

# АГРОЭКОЛОГИЯ



УДК 631.4:624.121.54

**Е.В. Шейн, Т.Н. Початкова, А.И. Холодков**  
**Ye.V. Shein, T.N. Pochatkova, A.I. Kholodkov**

## РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ

### THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF SOD-PODZOLIC SOIL

**Ключевые слова:** почва, реология напряжён- ние сдвига, скорость деформации, вязкость, прочность, реопексия, почвенная суспензия, гранулометрический состав, почвенный агрегат.

Реологические свойства – напряжение сдвига, прочность и вязкость – изучали в лабораторных условиях на капиллярно-увлажнённых образцах дерново-подзолистой почвы (Московская обл.) на приборе Реотест. Напряжение сдвига, соответствующее полному разрушению структуры в пахотном горизонте, составляет 20 Па, в элювиальном горизонте снижается, а затем в иллювиальных горизонтах вновь достигает около 20 Па. При сдвиговых деформациях почвенных горизонтов дерново-подзолистой почвы преобладающим явлением стала реопексия, при различном участии тиксотропных процессов.

**Keywords:** soil, rheology, shear stress, strain rate, viscosity, strength, rheopexy, soil suspension, particle size distribution, soil aggregates.

The rheological properties as shear stress, strength and viscosity were studied in the laboratory using the samples of capillary moist sod-podzolic soil (Moscow Region) with the Reotest device. The shear stress corresponding to the complete destruction of the structure in the ploughed horizon makes 20 Pa, it is reduced in the eluvial horizon, and then in the illuvial horizons it reaches the values of about 20 Pa again. Rheopexy is a predominant phenomenon in shear deformation of sod-podzolic soil horizons; thixotropy processes of various degrees are also involved.

**Шейн Евгений Викторович**, д.б.н., проф., каф. физики и мелиорации почв, фак-т почвоведения, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. Тел.: (495) 939-36-84. E-mail: evgeny.shein@gmail.com.

**Початкова Татьяна Николаевна**, к.б.н., ст. преп., каф. физики и мелиорации почв, фак-т почвоведения, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. Тел.: (495) 939-36-84. E-mail: pochatkovt@mail.ru.

**Холодков Артем Игоревич**, аспирант, каф. физики и мелиорации почв, фак-т почвоведения, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. E-mail: artem-soil@yandex.ru.

**Shein Yevgeniy Viktorovich**, Dr. Bio. Sci., Prof., Head, Soil Physics and Reclamation Dept., Soil Science Faculty, Lomonosov Moscow State University. Ph.: (495) 939-36-84. E-mail: evgeny.shein@gmail.com.

**Pochatkova Tatyana Nikolayevna**, Cand. Bio. Sci., Asst. Prof., Soil Physics and Reclamation Dept., Soil Science Faculty, Lomonosov Moscow State University. Ph.: (495) 939-36-84. E-mail: pochatkovt@mail.ru.

**Kholodkov Artem Igorevich**, post-graduate student, Soil Physics and Reclamation Dept., Soil Science Faculty, Lomonosov Moscow State University. E-mail: artem-soil@yandex.ru.

**Введение**

Реологические исследования позволяют вскрыть внутреннюю природу прочностных свойств и дают интегральную оценку прочности связей, участвующих в образовании почвенной структуры. В современных условиях интенсивной антропогенной нагрузки все почвы в той или иной степени подвержены физической и технологической деградации, которая проявляется на различных уровнях структурной организации. Своевременная диагностика деградационных изменений нуждается в разработке методов и контроле за физическим и технологическим состоянием почвы для своевременных рекомендаций по предотвращению неблагоприятных воздействий [1, 2, 5-7].

Методы реологии широко применимы в почвоведении. Структурно-механические свойства почв определяют условия развития корневой системы растений, устойчивость почв к обработке сельскохозяйственными орудиями. Реологические исследования позволяют получить деформационные характеристики почв в широком диапазоне как влажностей, так и нагрузок [4-7].

**Цель** – с помощью реологических методов установить особенности реологического поведения генетических горизонтов дерново-подзолистой почвы при сдвиговых нагрузках.

**Задачи:** исследовать физические и некоторые химические свойства основных генетических горизонтов дерново-подзолистой старопашотной почвы; изучить особенности реологического поведения (сдвиговые деформации, прочность и вязкость) основных генетических горизонтов дерново-подзолистой почвы.

**Объекты и методы**

Исследования проводились на опытном поле Зеленоградского стационара почвенного института им. В.В. Докучаева, Пушкинский район Московской области. Объектом исследования послужила дерново-подзолистая старопашотная почва. На данной территории на старопашотном участке заложена траншея протяженностью 22 м и глубиной 2,2 м. Рассматриваются наиболее представительные горизонты почвенных профилей дерново-подзолистой старопашотной почвы: пахотный горизонт Апах, элювиальные А-ЕL и ЕL-В и элювиальный горизонт В, четко дифференцируемые в траншее. Гранулометрический состав определен методом лазерной дифрактометрии на приборе Analysette 22 comfort.

Агрегатный состав почв определен по методу Н.И. Савинова, содержание общего углерода – на приборе экспресс-анализатор углерода АН-7529, методом сухого сжигания. Определение изотерм десорбции паров воды проводили над насыщенными растворами различных солей, общую эффективную удельную поверхность рассчитывали методом БЭТ [3, 4]. Реологические свойства дерново-подзолистой почвы определены на ротационном вискозиметре РЕОТЕСТ-2 с цилиндрическим измерительным устройством.

**Результаты и обсуждение**

Исследуемая почва имеет подзолистый тип почвообразования и по классификации почв по гранулометрическому составу Н.А. Качинского относится к суглинкам (содержание физической глины от 25 до 50%).

Поверхностные горизонты почвы относятся к суглинку среднему пылеватому, а иллювиальные – к тяжелому (табл. 1). Почвенная структура оценивается в первую очередь на основании распределения агрегатов по их размерам. Исследованная дерново-подзолистая почва находится в залежи последние 5 лет. Она имеет хорошую водопроницаемость и высокое содержание агрономически ценных агрегатов (до 60-70% для пахотных горизонтов) (табл. 2). Значения коэффициента структурности (>1,5) также указывают на отличное агрегатное состояние исследуемых почв. Однако водопрочность агрегатов низкая и составляет в пахотном горизонте 5-10% [3, 4]. Следует отметить, что в элювиальных горизонтах содержание фракции <0,25 значительно выше, что говорит о более низкой их структурности. Содержание общего углерода уменьшается по профилю от 1,22% в горизонте А до 0,3% в горизонте В (табл. 2).

Таблица 1

**Гранулометрический состав дерново-подзолистой почвы**

Горизонт	Размер фракций, мкм; % фракции массовый					
	<1	1-5	5-10	10-50	50-250	>10
Апах.	3,8	20,8	12,6	60,0	2,8	37,2
А-ЕL	2,6	17,9	14,8	61,4	3,3	35,4
ЕL-В	2,8	20,4	17,7	59,1	0,1	40,8
В	12,3	17,9	6,2	59,5	4,1	36,4

Реологические свойства почв, являясь функциями структуры, связаны с поверхностными явлениями её высокодисперсной части. При взаимодействии почвенных ча-

стиц важнейшая роль принадлежит дисперсионным силам, которые действуют между молекулами любой природы и обуславливают притяжение макроскопических тел на достаточно больших расстояниях. В такой дисперсной системе, как почва, где содержание твердой фазы настолько высоко, что ее можно считать дисперсионной средой, термодинамически устойчивые пространственные структуры могут возникать самопроизвольно при слипании частиц твердой фазы между собой. Эта энергия слипания (образование коагуляционных структур) зависит в первую очередь от удельной поверхности. Средние значения удельной поверхности для пахотного горизонта составляют 40-45 м<sup>2</sup>/г. Они уменьшаются до 20 м<sup>2</sup>/г в элювиальном горизонте и возрастают до 100 м<sup>2</sup>/г в горизонте В, что связано с увеличением содержания илистых частиц и возможным изменением минералогического состава и содержания углерода иллювиальных горизонтов (табл. 2).

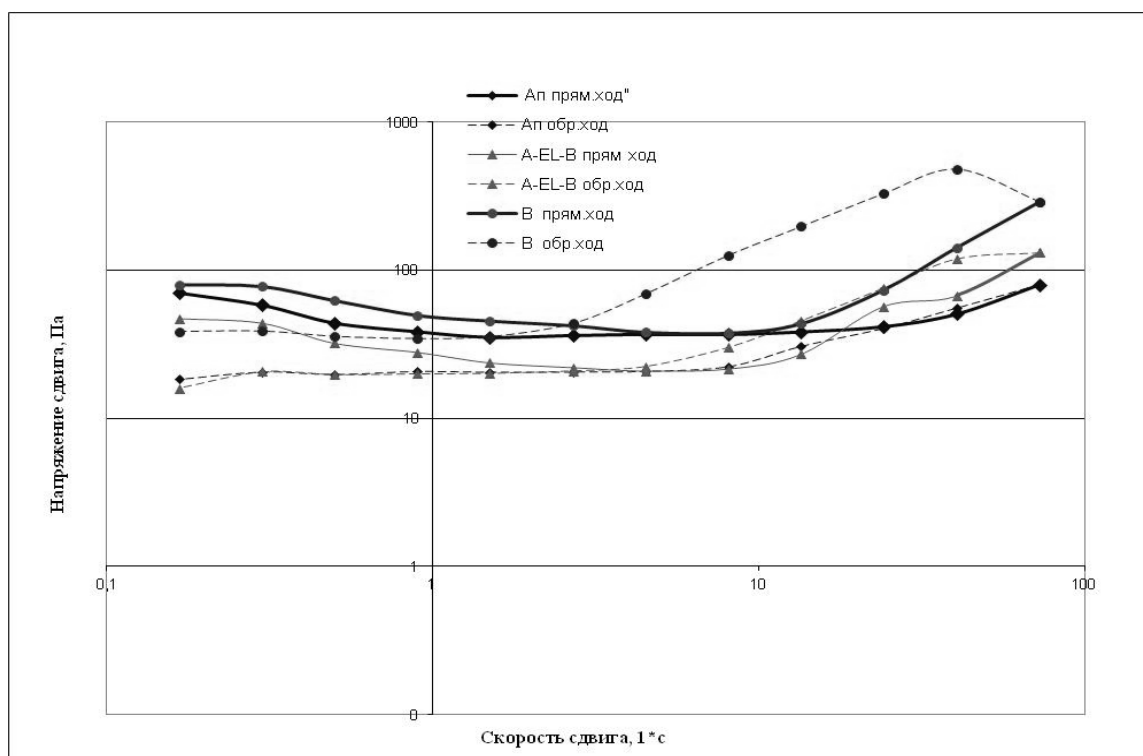
**Напряжение сдвига.** Экспериментальное определение зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига для построения реологических кривых проводили при различном времени деформирования почвы в течение 3 мин. Показания напряжения сдвига снимали каждые 10 с. Почвенные образы

для реологического исследования капиллярно увлажнялись в течение суток. Из рисунка видно, что преобладающим свойством пахотного горизонта является реопексия, т.к. обратная ветвь лежит выше прямой [2].

**Таблица 2**  
*Некоторые физические и химические свойства дерново-подзолистой почвы*

Горизонт	Содержание общего углерода, %	Содержание агроном. ценных агрегатов, %	Коэффициент структурности Кст.	Водоуст. агрегатов, %	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г
Апах.	1,22	62,9	2,1	8,2	45,6
А-EL	0,41	68,5	2,2	4,2	34,6
EL-В	0,26	42,0	0,7	3	19,7
В	0,29	81,5	4,4	1,4	108,8

Таким образом, в профиле дерново-подзолистой почвы основным реологическим свойством является реопексия, а изменение физико-химических свойств влияет лишь на вязко-прочностные свойства нашей почвы.



**Рис.** Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига дерново-подзолистой почвы

**Таблица 3**  
**Параметры прочности и вязкости**  
**дерново-подзолистой почвы**

Реологические параметры	Горизонт, глубина, см		
	Апах (0-10)	А-ELB-B (25-35)	В (43-53)
	Параметры прочности, Па		
$R_{к1}$	20	1	24
$R_{к2}$	21	0	16
	27	24	28
$R_m$	36	31	70
	Параметры вязкости, Па*с		
$\eta_{Рк1}$	121	6	143
$\eta_{кон}$	172	86	177
$\eta_{min}$	0,9	0,4	1,3

**Прочность.** Рассмотрим реологические параметры прочности (табл. 3). Параметр  $R_{к1}$ , характеризующий начало течения почвенной суспензии,  $R_{к2}$  (начало разрушения структуры), параметра  $R_m$ , характеризующего напряжение сдвига, соответствующее полному разрушению структуры, в пахотном горизонте составляет 20 Па, ниже по профилю, в элювиальном горизонте снижаются, а затем в иллювиальных горизонтах значение параметра  $R_{к1}$  опять становится около 20 Па. Точно такая же зависимость прослеживается и с параметром  $R_{к2}$  (начало разрушения структуры). При рассмотрении параметра  $R_m$ , характеризующего напряжение сдвига, соответствующее полному разрушению структуры, его значение в пахотном горизонте составляет примерно 40 Па, а в образцах с иллювиальным горизонтом – 70-80 Па. Наибольшие значения  $R_m$  наблюдаются в горизонте В и горизонте А-В. Таким образом вниз по профилю увеличивается напряжение сдвига, соответствующее полному разрушению структуры.

**Вязкость.** Значения вязкости наименьшие в образцах с элювиальным горизонтом, это связано с наименьшим содержанием в нем общего углерода, который в свою очередь является одним из основных склеивающих элементарные почвенные частицы веществ. Вязкость начала  $\eta_{Рк1}$  и конца движения  $\eta_{кон}$  почвенной суспензии в пахотных горизонтах колеблется в диапазоне 110-120 Па\*с, в образцах горизонтов А-ELB-B и А-EL находятся в диапазоне 100-140 и 6-80 Па\*с соответственно. Начальная вязкость в иллювиальном горизонте составляет 143 Па\*с в горизонте В.

### Выводы

1. Исследованные физические и химические свойства дерново-подзолистой старопашотной почвы определяются генетиче-

скими горизонтами и существенно влияют на реологическое поведение почвы. Параметры прочности структуры: давление начала течения почвенной суспензии и начала разрушения структуры в старопашотном горизонте составляет 20-40 Па, затем снижается в элювиальном и возрастает в иллювиальном горизонте до 70 кПа. Вязкость начала и конца движения почвенной суспензии в пахотных горизонтах колеблется в диапазоне 110-120 Па\*с, в образцах горизонтов А-ELB-B и А-EL – в диапазоне 140-170 и 6-80 Па\*с соответственно.

2. При сдвиговых деформациях почвенных горизонтов дерново-подзолистой почвы преобладающим явлением является реопексия, при различном участии тиксотропных процессов.

### Библиографический список

1. Манучаров А.С., Аbruкова В.В. Применение в почвенно-реологических исследованиях автоматического прибора REOTEST-2 // Почвоведение. – 1982. – № 11. – С. 92-100.
2. Аbruкова Л.П. Реопексия при реологических исследованиях // Почвоведение. – 1976. – № 5. – С. 121-125.
3. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1986.
4. Шейн Е.В. Курс физики почв. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 432 с.
5. Шрамм Г. Основы практической реологии и реометрии. – М.: КолосС, 2003. – 311 с.
6. Markgraf W., Horn R., Peth S. An approach to rheometry in soil mechanics – Structural changes in bentonite, clayey and silty soils // Soil and Tillage Research. – 2006. – Vol. 91 (1-2). – P. 1-14.
7. Mezger T.G. (2011). The Rheology Handbook. 3rd edn, Vincentz Network GmbH, Hannover.

### References

1. Manucharov A.S., Abruкова V.V. Primenenie v pochvenno-reologicheskikh issledovaniyakh avtomaticheskogo pribora REOTEST-2 // Pochvovedenie. – 1982. – № 11. – S. 92-100.
2. Abruкова L.P. Reopeksiya pri reologicheskikh issledovaniyakh // Pochvovedenie. – 1976. – № 5. – S. 121-125.
3. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A. Metody issledovaniya fizicheskikh svoistv pochv. – 3-e izdanie, pererab. i dop. – М.: Агропромиздат, 1986.

4. Shein E.V. Kurs fiziki pochv. – M.: Izd-vo MGU, 2005. – 432 s.  
 5. Shramm G. Osnovy prakticheskoi reologii i reometrii. – M.: KolosS, 2003. – 311 s.  
 6. Markgraf W., Horn R., Peth S. An approach to rheometry in soil mechanics –

- Structural changes in bentonite, clayey and silty soils // Soil and Tillage Research. – 2006. – Vol. 91 (1-2). – P. 1-14.  
 7. Mezger T.G. (2011). The Rheology Handbook. 3rd edn, Vincentz Network GmbH, Hannover.



УДК 631.436

С.В. Макарычев, А.Г. Болотов  
 S.V. Makarychev, A.G. Bolotov

**К ВОПРОСУ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАСЧЕТНЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
 ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЧВЫ**

**THE ISSUE OF APPLICATION OF COMPUTATIONAL METHODS TO DETERMINE SOIL  
 THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS**

**Ключевые слова:** объемная и удельная теплоемкости, теплопроводность, температуропроводность, влажность, температура, плотность, дисперсность, гумус.

**Keywords:** volumetric and specific thermal capacity, thermal conductivity, thermal diffusivity, moisture content, temperature, density, dispersion, humus.

Математическое моделирование процессов переноса тепла в почве предполагает использование теплофизических коэффициентов, полученных с помощью экспериментальных методов. Их знание позволило получить многофункциональные зависимости тепло- и температуропроводности от почвенно-физических факторов, таких как влажность, плотность, температура, степень дисперсности, содержание органического вещества. Для определения объемной и удельной теплоемкости почвы разработан экспресс-метод, основанный на теории подобия и критериальных соотношениях. Полученные модели позволяют оперативно и с хорошей степенью достоверности рассчитывать параметры теплофизического состояния почв в любой момент вегетации, исходя из реально складывающихся в почвенном профиле гидротермических режимов. Это дает возможность оценить и прогнозировать степень воздействия определенных агротехнических и мелиоративных приемов на оптимизацию теплофизических свойств почв разного генезиса.

Mathematical modeling of the heat transfer processes in soil involves the use of the thermophysical factors obtained by experimental methods. The knowledge of these factors enabled to obtain multifunctional dependences of thermal conductivity and thermal diffusivity on soil physical factors as moisture content, density, temperature, degree of dispersion and organic matter content. To determine the soil volumetric and specific thermal capacity, a rapid method based on the similarity theory and criterion relations has been developed. The obtained models enable to quickly and with a high degree of reliability calculate the parameters of soil thermophysical condition at any specific time of a growing season based on the actual hydrothermal regimes evolving in a soil profile. This makes it possible to evaluate and forecast the impact degree of certain agronomic and reclamation techniques on the optimization of the thermal properties of the soils of different genesis.

**Макарычев Сергей Владимирович**, д.б.н., проф., зав. каф. физики, Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 62-83-53. E-mail: phys\_asau@rambler.ru.  
**Болотов Андрей Геннадьевич**, к.с.-х.н., доцент, каф. физики, Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 62-83-53. E-mail: agbolotov@gmail.com.

**Makarychev Sergey Vladimirovich**, Dr. Bio. Sci., Prof., Head, Physics Dept., Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 62-83-53. E-mail: phys\_asau@rambler.ru.  
**Bolotov Andrey Gennadyevich**, Cand. Agr. Sci., Assoc. Prof., Physics Dept., Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 62-83-53. E-mail: agbolotov@gmail.com.

**Введение**

Изучению теплофизических характеристик почв и методам их определения посвящено большое количество работ [1-3]. Из экспериментальных методов, использу-

емых в лабораторных исследованиях, по нашему мнению, наиболее перспективны импульсные, основанные на определении параметра нестационарного температурного поля в первой стадии его развития. Осо-