

**Энергия водоустойчивой структуры почвенных агрегатов:
концепция, теория и методы исследования**

**The energy of the waterproof structure of soil aggregates:
concept, theory and research of methods**

Б.К. Сон¹, К.Ю. Хан², А.И. Поздняков³

B.K. Son¹, K.Yu. Khan², A.I. Pozdnyakov³

¹ФГБУН Институт фундаментальных проблем биологии РАН, Пущино

e-mail: vson06@rambler.ru

²Окский экологический фонд, Пущино, e-mail: khan@itaec.ru

³Факультет почвоведения МГУ, Москва e-mail: antpozd@bk.ru

Аннотация. Рассмотрены теоретические и экспериментальные результаты количественной оценки энергии структуры водоустойчивых агрегатов, закономерности строения водоустойчивого ядра – основной структурной единицы водоустойчивых агрегатов, определяющей закономерности их функционирования в почвах.

Ключевые слова: агрегаты, энергия, сцепление, гумус, структура, водоустойчивость

Одной из фундаментальных проблем физики почв является создание теории образования почвенных агрегатов – основной структурной и функциональной единицы, определяющей формирование деструктивной ветви цикла органического углерода, обуславливающего образование в почвах гумуса и устойчивое функционирование наземных экосистем в биосфере.

Структура почвы определяется составом, соотношением и взаимодействием её твердых, жидких и газообразных компонентов. Элементарные почвенные частиц (ЭПЧ) – это унаследованные от материнской породы и измененные в процессе почвообразования минеральные (кристаллические и аморфные), органические и органоминеральные частицы различных размеров. ЭПЧ – это структурные элементы, которые взаимодействуя между собой, формируют агрегаты, характерные для каждого типа почвообразования. Структурные элементы, формирующие агрегаты, взаимодействуют только в местах их наибольшего сближения – контактах. Устойчивые силы притяжения в контактах – энергия связи частиц - определяют практически все структурно-функциональные свойства почв.

Процессы образования различных видов дисперсных структур, включая различные типы структур глинистых пород и почв, обусловлены сцеплением частиц в контактах – энергетическими связями, образующимися между частицами. В.Б. Дерягиным установлена

фундаментальная связь между силой сцепления и удельной энергией сцепления двух частиц. Важной характеристикой связанных дисперсных структур является суммарная энергия сцепления частиц, отнесенная к единице массы (или объёма) глинистых пород или почвы. Для расчета суммарной энергии структурных связей, заключенной в единице объёма горной породы, предложена следующая формула [1]:

$$U = \frac{1}{2} u_e Z m, \quad (1)$$

где u_k – энергия единичного контакта; Z – координационное число, зависящее от пористости горной породы (или агрегата) и формы структурных элементов; m – количество структурных элементов в единице объёма горной породы.

Уравнение (1) не пригодно для оценки энергии водоустойчивой структуры агрегатов, так как в рассматриваемом уравнении не учтены закономерности образования структурных элементов в почвах, определяемой особенностями взаимодействия органического вещества с минеральными компонентами почв. На основании теоретических представлений о формировании сил сцепления и энергии сцепления между взаимодействующими высокодисперсными глинистыми частицами в контактах [2] нами получено уравнение физико-химической механики для оценки энергии структуры водоустойчивого ядра. Эта энергия численно равной работе, которую необходимо совершить для разрушения всех водоустойчивых энергетических связей в ядре. Оценку суммарной энергии, заключенной в водоустойчивых структурных связях, формирующихся в единичном водоустойчивом ядре, можно определить по зависимости:

$$U = \frac{1}{2} u_e Z * \frac{3k}{4\pi^3 \rho_{str}} * \frac{D}{D_0} * P_{agr}, \quad (2)$$

где r – радиус илистых частиц, мм; ρ_{str} – плотность твердой фазы илистых частиц почв, г/см³; k – массовая доля илистых частиц в водоустойчивом ядре; D – диаметр водоустойчивых ядер, формирующихся в горизонтах почв с определенным содержанием в них гумуса, мм; D_0 – диаметр водоустойчивого ядра, формирующийся в горизонтах почвы с максимальным содержанием в них гумуса, мм; P_{agr} – масса водоустойчивых ядер, содержащихся в 100 г воздушно сухой почвы, г.

Уравнение (2) позволяет количественно оценить суммарную энергию структуры водоустойчивых ядер, содержащихся в 100 г воздушно сухой агрегированной почвы. В табл.1 представлены данные, характеризующие закономерное изменение в профиле почв диаметра водоустойчивого ядра и количества контактов, содержащихся в 100 г воздушно-сухой почвы (табл.1). Эти данные необходимы для расчета энергии структуры водоустойчивого ядра. Энергия сцепления частиц (u_k) в контактах, которая входит в

уравнение (1) и используется для оценки энергии водоустойчивой структуры ядра, определяется на основании экспериментальных данных, характеризующих макроскопическую прочность водоустойчивых агрегатов [2].

Таблица 1. Изменение количества водоустойчивых контактов в чернозёмах типичных (абсолютно заповедная степь, ЦЧЗ, Курская обл.)

Горизонт, глубина, см	$C_{гум}, \%$	D, мм	D/D ₀	К-во контактов в 1 грамме водоустойчивых агрегатов	Масса водоустойчивых ядер в 100 г воздушно сухой почвы	К-во контактов в 100 г воздушно сухой почвы
Ад (2-10)	8,76	2,5	1	8,85E+12	34,6	3,0621E+14
А1 (10-20)	7,81	1,5	0,6	5,31E+12	51,0	2,7081E+14
А1 (20-40)	6,21	1,5	0,6	5,31E+12	43,9	2,3311E+14
А1 (40-60)	4,32	1,5	0,6	5,31E+12	27,1	1,439E+14
А1 (60-80)	3,43	1,5	0,6	5,31E+12	16,5	8,7615E+13
АВ (90-100)	2,31	0,75	0,3	2,66E+12	27,5	7,3013E+13
Вк (110-120)	0,95	0,75	0,3	2,66E+12	21,6	5,7348E+13

Исследованиями А.А. Роде, Б.Н. Мичурина, С.В. Нерпина, А.Ф. Чудновского теоретически и экспериментально установлено многоступенчатое сложение частиц в агрегатах почв. Наши исследования позволили выявить фундаментальную роль тонкодисперсных глинистых частиц в формировании многоступенчатого сложения в водоустойчивых ядрах – основной структурной единицы водоустойчивых агрегатов почв (рис.1).

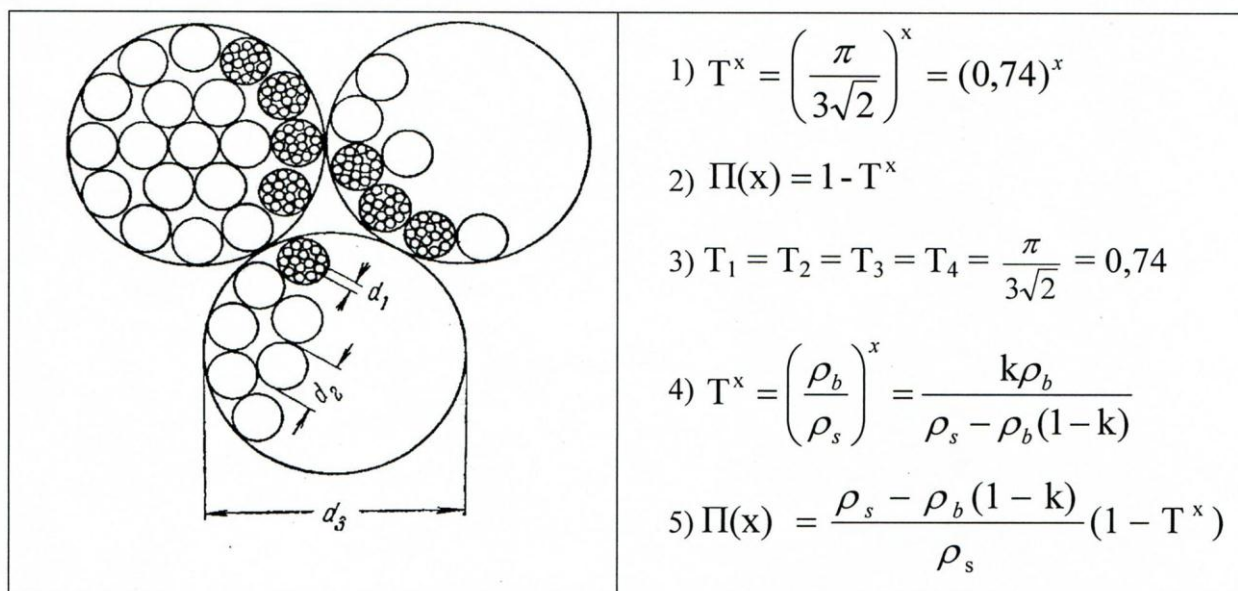


Рис.1. Параметры, характеризующие многоступенчатое сложение водоустойчивого ядра в агрегатах почв:

условные обозначения

$d_1 = 1 \text{ мкм}$	$x = 1$	$\Pi_1 = 0,26$	$p_1 = 10^{-6} \text{ Н}$	$P_1 = 373,0 \text{ кПа}$
$d_2 = 3 \text{ мкм}$	$x = 2$	$\Pi_2 = 0,45$	$p_2 = 10^{-6} \text{ Н}$	$P_2 = 72,0 \text{ кПа}$

$d_3 = 9 \text{ мкм}$	$x = 3$	$\Pi_3 = 0,59$	$p_3 = 10^{-6} \text{ Н}$	$P_3 = 10,0 \text{ кПа}$
$d_4 = 27 \text{ мкм}$	$x = 4$	$\Pi_4 = 0,70$	$p_4 = 10^{-6} \text{ Н}$	$P_4 = 1,4 \text{ кПа}$
k - массовая доля илистой фракции в водоустойчивом ядре				
d_{1-4} – диаметр структурной единицы характерный для определенной ступени сложения илистых частиц в водоустойчивом ядре при их гексагональной упаковке				
x_{1-4} – порядок ступенчатости сложения илистых частиц в водоустойчивом ядре при их гексагональной упаковке				
Π_{1-4} – порозность (в долях от единицы), характерная для определенной ступени сложения илистых частиц в водоустойчивом ядре при их гексагональной упаковке				
p_{1-4} - прочность индивидуальных контактов характерная для определенной ступени сложения илистых частиц в водоустойчивом ядре при их гексагональной упаковке				
P_{1-4} – макроскопическая прочность характерная для определенной ступени сложения илистых частиц при их гексагональной упаковке				
ρ_s – плотность твердой фазы почвы, г/см^3				
ρ_b – плотность сложения агрегатов, г/см^3				
$T^x = \left(\frac{\rho_b}{\rho_s} \right)^x$ - объём илистой частицы в единице объёма агрегата почв соответствующий x -ой ступени сложения их при гексагональной упаковке				

Если ширина зазора в контактах между взаимодействующими микрогетерогенными частицами гуматов, адсорбированных на поверхности глинистых минералов, заметно превосходит молекулярные размеры конденсированной фазы, то *недисперсионные* силы оказываются практически неощутимыми. Поэтому дисперсионным силам, которые формируются при взаимодействии высокодисперсных глинистых частиц, поверхность которых модифицирована микрогетерогенными твердыми частицами, гуматам кальция и магния, принадлежит ведущая роль в образовании водоустойчивых структурных связей.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (№13-04-01097).

Литература

- 1 Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А. Микроструктура глинистых пород. М.: Недра, 1989. 211 с.
- 2 Хан К.Ю. Энергетическая характеристика водоустойчивости почвенных агрегатов. Автореферат докторской диссертации. Пушкино, 2013. 50 с.

Summary

There were considered theoretical and experimental results to quantify the energy structure waterproof units, structural patterns waterproof core - the basic structural unit waterproof units, determining the patterns of their functioning in soils.