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Чернозем типичный (целина)	A	10...15	0,02	6,36	52,16	11,06	13,21	16,76
	B	50...55	нет	6,15	50,90	11,42	11,42	20,51
	B _{ca}	140...145	нет	6,71	43,76	15,52	9,90	24,11

Под влиянием сельскохозяйственной нагрузки в почве происходят необратимые изменения поверхности [8–9]. Это можно проследить в ряду «чернозем целинный – пашня – “вечный” пар». По сравнению с целинным черноземом пашни и пара – деградированные почвы. В ряду почв «чернозем целинный – пашня – “вечный” пар» закономерно уменьшается содержание гумуса (8,5–7,7–5,1%) вследствие ускорения процессов минерализации. В связи с отсутствием восполнения органического вещества наиболее выражен этот процесс в варианте «“вечный” пар». Закономерно уменьшение удельной поверхности для этого ряда, а значит и активности поверхности (снижение теплоты смачивания и гидрофильности).

Экспериментально было подтверждено, что величина теплоты смачивания не изменяется при определении ее в растертом состоянии и в агрегатах. Найдена достоверная линейная зависимость вида $Pm = 0,23Q$, коэффициент корреляции 0,7. Из этого следует, что теплота смачивания является обоснованной и удобной величиной для характеристики как поверхностной энергии почвы, так и механической прочности как функции этого энергетического состояния. Дальнейшее исследование соотношения этих величин является перспективным направлением физико-механики почв.

В заключение необходимо отметить, что механическая прочность агрегатов возрастает от дерново-подзолистых почв к черноземам и зависит от комплекса свойств поверхности почвы. С увеличением дисперсности прочность агрегатов увеличивается и снижается при содержании органического углерода выше оптимального значения для прочностных характеристик агрегата. Теплота смачивания является удобной генерализованной характеристикой, позволяющей описать поверхностную энергию почвы и может быть использована при изучении механической прочности, так как прочность сухих агрегатов функционально зависит от теплоты смачивания, также являясь величиной, зависимой от свойств поверхности.

Литература

1. Теории и методы физики почв / Под ред. Е.В. Шеина, Л.О. Карпачевского. М.: Гриф и К, 2007. 614 с.
2. Ребиндер П.А., Семенов Н.А. О методе погружения конуса для характеристики структурно-механических свойств пластично-вязких тел // Доклад АН СССР. 1949. Т. 64, № 6. С. 835–838.
3. Димо В.Н., Уткаева В.Ф. Теплота смачивания как одно из энергетических свойств почвы // Почвоведение. 1984. № 2. С. 37–46.
4. Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Мизури Маауиа Бенааги. Определение ОГХ почв методом центрифугирования // Почвоведение. 1998. № 11. С. 1362–1370.

5. Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Хайдапова Д.Д., Шевченко Е.М. Экологическая оценка биофизического состояния почв (методическое пособие). М.: Изд-во МГУ, 1999. 48 с.
6. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
7. Зубкова Т.А. О механической прочности почвенных агрегатов // Вестник Московского университета. Сер. 17. Почвоведение. 1992. № 3. С. 55–61.
8. Уткаева В.Ф. Изменение теплоты смачивания почв при антропогенных воздействиях // Почвоведение. 1998. № 1. С. 16–20.
9. Воронин А.Д. Основы физики почв. М.: Изд-во МГУ, 1986. 243 с.

Поступила в редакцию 14.01.2011 г.

Anna A. Kononova, Dolgor D. Khaidapova

Moscow State University named after Lomonosov M.V., Moscow, Russia

ESTIMATION OF THE STRUCTURAL CONDITION BY PHYSICOMECHANICS METHODS

The works, devoted studying of resistance of soil to loadings has some, thus there is no uniform system of the characteristics of strength, that very much complicates comparison of the data received by different authors. Besides the overwhelming part of experiments is spent on prepared samples though not deformed unit can have absolutely others characteristics of strength.

In given article properties of structure of soils are considered, being based on property of mechanical strength of units and the opportunity of the characteristics of mechanical strength of the unit is proved by surface energy of the solid phase defined on heat of wetting. As objects of research 7 samples of soils with various characteristics of strength have been chosen. Mechanical strength was defined by a method conic Rebinders plastometer.

By consideration of sizes of strength of air-dry units in an investigated line of soils the tendency to increase in strength from sod-podzolic soils to chernozems is visible explainable the surface phenomena. Also strength increases downwards on a profile in illuvial and degraded soils, and decreases in not disturbed and low-disturbed chernozem. In the first case it is caused by washing away of silt particles and a humus in underlaying horizons, in the second presence of a plenty of a humus and a high specific surface in the top horizons. Thus, mechanical strength of units – function of a surface of soil that unites influence of a specific surface, the content of a humus, silt, exchange cations and many other things of parameters. A parameter of surface energy which size unites all the listed factors, heat of wetting which characterizes a molecular-ionic level of the structural organization of soils is. Values of heat of wetting in an researched line of soils increase from sod-podzolic soil to chernozems in parallel with increase in a specific surface. The specific heat of wetting describing quality of a surface, changes depending on the content of a humus.

Under influence of agricultural loading in soil there are irreversible changes of a surface. Reduction of a specific surface in a line of soils chernozem virgin- ploughed field – «timeless» fallow, so also activity of a surface reduction in heat of wetting and hydrophilia is natural.

From this follows, that heat of wetting is the proved and convenient size for the characteristics both surface energy of soil, and mechanical strength as functions of this power condition. The further research of a ratio of these sizes is a perspective direction physicomchanics of soils.

Key words: soil, rheology of soil; agrophysics; heat of wetting.

Received January 14, 2011